

3-2 超高速フォトニックパケットルーティング技術

3-2 Ultra-fast photonic packet routing technology

和田尚也
Naoya WADA

要旨

インターネットの普及は、コンピュータ端末間や携帯端末間における大量の情報のやりとりを引き起こした。このような情報通信量の増加は、それを支える情報通信ネットワークの高速化、大容量化、高機能化を要求している。この社会的要求に対応可能な超高速・超大容量ネットワークの実現には、情報を光でやり取りするフォトニックネットワークの構築が必要不可欠となる。本稿では、まず、フォトニックルーティング技術の概要を述べ、次に、光直交符号ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と研究成果について述べる。さらに、MP-Lambda-S (Multi-Protocol Wavelength Switching) の発展型である多波長ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と原理確認実験の結果について述べ、最後に、スペクトラルホログラフィーを用いたフォトニックラベルプロセッシング技術の概念と原理確認実験について述べる。フォトニックパケットルーティング技術は光情報処理技術の光通信への応用であり、今後の発展が期待される。

The great proliferation of the Internet has led to massive data exchanges between terminals such as computers and cellular phones. This growth in information exchange has resulted in a need for higher speed, larger capacity, and enhanced functionality of the information communications network that serves as the basis of data exchange. A photonic network, in which information is transmitted by light, is essential if we hope to the implementation of an ultra-fast, ultra-high capacity network that meets consumer demands. This paper reviews photonic routing technology, describes the concept of photonic packet routing technology employing optical orthogonal encoding labels, and then discusses our research into this technology. Also outlined are the concept and results of a proof-of-principle experiment of photonic packet routing technology using a multi-wavelength label, which is an improved system of MP-Lambda-S (Multi-Protocol Wavelength Switching). This paper concludes with an outline of and results from a proof-of-principle experiment of photonic label processing technology using spectral holography.

Photonic packet routing technology is a means of applying optical information technology to optical communications systems, and is expected to further develop in the future.

【キーワード】

フォトニックネットワーク, フォトニックパケットスイッチング, 光符号ラベル, 全光ラベル認識, 全光処理

Photonic Network, Photonic Packet Switching, Optical Code Label, All Optical Label Recognition, All Optical Processing

1 はじめに

インターネット (IP) の普及が社会にもたらした大きな変化は、いつでも誰でも、簡単に大量の情報を手に入れることが可能になったことばかりではなく、これまでテレビや新聞等のメディアを通して、情報を一方的に受け取るだけであった個人が、自ら情報の発信源となることを可能にした点にある。この事が、コンピュータ端末間における大量の情報のやり取りを引き起こし、データトラヒックの爆発的な増大を招いている。さらにインターネットは経済、医療、公共サービス等の幅広い分野で急速に利用されるようになりつつあり、我々の社会生活の中にもみるみる浸透してきている。

このインターネットの急激な普及が引き起こした、情報通信量の増大は、通信ネットワークの容量不足という深刻な問題を引き起こしている。この通信量の増加は今後更に加速することが予想されており、それを支える情報通信ネットワークの高速化、大容量化、高機能化が早急に求められている。この社会的要求に対応可能な超高速・超大容量ネットワークの実現には、従来の電気信号を使った通信ネットワークではなく、光ファイバをベースとし、情報を光でやり取りするフォトリックネットワークの構築が必要不可欠となる。フォトリックネットワーク実現の Key となる技術は、ネットワークの節と節を結ぶフォトリック伝送技術と、線から線へ情報を振り分けるフォトリック転送技術の二つに大別される。伝送技術は WDM 技術の進歩によって、光ファイバ 1 本当たり、10 テラビット級の伝送容量が実現されている。しかし、ネットワークノードにおける 1 入力当たりの転送速度は、未だにギガビットのオーダーであり、ネッ

トワークとしてみた場合の伝送容量増加の大きなボトルネックになっている。伝送容量と転送容量には約 2 桁の差がある。このノードにおけるボトルネックを解消するには、現在の電気処理による方式では限界があり、ノード機能へのフォトリック技術の導入が必須となる。

現在、主流のネットワーク構成は、電話網に代表される回線交換ネットワークから、インターネットに代表されるパケット交換ネットワークに推移しつつある。その理由は図 2 に示すように、回線交換ネットワークでは Point-to-Point Protocol (PPP) を用いているため、端末 A と端末 B が通信する場合、回線自体をこの通信に割り当ててしまい、実際にはつないでいるだけで、データトラヒックがゼロであっても、他の端末 (例えば B) は通信を行うことができない。そのため通信回線帯域の利用効率が下がってしまう。一方、Internet Protocol (IP) 等のパケット交換ネットワークでは、たとえ端末 A と端末 B が通信中であっても、回線の空いている時間スロットを使って、他の端末間 (例えば B と C) で通信を行うことが可能となる。ただしこの場合、ノード X と Y には、パケットを多重 (MUX) して送り出す機能と、パケットのアドレス情報に基づき、分離 (DEMUX)、転送を行う機能が新たに必要となる。この処理がパケットルーティングと呼ばれる機能である。現在のネットワークノードでは、アドレス認識を初めすべてのヘッダー処理を電気処理で行っている。そのため、情報が光信号として伝送されてきても、ノードで転送を行うために、いったん電気に変換しなくてはならないため、どうしても電気回路の処理速度が転送速度の限界になってしまう。したがって、電気処理速度による限界を超えてパケットを転送するには、光パケットを電気信号に変換せず、光のまま転送する、フォトリックパケットルーティングの技術が必要になる。

さらに、既存の電気処理ノードにおいては通信セキュリティの問題が存在する。伝送部における盗聴やハッキングは、物理的には可能であるが現実にはほとんど起こらない。情報を含んだ信号が、電気に変換され、更にはヘッダー処理終了までデータとしてバッファに保存されるノードに置いて、盗聴やハッキングが起こ

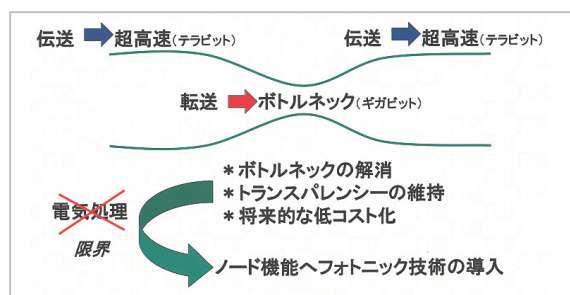


図1 ネットワークの情報伝達速度

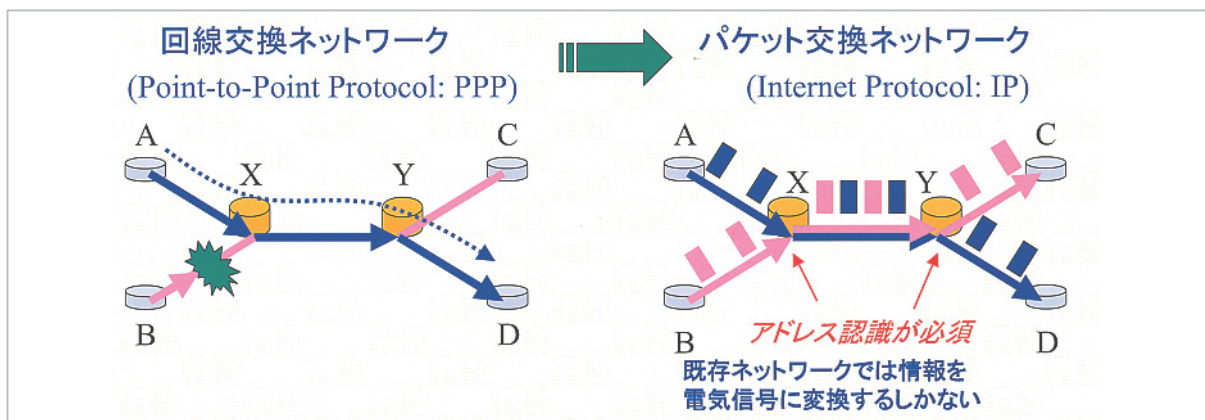


図2 ネットワーク(Protocol)の変化

る。したがって、パケットを光信号のまま転送するフォトニックルーティングでは、このような危険性を大幅に減少させ、ネットワークセキュリティの向上を図れる可能性を秘めている。

今回は、これまでのフォトニックルーティング技術の概要を述べ、続いて光直交符号ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と成果について述べる。次に当研究所が独自に開発した、MPλS (Multi-protocol Wavelength Switching) の発展型である、多波長ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と原理確認実験の結果について述べる。最後に時空変換処理とスペクトラルホログラフィーを用いたフォトニックラベルプロセッシング技術の概念と原理確認実験の結果について述べる。

