

フォトニックネットワークにおける高速光ラベルルーティング処理用光集積回路に関する研究

代表研究者 後藤 信夫 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (工学部光応用工学科)
 共同研究者 柳谷 伸一郎 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部 (工学部光応用工学科)

1 はじめに

将来のフォトニックネットワークとして高速ルーティングが可能な光ラベルルーティングシステムが期待されている。ルータにおける光ラベル処理の主要要素として、ラベル分離、ラベル識別、ラベル書換えなどが挙げられる。ラベル識別として、これまで研究されている多くは単一ラベルに対する符号マッチングによる識別に関するもので種々の方式が提案され実験的に検証されている。しかし、ルーティングには入力された光パケットの全てのラベルを識別あるいは分類することが有用となる。本研究では、すべてのラベルに対して識別処理あるいは分類処理を光学的に行う光集積回路およびスイッチングシステムの構築を目的としている。とくに、光パルスのスペクトル、強度、位相情報を用いた全光ルーティングシステムの検討を行った。また、時間的およびスペクトル的な処理を組み合わせることにより、階層的なネットワーク制御、ルーティング制御への応用が可能となる。また、ラベル識別に加え、光バッファシステム、バーストネットワークにおける制御プロトコルについても研究を行った。本報告では、主としてラベル処理用光集積回路および光情報処理システムに関して研究した結果をまとめる。

2 光ラベル識別用光集積回路

2-1 コリニア音響光学素子による光ラベル識別

(1) 階層型ラベル構成と認識回路

M階層のアドレスに対応する符号mを

$$\mathbf{C}_{code}^m = (C_{L1}^m, C_{L2}^m, \dots, C_{LM}^m) = (\mathbf{c}_1^m, \mathbf{c}_2^m, \dots, \mathbf{c}_{MN_i}^m) \quad (1)$$

で表す。ここで C_{Li}^m は第*i*層におけるルーティング用符号を示す。光ラベル全体の構成を図1に示す。各層のルーティング符号はパルス間隔 Δt_p の N_i 個のパルスからなり、各パルスは N_λ の波長で多重化されている。ただし、各層毎に異なる波長群を用い、第*i*層の符号は $\lambda_{i,j}$ ($j=1, \dots, N_\lambda$)の波長成分からなる。 M 層のルーティング用符号の前に識別用にM個のパルスを考える。識別用パルスの間隔は $N_i \Delta t_p$ である。ルーティングのための符号 \mathbf{C}_{code}^m に識別ビットを加えて、符号mに対するラベル全体 \mathbf{C}_{label}^m は