2 現状技術と問題点

インターネットの爆発的な普及に伴い、ネットワークが処理すべき通信量は急速に増加している。このトラヒック収容のために、既設の光ファイバに100Gbps以上のトラヒックを収容できるWDM方式が注目され、波長分割多重(WDM)技術を用いたネットワーク構築が行われつつある。

インターネットでのWDM技術の適用は、現状では、隣接ルータ間を接続するリンクとしての使用にとどまる。送受信ノード間で複数のルータ(中継ノード)を中継してトラヒックを送る場合、中継ノードのパケット処理能力が問題になる。ネットワークのスループット改善には、

中継ノードの処理能力向上が不可欠であるが、WDM技術によるファイバの伝送容量の伸びと比較すると、電子処理技術に頼るパケット処理能力の伸びは小さい[1]。既存のネットワーク階層構造のままでは、中継ノードのルーティング処理がボトルネックとなる。

その解決手段として、IPルーティング処理を減らし、下位レイヤでフォトニックネットワークを構成する方法がいくつか提案されている。例えば、MPLS (Multi-protocol Label Switching) [2] [3] 技術や“WDM (光パス) ベースパケットネットワーク”[4] [5] があてはまる。これらの方法では、IPパケットは、ある波長にカプセル化され、フォトニックネットワーク内を流れる。ノードには、光クロスコネクタ (OXC) や光分岐挿入装置 (OADM) が用いられ、電子処理の限界を超える処理能力を持つ光処理が行われる。しかし、これらの中継処理は光信号を波長ごとにあらかじめ定められた方路に方向変換するだけで、入力された波長に含まれた情報を読み取って、同一波長のデータを複数方路へ切り替える機能はない。したがって、一波長には、送受信ノードの組が同じパケットがカプセル化される。また、光チャネル (1波長) の伝送速度は2.4Gbps、10Gbps等固定速度で、複数の入力ポートからの光信号を一方路に多重する機能はない。したがって、ネットワークのエッジノードが、伝送速度より小さい帯域しか使用しなければ、光技術が提供する大容量帯域が無駄になる。

光レイヤにおいて帯域を効率よく使用するためには、同一伝送路 (例えば波長) からの光信号を複数の方路に分離したり、複数の方路からの

光信号を一伝送路に多重する機能が必須である。IP over WDM[6]では、IPルータでこの機能が提供でき、[7][8]に示すように帯域の高効率利用は可能である。しかし、先述のように、ルーチング処理のボトルネックが依然として残るため、光レイヤでの多重が望ましい。また、インターネットで伝達されるようなバーストトラヒックには、単なる時分割多重では帯域を効率的に利用できない。パケット交換原理を導入し、ネットワーク内部では、パケットは自身が持つ宛先情報に従い、ルーチングされることが望ましい。

現在、光パケット交換機と呼ばれる装置はいくつか提案されている[9][10][11]。いずれも、パケットのルーチング情報はいったん電気信号に変換して読みとられ、適切なポートにパケットを出力する。すなわち、データ部分は光信号のまま宛先まで到達するが、アドレス情報の処理は光処理ではない。パケットの照合速度の限界は電子処理のIPルータのそれと同程度で、より高速な照合のために光処理が必要になる。

上述の課題を解決した時、光領域でデータ転送を行う大規模パケット交換ネットワークを構築する期待がいつそう高まると予測できる。一つの伝送路に宛先が異なるパケットが混在するようになると、十分な数のラベルをネットワークは提供せねばならない。ところが、一波を一ラベルとする MPLS ネットワーク[3]や光パスネットワークの技術を応用すれば、波長数が枯渇することが容易に予測できる。現在、1000 波程度は提供できるようになっている[12]が、その程度では、フォトニックネットワーク規模の拡大に対応できない可能性がある。

3 光符号を用いたフォトニックラベルスイッチ

図3に提案システムの構成を示す。提案光パケットは、アドレス情報がマッピングされた光符号とペイロードデータからなる。この光パケット全体は、波長ルーチング情報を光パスヘッダーとして持つ光フレームの、光パスペイロードとして収容される。フォトニックラベルスイッチは、波長分離器とフォトニックラベルプロセッサからなる。フォトニックラベルプロセ

ッサは、ヘッダープロセッサ、1xN フォトニックスイッチ、光遅延器で構成される。そしてパラレルラベル照合を行うヘッダープロセッサは光増幅器、光相関器、光パルス再生器、アドレス符号器からなる。ここで光相関器群は、ルーチングテーブル中のアドレスに相当する、符号を記録するアドレスバンクとして働く[13]。

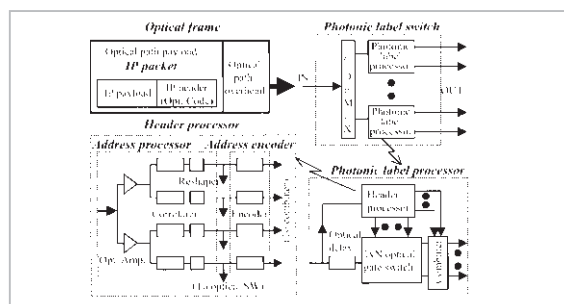


図3 光パケットとフォトニックラベルスイッチシステム

入力された光パケットは、波長分離された後、各波長に対応するフォトニックラベルプロセッサに送られる。そこでは図4に示されるように、ヘッダープロセッサによって、入力符号のレプリカが作られ、光相関演算に基づくラベル照合がパラレル処理で行われ、フォトニックスイッチ制御信号が出力される。ここで、入力ラベルと各相関器が持つ固有のラベル情報が一致した場合のみ、高いピークを有する制御信号が出力され、それ以外の相関器から高いピークを有する信号は出力されない。フォトニックスイッチは、この制御信号に基づき各パケットの転送を行う。光領域でのラベル照合に論理演算は必要なく、入力光符号とアドレスバンク中の符号との、時間領域の光相関演算でラベル照合を実行し得る。また、パラレル処理が可能のため高速化が可能である。

4 パケット転送実験

実験系を図5に示す。実験系は光パケット送信機とフォトニックラベルプロセッサからなる[14]。光パケット送信機は、2ps-10GHz パルスを発生する半導体モード同期レーザ (MLLD)、LiNbO3 強度変調器 (IM)、光符号器、光遅延器で構成される。光符号器は光タップ、5ps 遅延線、