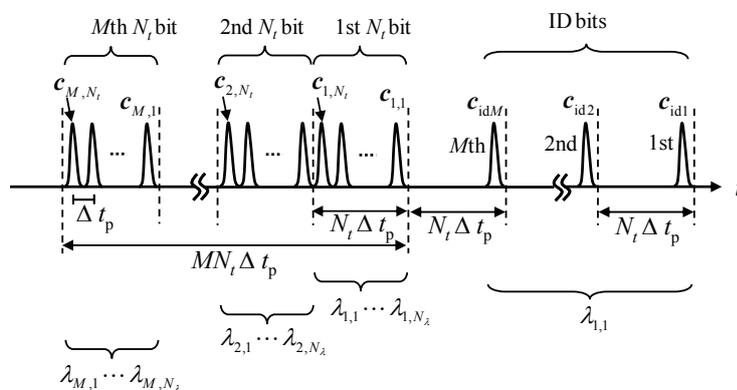


図1 階層型光ルーティング用ラベルの構成

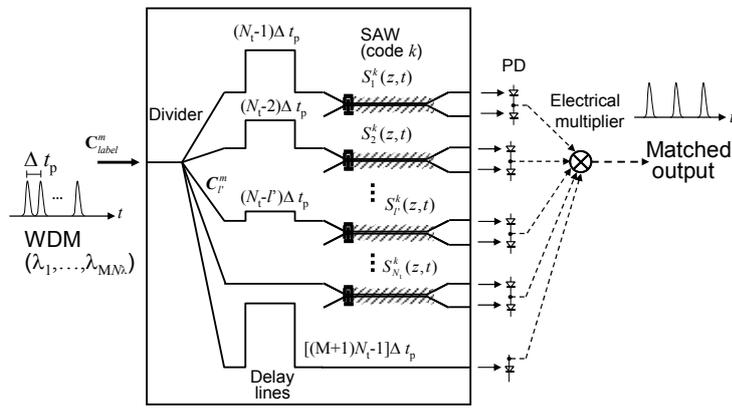


図2 ラベル識別処理回路の構成

$$\mathbf{C}_{label}^m = (C_{id}^m, C_{L1}^m, C_{L2}^m, \dots, C_{LM}^m) \quad (2)$$

と表される。ここで、識別パルス列は

$$C_{id}^m = (c_{id,1}, 0, \dots, 0, c_{id,2}, 0, \dots, 0, c_{id,M}, 0, \dots, 0) \quad (3)$$

各識別ビットは

$$c_{id,n} = (1, 0, \dots, 0)^t, \quad (n=1, \dots, M) \quad (4)$$

である。符号を表す各ビットは各層で異なるWDM成分からなるものとする。

ラベル識別回路の構成を図2に示す。 N_i 個のコリニアA0スイッチと光遅延導波路、光検出器、電氣的マルチプライヤから構成され、波長多重化された N_i ビットの符号に関して弾性表面波 (SAW) で表現された符号とのマッチングを行う。A0スイッチで識別する符号を k とすると、 l 番目のA0スイッチには符号 $c_{n,l}^k$ ($n=1, \dots, M$, $i=1, \dots, N_i$) 対応する周波数多重SAWがロードされている。各A0スイッチからの出力は差動検出された後、その電氣的出力パルス列はマルチプライヤにより処理されマッチング信号を含むパルス列が出力される。SAWとして $n=j$ に対応するSAWのみを印加すれば第 j 番目の層のラベルが識別できる。 $n=1, \dots, M$ の全てに対応するSAWを印加すれば、全ての層のラベルが識別できる。SAWは識別すべき任意の符号に対して時間的に一定の信号でよく、また、電気処理としてO/E変換とマルチプライヤのみであるため高速な処理が実現できる。

このシステムでは光パルス列で表された符号と並列なSAWで表された符号との相関出力が得られる時刻のパルスのみを識別パルスで取り出している。

(2) シミュレーションによる認識特性評価

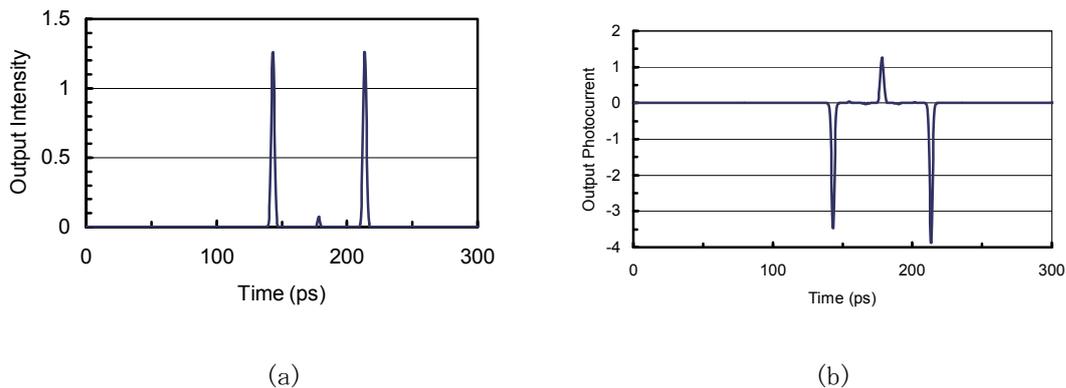


図3 Multiplierからの出力の電流信号例 (a) 第2層の符号が一致しない場合、(b) 第2層のラベルに対してのみラベル一致を調べる場合

$M=3$ の場合における入出力特性をコリニアA0スイッチの波長依存性を考慮して特性評価を行う。光パルスのビットレートが高く、パルス幅が小さくなると、広い周波数成分を含んだパルスとなる。パルス幅が小さ