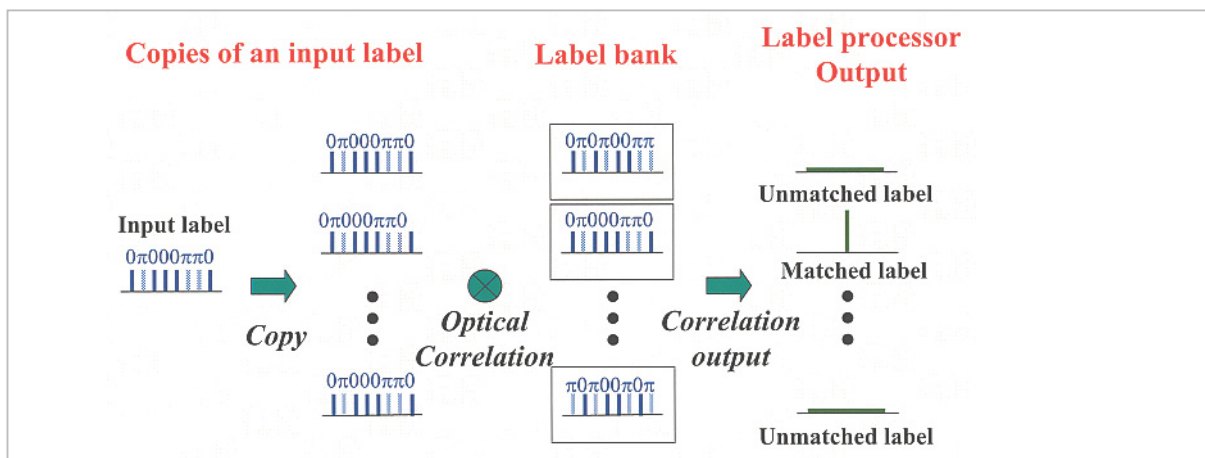


図4 全光並列ラベル処理

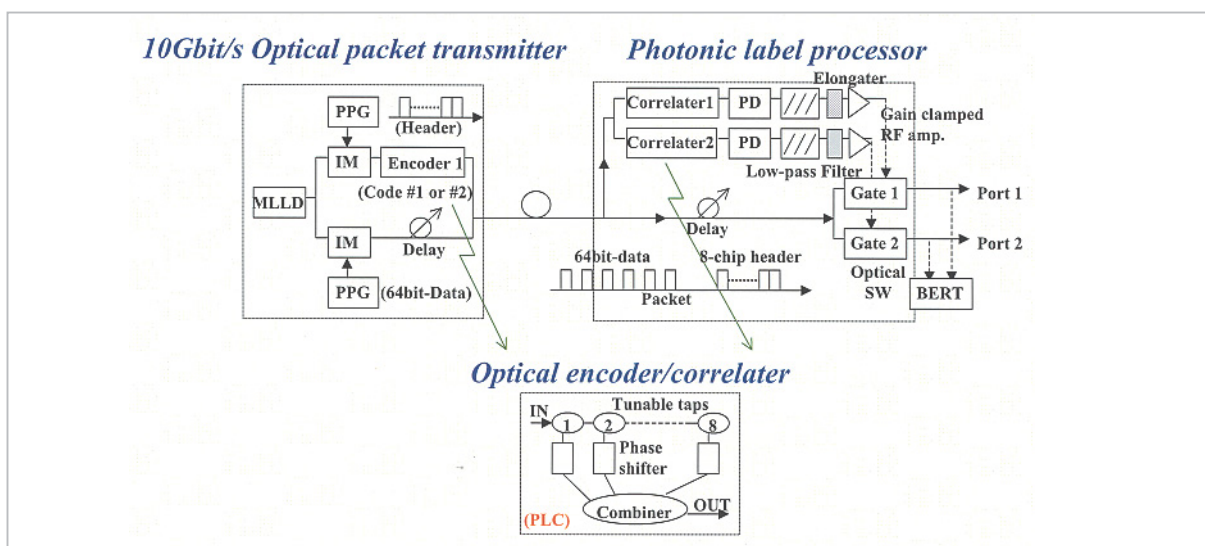


図5 光パケット転送実験系

位相器、合波器からなり、これらすべての構成要素はPLC技術により集積化されている。ここでは図6上半分に示されるように、単パルス

5ps 間隔で並んだ8つのチップパルスに分解し、各チップパルスに0または π の位相シフトを与え、8チップ光 bipolar 符号 (BPSK-code) を生成

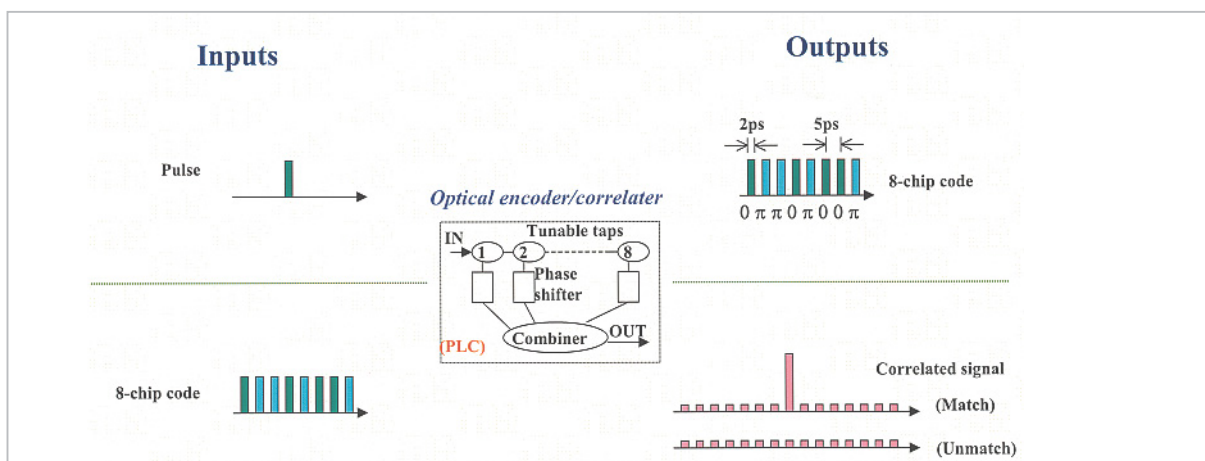


図6 全光符号器／相関器

する[15]。フォトニックラベルプロセッサはヘッダープロセッサ部と光スイッチ部からなる。ヘッダープロセッサは光相関器、光検出器(PD)、低域通過フィルタ、利得固定ドライバで構成され、一方1x2光ゲートスイッチは、40GHzの帯域を持つIM2台で実現される。ここで光相関器は光符号器と同じ構造を持つ。

光パケット送信機では、64bit@10Gbit/sのバーストデータと、8-chip BPSK 光符号がそれぞれ生成され、合波された後、光パケットとして出力される。フォトニックラベルプロセッサにおいては図6下半分に示されるように、BPSK 符号が、光相関器の持つ符号と一致する場合には、相関器から高いピークを有する自己相関波形が

出力され、不一致の場合には低い値をとる相互相関波形が出力される。符号が一致した相関器からの自己相関波形出力は、電気信号に変換され、低域通過フィルタと利得固定アンプによって適当な時間幅に引き延ばされ、ゲートスイッチを、パケットが通過する間オープンする。一方、符号不一致の相関器出力は、値が低いためにIMゲートスイッチをオープンできず、パケットを通過させない。したがってラベルが一致したゲートからのみパケットが出力され、転送が行われる。

図7(a)は生成された光符号“0 $\pi\pi\pi\pi\pi\pi$ 0”をラベルとして持つパケットの、先頭部分のストリークカメラ像である。図8(b)と(c)はそれぞれ、