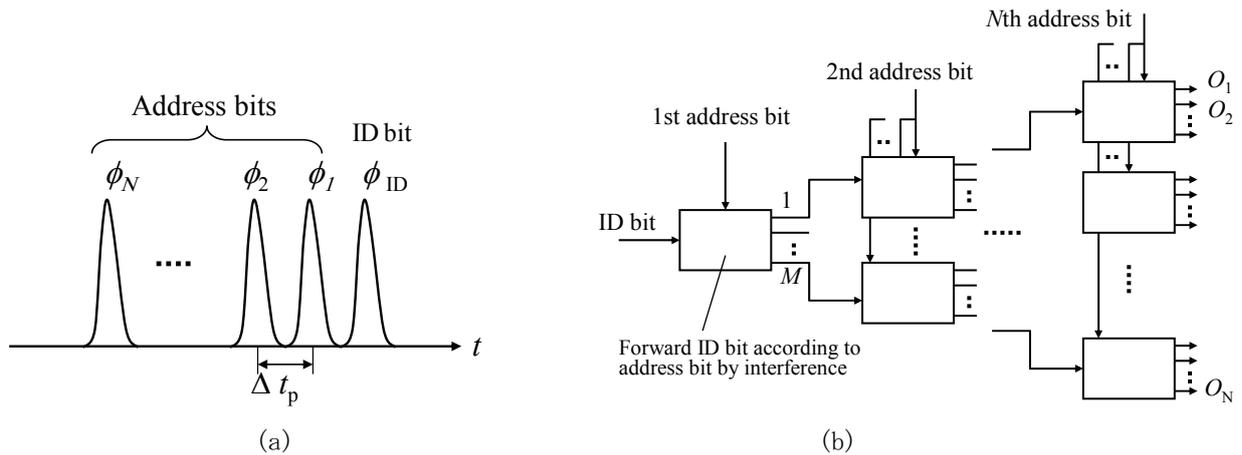


図4 (a) PSK 符号ラベルの構成および(b)識別回路の基本構成

くなるほど帯域は広がり、スイッチングの波長依存性であるフィルタリング特性の影響を大きく受ける。光パルス列として、パルス周期12ps、 $M=3$ 、 $N_I=3$ のパルス列を考える。各層のラベルの波長多重数は $N_\lambda=3$ とする。また、コリニアA0素子の相互作用長を $l_{SW}=16\text{mm}$ と仮定する。3層の全ての部分ラベルを認識する場合を考える。第2層のラベルが不一致のとき図3(a)に示すような出力が得られる。

次に、第2層目のラベルの識別においてラベルが不一致の場合を調べる。上記と同様な光ラベルが入射した場合、出力電流は(b)に示すようになる。

2-2 受動光回路による PSK 符号ラベルの認識

(1) ラベル構成と基本原理

上述の回路は光スイッチにより並列処理するものであるが、ラベル認識を受動光導波回路での実現を検討する。また、上述の手法は1つのラベルのマッチングを調べるものであるが、ここでは、ラベルに対応する出力ポートから光パルスを出力することにより認識する方法を考える。

光ラベルは単一波長の PSK パルス列であり、図4(a)に示すようにアドレスを表す N ビットの直前の1ビットの識別ビットからなる。ラベル認識の原理は(b)に示すように ID ビットをアドレスビットとの干渉を利用してアドレスに対応する出力ポートに導いていく手法である。時系列であるアドレスはシリアル・パラレル変換する方法、パルス間隔ずつ遅延したパルス列をもちいる方法が考えられる。後者の場合は時間ゲートによって前者と等価な処理も可能となる。

(2) BPSK および QPSK ラベル識別基本回路

BPSK 光ラベルに対する識別回路では1つの非対称X結合器が図4(b)の四角枠の回路となる。非対称X結合器では一方の導波路からのみ光が入射したとき、2つに分岐されるが位相が π だけ異なる。2ビットのBPSK符号の識別回路を図5に示す。符号が $\phi_1=\pi$ 、 $\phi_2=0$ の場合の光波伝搬をBPMで解析した結果を図6に示す。理論値とほぼ