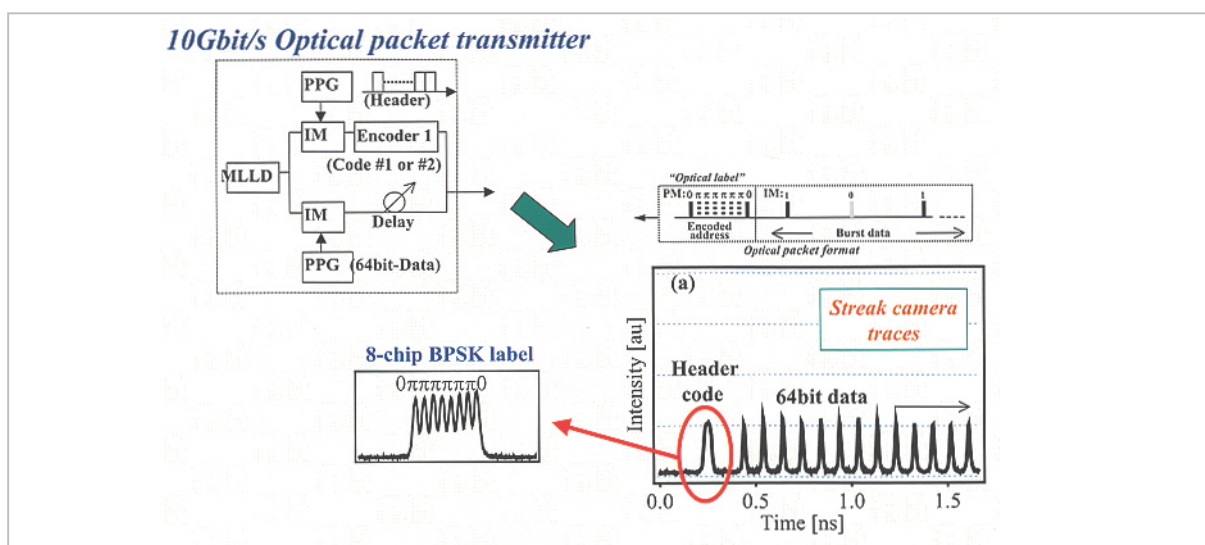


図7 光符号ラベルを持つ光パケットの生成

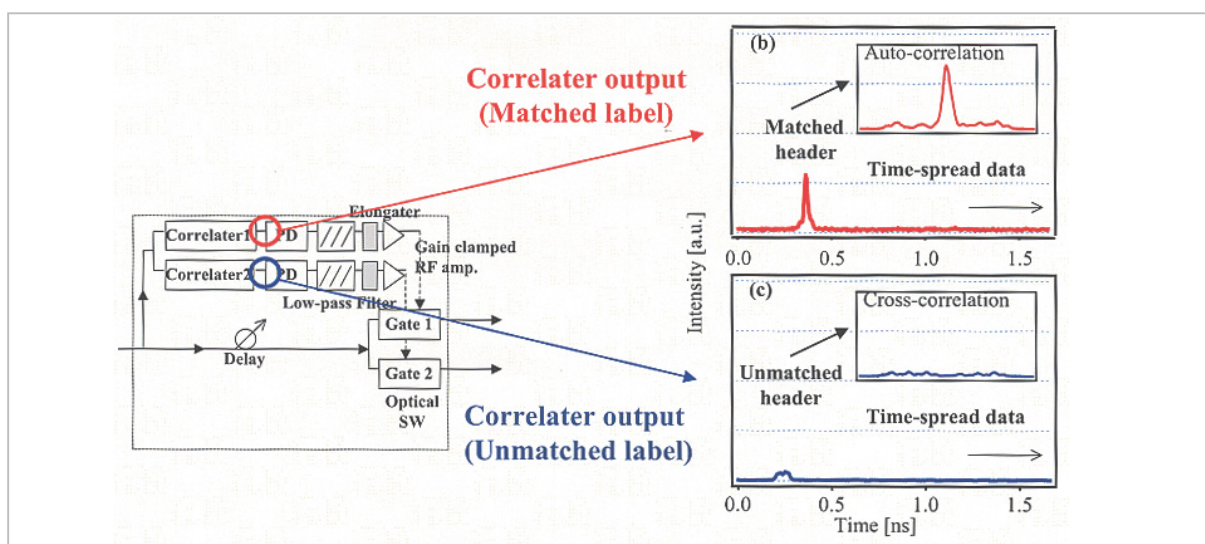


図8 全光ラベル照合

光符号 #1 “ $0\pi\pi\pi\pi\pi0$ ” (一致符号) と #2 “ $0\pi0\pi0\pi$ ” (不一致符号) を内部ラベルとして持つ、ヘッダープロセッサ中の光相関器出力である。一致符号に対しては、高いピークを有する自己相関波形が出力され、不一致符号に対しては、低い値の相互相関波形が出力される。したがって、符号が一致した光相関器出力だけが、光スイッチを駆動可能な制御信号となることが確認できる。また光符号に続く 64bit データは、光相関器を通過することによって拡散されてしまい、制御信号に対してほとんど影響を与えない。図 9 (a) と (b) はそれぞれ、ラベルが光符号 #1 と #2 の場合に対する、光ゲートスイッチ出力であり、

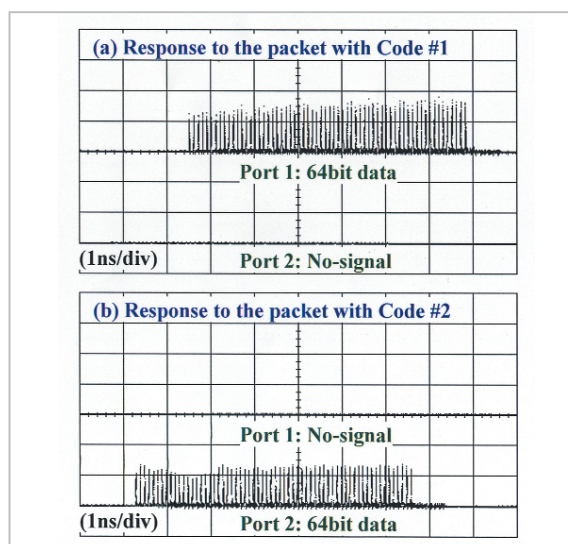


図 9 パケット転送実験結果

光符号に応じた、64bit バーストデータの転送に成功していることが分かる。両ポートにおいて、 10^{-10} 以下の良好ビット誤り率が得られており、パケット転送を保証する結果である。

さらに、本方式で用いたフォトニックラベルプロセッサは、パッシブかつ透明なデバイスであるため、原理的に波長の異なる信号に対し、同様に用いることができる。したがって、単一の認識デバイスで、WDMにより多重された異波長信号を独立にかつ同時に処理可能となる。このことから、パケットスイッチングノードにおける装置をコンパクトにできると同時に、超高速スループットを実現可能とする。システム構成を図 10 に示す。

これらの結果は超高速のフォトニックパケットルーティング実現の重要な確証となる。

5 多波長ラベルを用いたフォトニックラベルスイッチ

通信総合研究所では、前述の光直交符号を用いる方法に加え、多波長ラベルを用いた方式の提案と原理確認実験に成功している [16] [17]。提案パケットフォーマットを図 11 (a) に示す。ラベルは W の波長中から選ばれた K チップのパルス列で構成される。図 11 (a) は $K=W=4$ の場合を示している。ここで、 λ_{1A} 、 λ_{1B} 、 λ_{1C} 、 λ_{1D} は多波長ラベルを生成するために用いられる波長を示

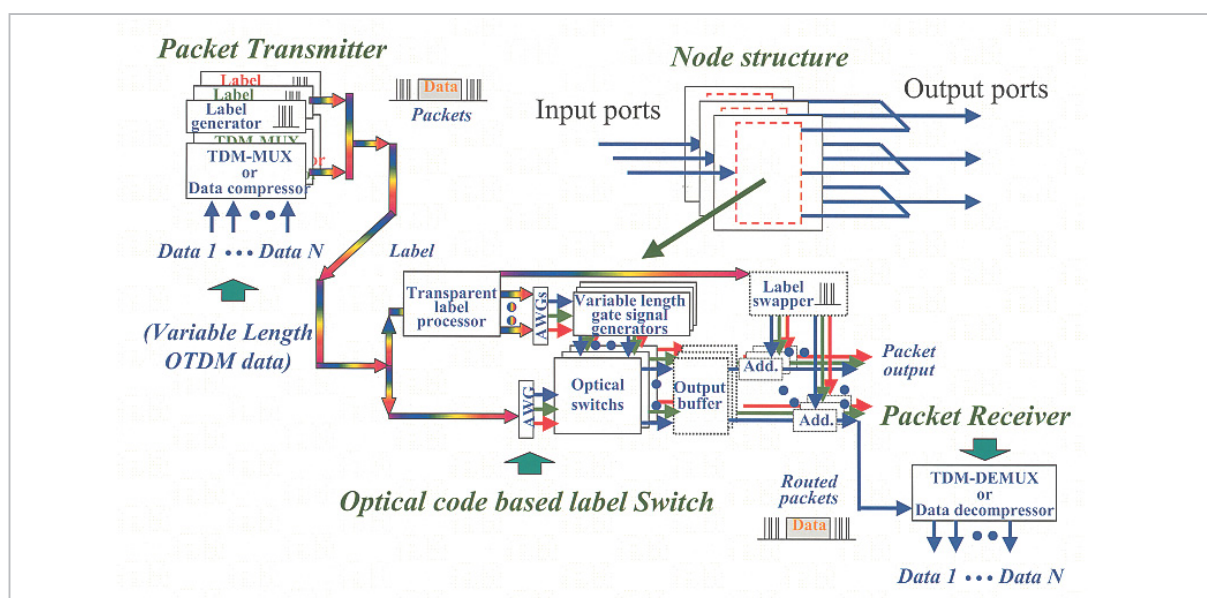


図 10 超高速スループットフォトニックパケットスイッチングシステム

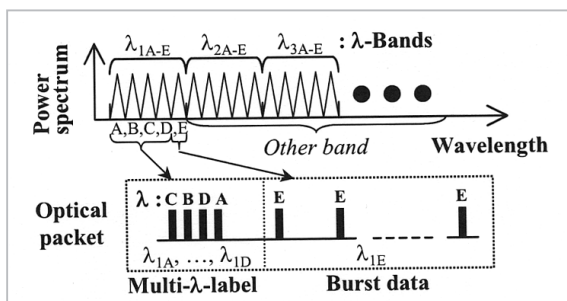


図 11 (a) 多波長ラベルを持つパケットフォーマット

している。ペイロードデータには別の波長 λ_{1E} が用いられる。ここで、波長 λ_{1A} から λ_{1E} は波長帯域 λ_{1A-E} を構成する。各波長帯域(λ_{1A-E} 、 λ_{2A-E} 、 λ_{3A-E} ...)ではそれぞれ同数の、独立した多波長ラベルが生成可能である。ラベルは、 K パルス列のそれぞれに一波を用い、各パルスに異なる波長を用いて構成される。(以下、ラベル構成A)。