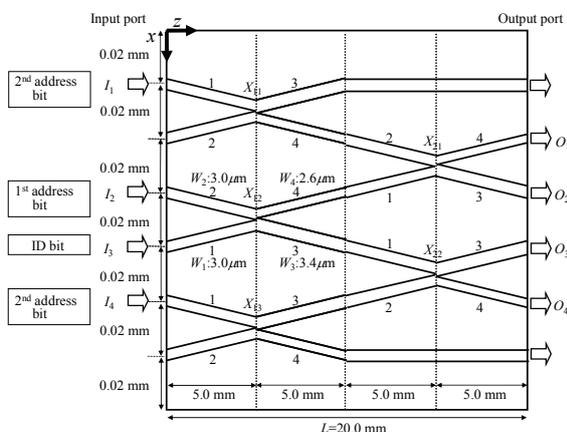


図5 BPSK 符号ラベル識別回路 (2 ビットアドレス)

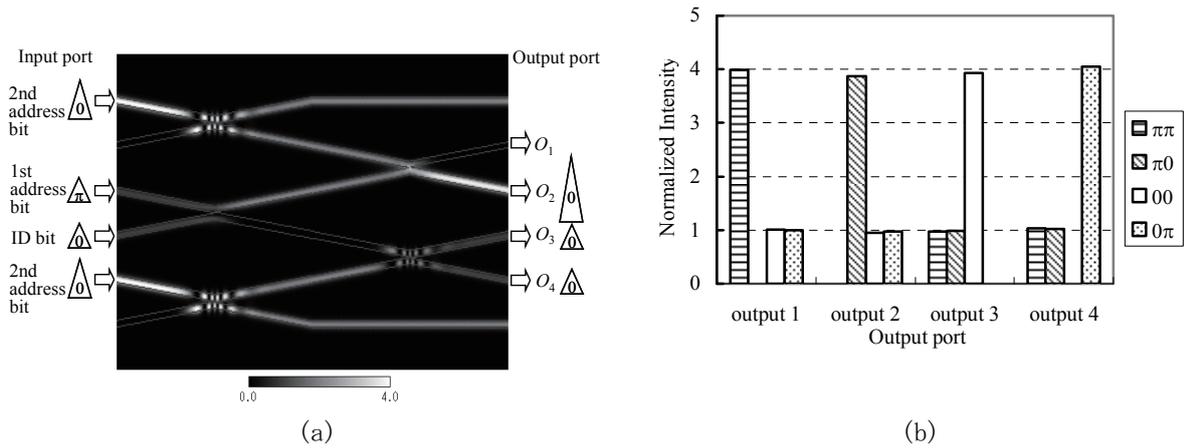


図6 BPSK 符号ラベル識別回路のBPM シミュレーション結果

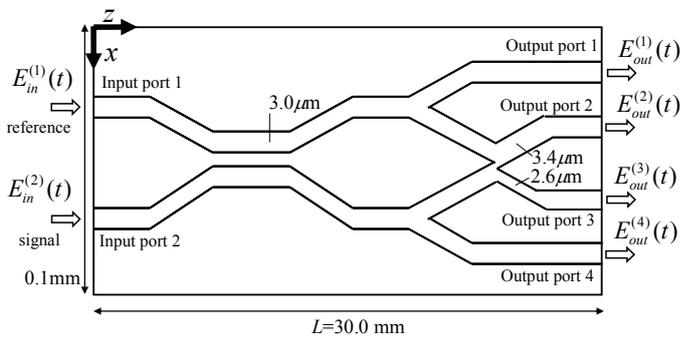


図7 QPSK 符号ラベル識別回路 (1 ビットアドレス)