図 11 (b) に多波長ラベルパケットを用いたネットワーク(以降、多波長ラベルネットワーク)構成を示す。多波長ラベルネットワークは多波長エッジノード(M λ EN: Multi-Wavelength Edge Node)及び多波長ラベルスイッチノード(M λ LSN: Multi-Wavelength Label Switching node)、波長ルータ(λ OXC)から構成される。

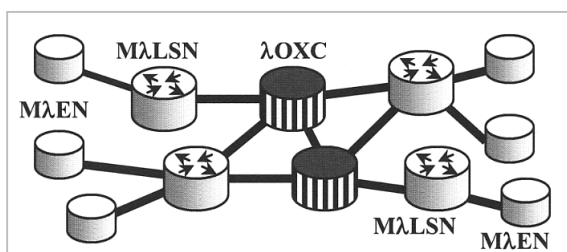


図 11 (b) ネットワーク構成

多波長エッジノードは、外部から到着したデータに多波長ラベルを追加して光パケットを構成し、ネットワークに転送する機能を持つ。また、光パケットが到着すると、ラベルを取り除き、データをネットワーク外部に転送する機能を持つ。多波長ラベルスイッチノードは、多波長ラベルスイッチ(M λ LS: Multi-Wavelength Label Switch)と多重処理装置から構成される。多波長ラベルスイッチは、多波長ラベルを読み取り、適切なポートに光パケットを転送する機能を持つ。多波長ラベルの生成と読み取りは、

マルチセクションFBGを用いた光学処理によって行われる。多重処理装置では、複数の多波長ラベルスイッチから到着した光パケットを多重する。波長ルータは、一波長帯内のすべての波長を、同一の出力ポートに交換する。したがって、図 11 (a) に示した同一波長帯内の波長から構成されるパケットは、波長ルータで分解されることはない。以上の構成から、図 11 (b) のように二種類のノードを同一ネットワークに混在させることができ、光レイヤにおいて柔軟なネットワークを構成できる[18]。

多波長ラベルネットワークでは、一波でラベルを構成するネットワークや光パスネットワークと比較して、ラベル生成に必要な波長数を減らせる。ラベル構成Aでは、ラベルに W 波長、 K パルス列を与える場合、 $W!/(W-K)!$ の異なるラベルを生成できる(ただし、 $W \geq K$)。最短経路ルーチング法によりルーチングを行うエッジノード数 N のネットワークでは、 $W!/(W-K)! \geq N$ を満たす最小の整数 W に必要波長数を抑えられる。例えば、 $N=100$ 程度のバックボーンネットワークにおいて、宛先アドレスにあたるラベルがパケットに含まれる場合を想定する。このとき一波でラベルを構成するネットワークでは、100波長が必要になる。また、光パスネットワークでは、およそ10,000波となる。一方、多波長ラベルネットワークでは、パルス数2のラベルを用いると11波長ですむ。パルス数4のラベルであれば、わずか5波になる。アドレス長32ビットのパケットを転送するインターネットを対象に、各ホストをエッジノードとみなした場合でも、多波長ラベルネットワークでは高々20波長(パルス数8)ですむ。

この光ラベルは更に増やすことができる。ラベル用の波長をすべて一度ずつ用い、それらをラベル空間 K パルスの任意の位置に割当ててことを許す(ラベル構成B)。この場合には、パケットの先頭を認識するために、先頭には最低1つの波長をあてる必要がある。したがって、ラベル数は $K^W - (K-1)^W$ となる[18]。

図 12 にラベル構成A、Bについて、波長数とラベル長、ラベル数の関係を示す。A、Bいずれの場合も8波をラベルに用いれば、10000を超えるラベルを提供できることが分かる。

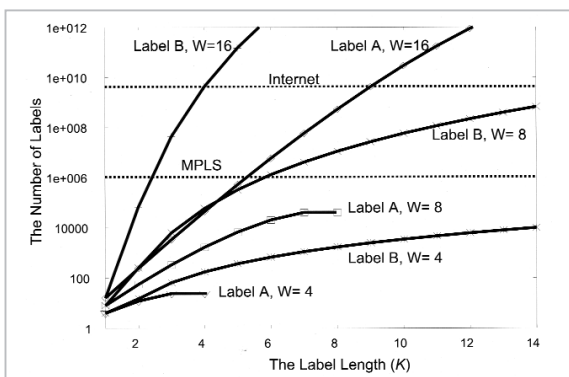


図 12 ラベル数の比較

より詳しい解析結果は、参考文献[19]を参照のこと。

6 多波長ラベルスイッチの構成

図 13 に多波長ラベルスイッチ (MILS) のシステム構成をブロック図で示す。多波長ラベルスイッチは、ラベル／データ分離装置、遅延器、多波長ラベルプロセッサ、光スイッチ、ラベル交換装置からなる。スイッチ構成は、先に述べた光符号ラベルを用いたフォトニックスイッチシステムと同様であるが、本多波長ラベルスイッチではラベル／データ分離装置とラベルプロセッサ部の構成が異なる。また今回は触れないが、ラベル交換部の構成も異なる [20]。

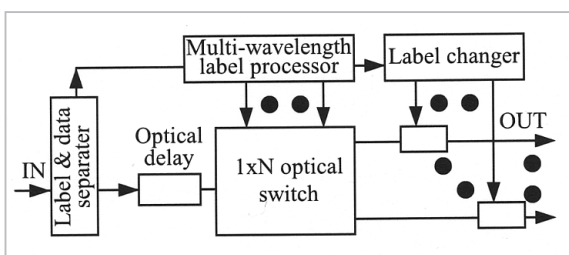


図 13 多波長ラベルスイッチ

本システムに多波長ラベルを持つパケットが入ると、ラベル部だけがラベル／データ分離装置で分離され、ラベルプロセッサに送られる。ラベルプロセッサでは、ラベル認識とラベルバンクとの照合が全光学的に平行処理により行われる。このラベル照合結果に基づき、ラベルプロセッサは光スイッチを制御し、パケットを目的とするポートへ転送する。またラベルの変更が必要な場合には、ラベル交換装置によ

て新たなラベルがつけられた後、送り出される。

7 多波長ラベルスイッチの構成

図 14 に原理確認実験システムの構成を示す。実験系は多波長ラベルパケット送信機、33km 分散シフトファイバ (DSF)、3ポート出力多波長ラベルスイッチからなる。多波長ラベルパケット送信機は、帯域幅約 140nm@10GHz の多波長パルスを出力するスーパーコンティニューム光源 (SC : supercontinuum) [21]、LiNbO₃ 強度変調器 (IM)、3セクションファイバ回折格子 (FBG) と光サーキュレータからなる多波長ラベル生成器 [22]、帯域通過光フィルタ (O-BPF)、そして光遅延器で構成される。SC 光源からの 10GHz 多波長パルス光は、IM によりその繰り返し速度をパケットレートまで下がられた後、3セクション FBG によって三つのパルスに分離され、多波長ラベル (図 14 中では " λ_{1A} 、 λ_{1C} 、 λ_{1B} ") が生成される。一方、中心波長 λ_{1E} のパルスが SC 光より BPF で抜き出され、IM により 64bit 長のバーストデータが生成される。生成された多波長ラベルは、光遅延器で時間差が補正されたバーストデータの先頭に配置され、多波長ラベルをもつパケットとして送信される。

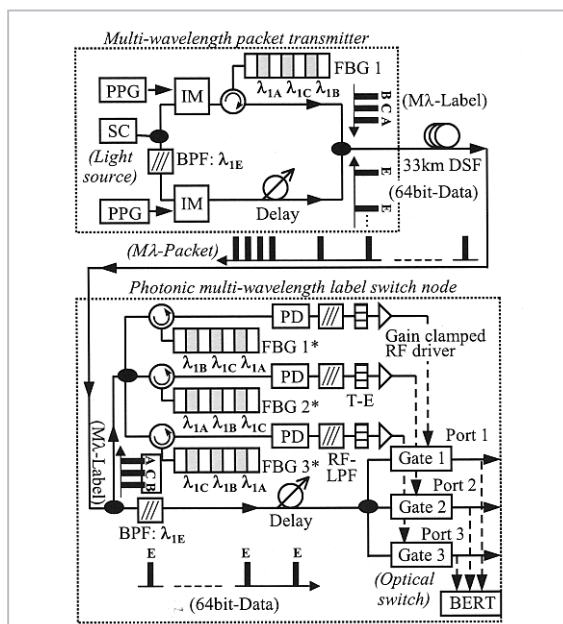


図 14 実験系

3ポート出力多波長ラベルスイッチは、O-BPF、

光遅延器、3セクションFBGと光サーキュレータによる多波長ラベル相関器、光検出器(PD)、低域通過電気フィルタ(RF-LPF)、RF 閾値処理装置、RF 波形伸長器、ゲインクランプRFアンプ、光スイッチによって構成される。1×3光ゲートスイッチは、40GHzの帯域をもつLiNbO₃強度変調器からなる。多波長ラベルスイッチ中において、3セクションFBGアレーは、ラベル認識のための相関処理を行うと同時に、ラベルバンクとして働く。入力ラベルが相関器の波長の組み合わせと一致した場合、FBG相関器は高いピークの光パルスを出力する。一方、入力ラベルの波長列と相関器の波長の組み合わせが一致しない場合は、低い高さのパルスが出力されるだけで、高いピークのパルスは出力されない。相関器からの光出力はPDによって電気信号パルスに変換される。変換された電気信号は、LiNbO₃強度変調器で構成されるゲートスイッチを、パケット通過に要する時間幅で開くために、閾値処理をされた後、電気的処理により引き伸ばされる。入力ラベルと一致した相関器からの高いパルスは、閾値処理によって“1”とみなされ、電気処理によりゲート信号に変換される。一方、入力ラベルと一致しなかった相関器からの出力は、高いピークのパルスが無いために、閾値処理により“0”とみなされ、電気処理後の出力は0レベルのままである。したがって、入力ラベルと一致した相関器が結線されたゲートスイッチだけがオープンされ、それ以外のゲートスイッチはクローズされたままである。これにより入力されたパケットは、ラベルに相当するポートへと転送される。

図15に実験結果を示す。図15(a)と(b)は多波長ラベルパケット送信機により生成された、多波長ラベル“ λ_{1A} 、 λ_{1C} 、 λ_{1B} ”と、そのラベルをヘッダーとして持つパケットの強度を、サンプリングオシロで観測した結果である。図15(c)と(d)はそれぞれ、図15(a)の多波長ラベルが入力された場合の、相関器FBG 1* (“ λ_{1B} 、 λ_{1C} 、 λ_{1A} ”)と相関器FBG 3* (“ λ_{1C} 、 λ_{1B} 、 λ_{1A} ”)の出力波形である。ラベルが一致する図15(c)では、高いピークを持つパルスが出力されるが、ラベル不一致の図15(d)では、高いピークは観測されない。これらの結果は、全光学的多波長ラベル

認識を示している。図15(e)と(f)は3光スイッチ各ポート出力波形を示している。図15(e)は相関器FBG 1*と一致する多波長ラベル“ λ_{1A} 、 λ_{1C} 、 λ_{1B} ”を持つパケットが、ラベルスイッチに入力した場合の結果であり、図15(f)は相関器FBG 3*と一致する多波長ラベル“ λ_{1A} 、 λ_{1B} 、 λ_{1C} ”を持つパケットが、ラベルスイッチに入力した場合の結果である。この結果から、多波長ラベルスイッチが、パケットの持つラベルに応じて、出力先をスイッチしている事が分かる。

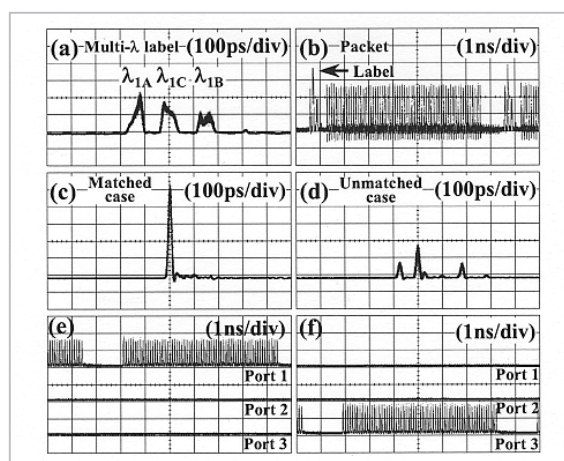


図15 実験結果(その1)

図16は転送されたパケットのBack-to-backと33km伝送後におけるビット誤り率を示している。図16(a)、(b)、(c)はそれぞれ、出力ポート1、2、3の出力に相当している。いずれのポート出力の場合も、良好な伝送と転送が行われていることが明らかである。これらの結果は、多波長ラベルスイッチを用いたフォトニックネットワーク実現の可能性を示すものである。

8 ホログラフィックラベルプロセッサ

これまでPLC型相関器を用いる光符号ラベルスイッチ方式(図5)と、FBG型相関器を用いる多波長ラベルスイッチ方式(図14)について述べたが、これら2方式では、いずれも相関器とアドレスが1対1対応している為、Exact matchingのアドレス処理をするには、ヘッダープロセッサ内に大量の相関器が必要になる。

そこで、一つのデバイスに多くのアドレス情

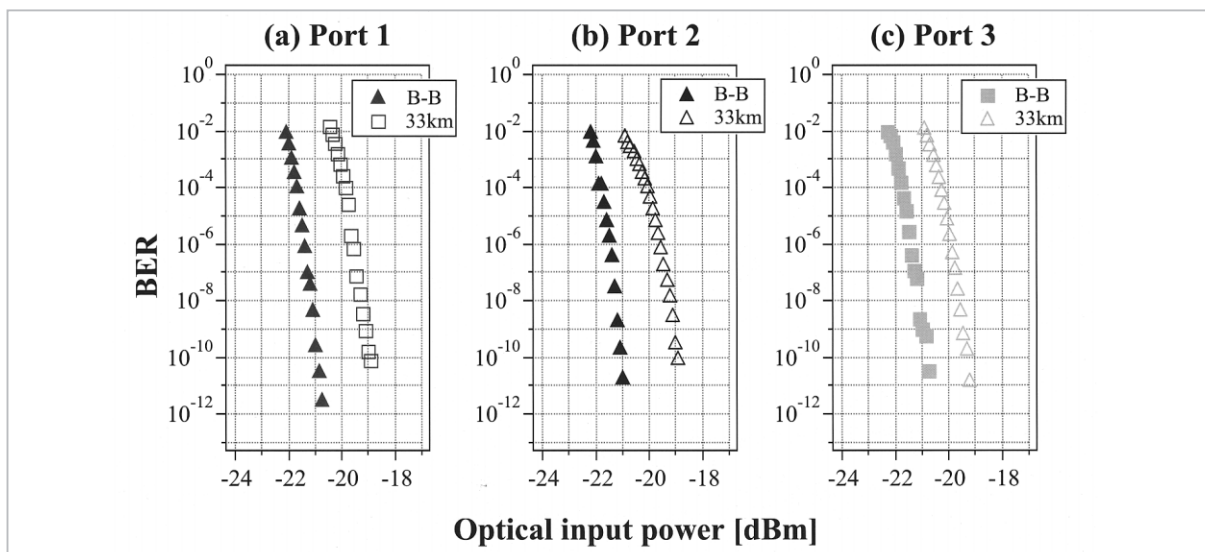


図 16 実験結果(その2)

報を記録できるホログラムを、PLC復号器アレイに代わりアドレスバンクとして用い、特にスペクトラルホログラフィーを用いた、ホログラフィックアドレスプロセッサを提案した^{[23][24]}。

図 17 はホログラフィックラベルプロセッシングの原理を示した、ブロックダイアグラムである。入力された光ラベルは時空変換^{[25][26]}された後、フーリエ変換され角度多重スペクトラルホログラム (Angular-multiplexed spectral hologram : AMSH)^{[27][28]}に入射される。AMSHにはあらかじめ、多数の入力ラベルに相当する情報を多重記録しておく。ここでAMSHはアドレスバンクとして働く。AMSHは入力ラベルの種類に応じて、違った角度にパルスを出力する。出力されたパルスはフーリエ変換レンズを通して、位置情報に置き換えられ、位置情報検出装置によって検波される。結果として、入力ラベルの種類に応じた出力が得られる。したがって、複数ラベルの照合を単一デバイスでリアルタイムに行うことができる。

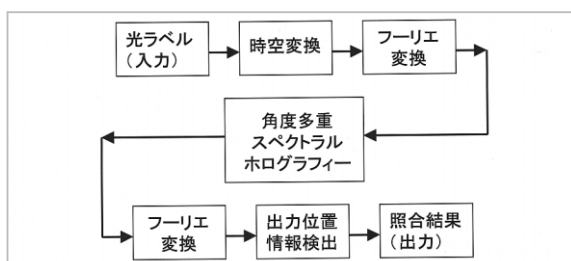


図 17 ホログラフィックラベルプロセッシングの原理

図 18 (a) は AMSH へのラベル情報多重書込 (ホログラフィックラベルバンク作成) の系を示している。系は、時空変換用回折格子、フーリエ変換レンズ、ホログラム媒質からなる。光ラベルと参照パルスは同時に時空変換され、フーリエ変換レンズを通して、ホログラム媒質上で干渉し記録される。同様の操作を多重記録するすべての光ラベルに対して行う。このとき、光ラベルの入力位置は常に一定とし、参照パルスの入力位置を各光ラベルごとに変わっていく。この操作によって、AMSHによるラベルバンクが完成する。