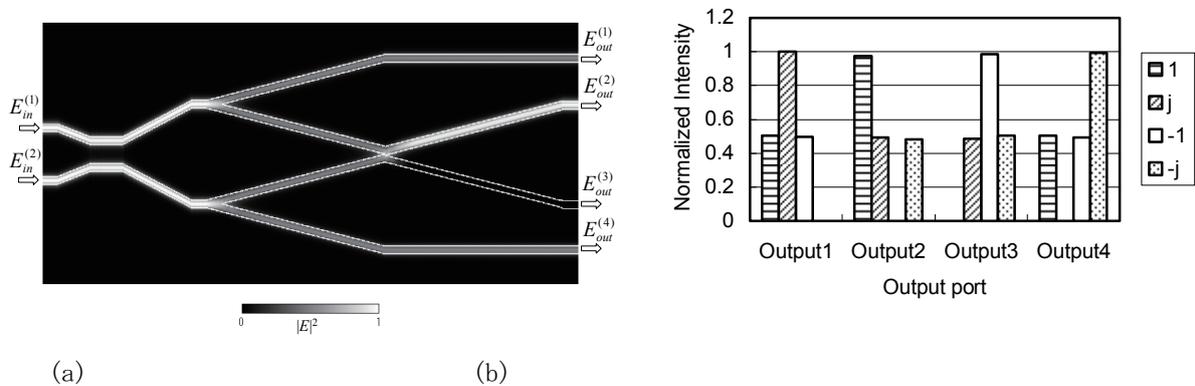


図8 QPSK 符号ラベル識別回路のBPM シミュレーション結果

一致している結果が得られている。

QPSK光ラベルに対する識別回路では1ビットの位相認識の回路が図7に示すように3dB方向性結合器、Y分岐および非対称X結合器からなる。3dB方向性結合器では一方のみに光が入射したとき、2つに分岐されるが位相が $\pi/2$ だけ異なる。よって非対称X結合器と組み合わせることによりQPSK符号の位相を識別可能となる。符号が $\phi_1 = \pi/2$ の場合の光波伝搬をBPMで解析した結果を図8に示す。理論値とほぼ一致している結果が得られている。