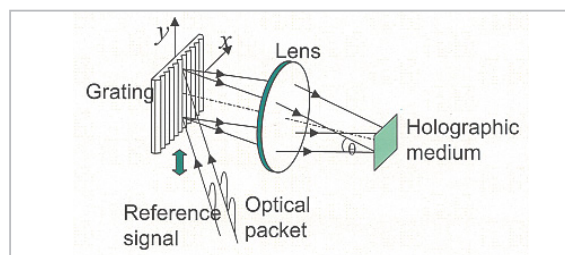


図 18 (a) ラベル情報書込

図 18 (b) にホログラフィックラベルプロセッサの構成を示す。プロセッサは回折格子、2つのフーリエ変換レンズ、AMSHで構成される。アドレス情報がマッピングされた光ラベルは、回折格子によって時空変換された後、フーリエ変換レンズを通りスペクトラルホログラムに入射する。スペクトラルホログラムにはあらかじめ図 18 (a) の系を用いて、複数の光ラベル情報が角

度多重記録されているため、スペクトラルホログラムから出る光は、再びフーリエレンズを通り、各入射光ラベルに応じた位置に出力される。

なお、ここでは従来のスペクトラルホログラフィーの応用のように、再び時空変換を行い、信号を時間波形に戻す必要は無い。

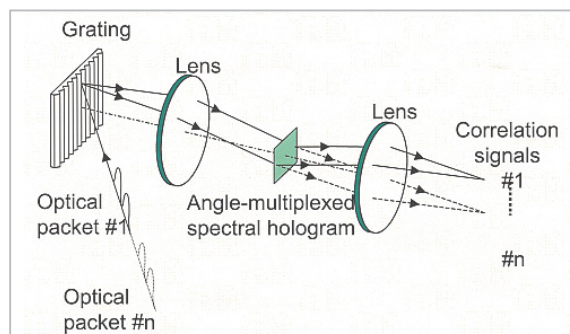


図18 (b) ラベル照合

9 原理確認実験と結果

図19に10Gbit/sでの、全光アドレス照合原理確認実験の系を示す。系はモード同期半導体レーザー(MLLD)、光ファイバアンプ(EDFA)、フィルタ、偏波コントローラ(PC)、アイソレータ、PLC型8チップ光符号器、分散シフトファイバ、コリメータ、ホログラフィックアドレスプロセッサ、光スペクトルアナライザ(OSA)、光強度計(OPM)からなる。MLLDから出力される中心波長1550nm、10Gbit/s、2ps幅のパルスは、PLC型8チップ光符号器で8チップ光強度符号に変換される。生成された光符号は、ホログラフィックアドレスプロセッサに入力され、上述の原理に基づき、光符号の種類に応じた位置にパルス信号を出力する。出力信号は光スペクトラムアナライザ(OSA)と光パワーメータ(OPM)で観測される。

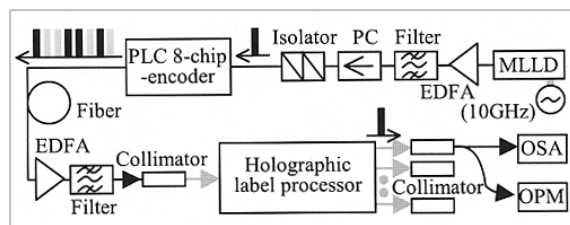


図19 ホログラフィックラベルプロセッシング実験系

ここでは、1.5 μ m帯用のホログラム材料が手に入らなかったため、コンピュータを用い、1.5 μ m帯用に補正を加えた信号パターンを準備し、中心波長632.8nmのHe-Neレーザーを用いてホログラフィックアドレスバンクを作成した。ホログラム媒質には、可視光用のAgfa-Gevaert 8E75を使用した。1.5 μ m帯用ホログラムをHe-Neレーザーを用いて、擬似的に作成する場合、ホログラムを作成する段階で、媒質上に実際の入力信号を入射できないため、光位相符号ラベル用のAMSHは作成できない。そのためこの原理確認実験では光強度符号をラベルとして用いた。

図20、21に実験結果を示す。図20(a)と(b)はそれぞれ、PLC型符号器で生成された、光符号ラベル“10010010”と“10000010”のストリークカメラ像(時間波形)である。先に行ったPLC型相関器を用いたフォトリックルーティングの実験では、“0, π ”の組み合わせの光位相符号を生成し、アドレス情報として用いた。しかし今回は上記理由により、“1, 0”の組み合わせの強度ラベルになっている。

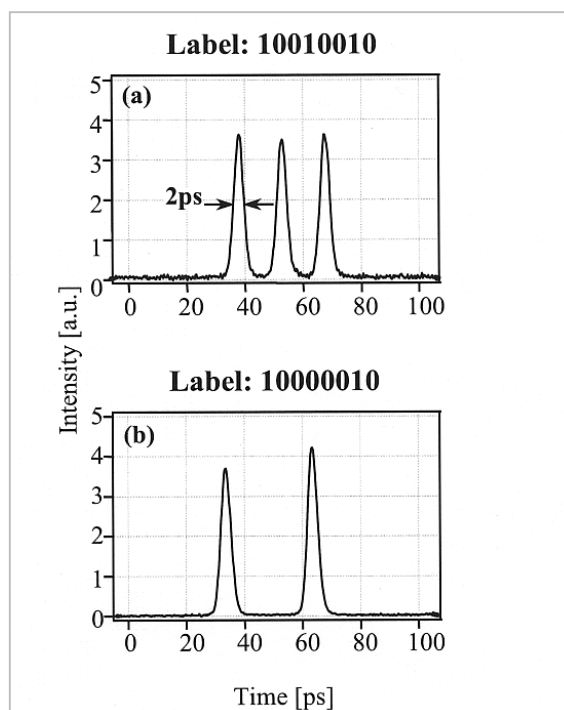


図20 生成された8チップOOKラベル

図21(a)と(b)はアドレスプロセッサの、ある出力ポートで観測したパワースペクトルで、それぞれ入射光符号が、あらかじめポートに割

り当てられた符号と一致した場合と、不一致の場合である。一致した場合にはピークが現れ識別が可能となる。同様に図22は光符号ラベル“10010010”と“10000101”を多重記録したAMSHに、光符号ラベル“10010010”を入力した場合に、光符号ラベル“10010010”の一致信号出力位置と、光符号ラベル“10000101”の一致信号出力位置との強度分布を比較したものである。これらの結果はAMSHによる多重記録ラベル認識デバイスの可能性を示している。

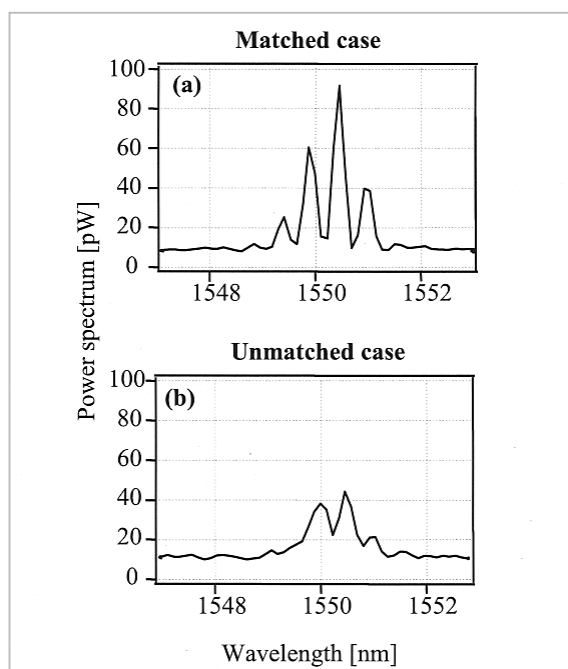


図21 8チップOOKラベルの認識(1)

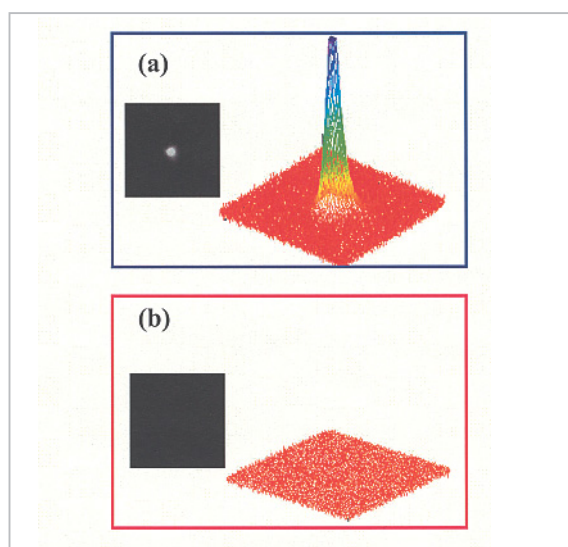


図22 8チップOOKラベルの認識(2)

今回は、可視光用のホログラム媒質を実験に用いたため、 $1.5\mu\text{m}$ 帯の光では損失が大きく、光スイッチを駆動するだけのエネルギーが得られなかった。 $1.5\mu\text{m}$ 帯用高効率ホログラムの作成が今後の鍵である。

10 まとめ

これまでのフォトニックルーティング技術の概要を述べ、続いて光直交符号ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と成果について解説し、超高スループットのパケットスイッチングノードの構成について述べた。さらに、MP λ Sの発展型である、多波長ラベルを用いたフォトニックパケットルーティング技術の概念と原理確認実験の結果について述べた。最後にスペクトラルホログラフィーを用いたフォトニックラベルプロセッシング技術の概念と原理確認実験の結果について述べた。フォトニックパケットルーティング技術は光情報処理技術の光通信への応用であり、今後の発展が期待される。またそのためには、 $1.5\mu\text{m}$ 帯での光情報処理用材料の開発が重要である。

謝辞

本文の執筆に当たり、共同研究者であり有益な議論をしていただいた、通信総合研究所原井洋明研究員、中條渉グループリーダー、久保田文人主幹研究員並びに大阪大学北山研一教授、Suranaree大学 Joewono Widjaja 博士、職業能力開発大学校石井行弘教授、日本女子大学の小館香椎子教授、清水賀代助手、川上尚子氏に感謝致します。また本研究を進めるに当たり、実験をサポートして頂いた富山吉広氏、新井朋子氏、また絶えず支援していただいた、通信総合研究所板部敏和部門長及び飯田尚志理事長に感謝致します。

参考文献

- 1 野島 聡, "高速ルータの実現技術と課題", 電子情報通信学会 PNI研究会(PNI99-5), pp.29-34, June 1999.
- 2 E. Rosen, A. Viswanathan and R. Callon, "Multiprotocol label switching architecture (draft-ietf-mpls-arch-07.txt)," IETF Internet Draft (Work in Progress), July 2000.
- 3 D. Awduche, Y. Rekhter, J. Drake, and R. Coltun, "Multi-protocol lambda switching: Combining MPLS traffic engineering control with optical crossconnects (draft-awduche-mpls-te-optical-02.txt)," IETF Internet Draft (Work in Progress), July 2000.
- 4 I. Chlamtac, A. Ganz, and G. Karmi, "Lightpath Communications: An approach to high bandwidth optical WAN's," IEEE Transactions on Communications, vol. 40, pp.1171-1182, July 1992.
- 5 E. Modiano, "WDM-based packet networks," IEEE Communications Magazine, vol.37, no.3, pp.130-135, March 1999.
- 6 N. Ghani S. Dixit, and T. Wang, "On IP-over-WDM integration", IEEE Communications Magazine, vol.38, no.3, pp.72-94, March 2000.
- 7 H. Harai, F. Kubota, and H. Nakazato, "Design of reconfigurable lightpaths in IP over WDM networks," to appear in IEICE Transactions on Communications, October 2000.
- 8 H. Harai and F. Kubota, "Bandwidth maximization in IP over WDM path networks," to be presented at OptiComm 2000, October 2000.
- 9 葉原 敬士, 三条 広明, 西沢 秀樹, 小川 育夫, 須崎 泰正, "波長ルーチング型大容量光パケットスイッチの開発", 電子情報通信学会技術研究報告(SSE99-148), pp.13-18, February 2000.
- 10 S. Araki, S. Takahashi, Y. Maeno, Y. Suemura, A. Tajima, H. Takahashi, K. Matsuda, T. Tamanuki, S. Dohmae and N. Henmi, "A 2.56 Tb/s throughput packet/cell-based optical switch-fabric demonstrator", ECOC '98, pp.127-128, 1998.
- 11 S. Yao, B. Mukherjee, and S. Dixit, "Advances in photonic packet switching: An overview," IEEE Communications Magazine, vol.38, no.2, pp.84-94, February 2000.
- 12 H. Takara, T. Ohara, K. Mori, K. Sato, E. Yamada, K. Jinguji, Y. Inoue, T. Shibata, T. Morioka, and K-I. Sato, "Over 1000 Channel Optical Frequency Chain Generation from A Single Supercontinuum Source with 12.5GHz Channel Spacing for DWDM and Frequency Standards", ECOC 2000 Post Deadline Paper, September 2000.
- 13 K. Kitayama and N. Wada, "Photonic IP Routing," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.11, p.1689, 1999.
- 14 N. Wada and K. Kitayama, "Photonic IP routing using optical codes: 10Gbit/s optical packet transfer experiment," OFC2000, WM51, p.362, 2000.
- 15 N. Wada, K.Kitayama, "10Gbit/s optical code division multiplexing using 8-chip optical bipolar code and coherent detection," J. Lightwave Tech., 17, p1758, 1999.
- 16 N. Wada, H. Harai, W. Chujo, and F. Kubota, "Photonic packet routing based on multi-wavelength label switch using fiber Bragg gratings," ECOC2000, vol.4, no.10.4.6, pp.71-72, Sep. 2000.
- 17 和田尚也, 原井洋明, 中條渉, 久保田文人, "多波長ラベルスイッチを用いたフォトニックネットワーク", 電子情報通信学会 PNI研究会(PNI2000-24), pp. 45-50, 2000.
- 18 H. Harai and N. Wada, "Photonic packet forwarding in a multi-wavelength label switching node," ICC2001 Workshop on next generation switching/routing: the optical role, WS2-7, June 2001.
- 19 原井洋明, 和田尚也, 久保田文人, 中條渉, "多波長ラベルネットワークにおける帯域の異なる光パス設定のためのノード構成", 電子情報通信学会 PS研究会(PS2000-37), pp.7-12, 2000.
- 20 K. Kitayama, N. Wada, and H. Sotobayashi, "Architectural considerations of photonic IP router based upon optical code correlation (Invited)," IEEE J. Lightwave Technol, vol.18, no.12 December 2000.

- 21 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "325 nm bandwidth supercontinuum generation at 10 Gbit/s using dispersion-flattened and non-decreasing normal dispersion fibre with pulse compression technique," IEE Electron. Lett., vol.34, p.1336, 1998.
- 22 N.Wada, H.Sotobayashi, and K.Kitayama, "2.5 Gbit/s time-spread/wavelength-hop optical code division multiplexing using fibre Bragg grating with supercontinuum light source," IEE Electron. Lett., vol.36, no.9, pp.815-817, Apr. 2000.
- 23 和田尚也, J.Widjaja, 石井行弘, 中條渉, "スペクトラルホログラフィーを用いたフォトニックパケットルーティング," Optics Japan 2000, vol. 1, no.7pA7 pp.61-62, October 2000.
- 24 J. Widjaja, N. Wada, Y. Ishii, W. Chujo, "Photonic packet address processor using holographic correlator," IEE Electron. Lett., vol.37, no.11, pp.703-704, May. 2001.
- 25 K. Ema, N. Kagi, F. Shimizu, "Optical compression using a monochromator and a concave mirror," Opt. Commun., 71, p.103, 1989.
- 26 T. Konishi and Y. Ichioka, "Ultra-fast image transmission by optical time-to-2-D-space-to-time-to-2-D-space conversion," J. Opt. Soc. Am. A, vol.16, p.1076, 1999.
- 27 F. Mok, "Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate," Opt. Lett., 18, p.915, 1993.
- 28 A.Weiner, D.Leaird, D.Reitze, E.Paek, "Spectrl holography of shaped femtosecond pulses," Opt. Lett., 17, p.224, 1992.



和田尚也

基礎先端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)
光通信ネットワーク、光パケットスイッチング、光ノード技術