2-3 複素ニューラルネットワークによる識別回路

(1) 回路構成

複素ニューラルネットワーク (NN) とは、複素数で表される情報を処理する、複素数のパラメータや変

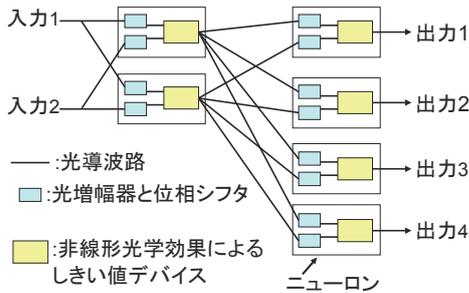


図9 複素 NN によるラベル処理回路

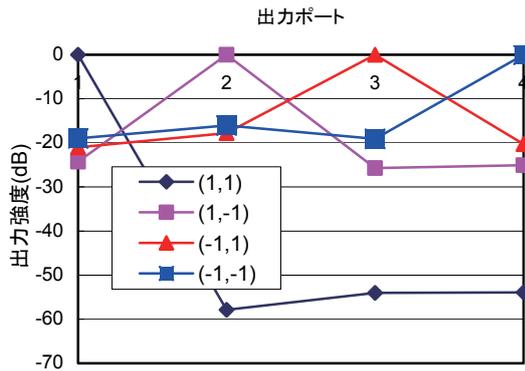


図10 2ビットラベル識別の出力結果

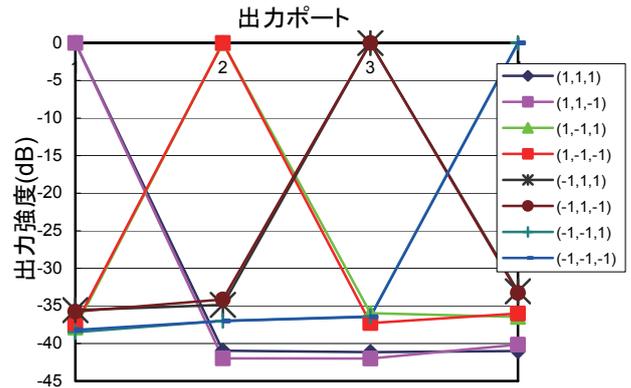


図11 3ビットラベル分類の出力結果

数を持つ NN であり、振幅と位相情報を有する光波処理に適している。前述の BPSK 及び QPSK 符号の信号のパッシブな導波路回路による識別では、全ての符号がラベルに使われるとき、識別特性の向上にはしきい値の後処理が必要になる。ラベル処理に非線形処理を用いることによって、しきい値処理は不用になる。この非線形処理として、複素 NN が有効となる。複素 NN を用いた光ラベル処理回路を図9に示す。入力光ラベルは BPSK 符号で表され、シリアル-パラレル変換されているものと仮定する。ニューロンに対応する回路は光増幅器または強度変調器、位相変調器及びしきい値処理用非線形素子からなる。各入力ラベルに対して、ラベル情報を識別するだけでなく、経路表に従って出力ポートを見出すなど、回路パラメータを学習により目的に応じて設定することが可能となる。すなわち、本研究では複素 NN によってラベルをグループに分類し、グループを表すポートに出力させることを目指す。

重み係数を定める学習には最急降下法を用いた。最急降下法は、多数パラメータを持つ系を最適化するために偏微分を使ってパラメータが変化すべき方向を算出して利用する方法である。しきい値処理には、複素数振幅のみ変化させるシグモイド関数を用いた。

(2) シミュレーション結果

図10に2ビット符号に対するラベル識別、図11に3ビット符号に対するラベルグループ分けのシミュレーション結果を示す。図10では、目的出力ポートと他のポートとの強度差が16dB以上であることを示している。図11では、強度差が33dB以上であることを示している。

3. 時空間変換によるラベル認識システム

3-1 識別システムと原理

提案システムを図12に示す。2相変調 (BPSK) パルス列の回折格子による時空間変換は、時間とともに変化する独特のパターンを生み出す。回折された光パターンは、レンズ1によってx方向に空間的にフーリエ変換されたものである。イメージパターン $E^{in-fil}(x,t)$ は時間 t の関数で、y方向でほとんど一様に分布すると仮定する。空間フィルタとして $H(x,y)=E^{in-fil*}(x,ay)$ を使用する (a は定数)。フィルタを通過したイメージ $E^{out-fil}(x,y,t)$ は、レンズ2でx方向にフーリエ変換された後、空間的にx方向に狭いスリットを通過する。2

つの円筒形のレンズ、空間フィルタ、スリットからなるシステムは Vander Lugt の相関器とみなされる。自己相関パターンはスリットを通過するが、相互相関パターンはスリットにブロックされる。自己相関信号が

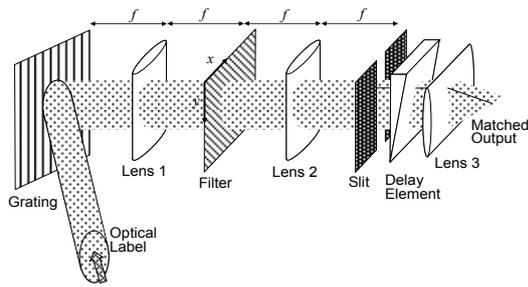


図 12 二次元フィルタを用いたラベル識別システム

y 方向に沿って異なる時刻に得られるので、遅延補正のための遅延素子をスリットの後に置く。遅延時間は位置 y と比例している。遅延素子通過後の自己相関イメージパターンには y 方向に沿って同じ位相であるため、イメージはレンズ 3 の y 方向の空間フーリエ変換により焦点に収束する。入射ラベルがフィルタと一致するとき強い出力が得られる。

3-2. シミュレーション結果

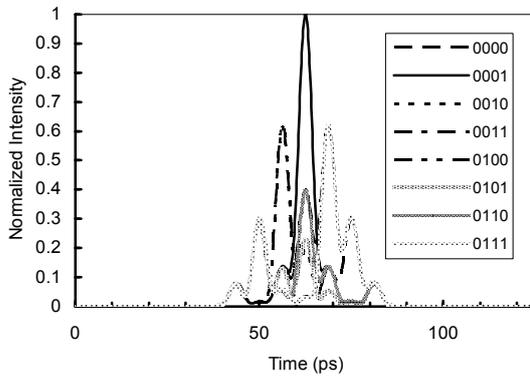


図 13 フィルタ「0001」における出力光強度分布

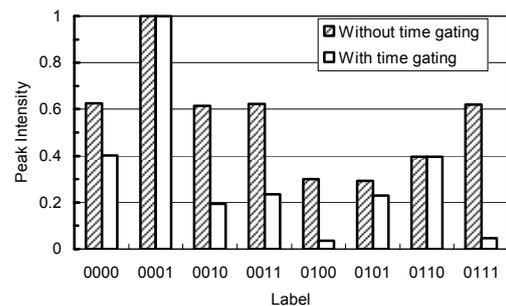


図 14 時間ゲート有無によるピーク強度の変化

コンピュータシミュレーションによって提案したラベル識別システムの性能を調べた。入射ラベルは波長 1550nm の 4 ビット BPSK 符号、パルスは FWHM 3.125 ps のビットレート 160 Gbps、入射ビーム幅は 10mm、回折格子は 600lp/mm、すべてのレンズの焦点距離は 500mm である。また、x,y 方向に 200mm の解析空間と 62.5ps の解析時間でシミュレーションを行なった。入射パルス列の符号「0」と「1」は位相「0」と「 π 」に対応する。図 13 に、フィルタ「0001」に対する 8 種類の入射ラベルについて時間と出力強度の関係を示す。

「0」と「1」の反転した符号は同じ出力となるため半数の符号を考慮している相互相関の最大強度が 0.62 であるので、フィルタに対応するラベル「0001」は識別可能である。さらに、時間ゲートを使用することによって相互相関の最大強度を 0.40 まで抑えることができる(図 14)。他のラベル識別フィルタでも類似した性能を確認した。提案したシステムでは、空間領域だけでなく時間領域でも相関処理を行うため、ビット数がより多い光ラベルでも識別が可能である。

4. まとめ

フォトニックルーティングにおける基本機能の一つである光ラベル処理に関する検討結果をまとめた。これまで、主として光集積回路および光システムの提案とコンピュータシミュレーションによる検証を行ってきた。現在、実験的な検証の準備を行っている。

【参考文献】

- [1] D. J. Blumenthal, B. E. Olsson, G. Rossi, T. E. Dimmich, L. Rau, M. Masanovic, O. Lavrova, R. Doshi, O. Jerphagnon, J. E. Bowers, V. Kaman, L. A. Coldren, J. Barton, "All-Optical label swapping networks and technologies," J. Lightw. Technol., vol.~18, no.~12, pp.~2058-2075, Dec. 2000.
- [2] K. Kitayama, N. Wada, and H. Sotobayashi, "Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation," J. Lightw. Technol., vol.18, no.12, pp.1834-1844, Dec. 2000.
- [3] K. Takiguchi, T. Shibata, and M. Itoh, "Encoder/decoder on planar lightwave circuit for time-spreading/wavelength-hopping optical CDMA," Electron. Lett., vol.38, no.10, pp.469-470, May 2002.
- [4] O. Moriwaki, T. Kitoh, T. Sakamoto, and A. Okada, "Novel PLC-based optical correlator for multiple phase-modulated labels," IEEE Photon. Technol. Lett., vol.17, no.2, pp.489-491, Feb.2005.
- [5] G.Cincotti, "Full optical encoders/decoders for photonic IP routers," J. Lightw. Technol., vol.22, no.2, pp.337-342, Feb.2004.
- [6] J. Kurumida, H. Uenohara, and K. Kobayashi, "All-optical label recognition for time-domain signal using multistage switching scheme based on SOA-MZIs," Electron. Lett., vol.42, no.23, pp.1362-1363, Nov.2006.

(注書き) 紙面の都合により, 本研究成果報告は, 焦点を絞って記述している. 詳しい研究成果は, 下記の発表資料のとおりである.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Waveguide-Type Optical Circuit for Recognition of Optical QPSK Coded Labels in Photonic Router	Journal of Lightwave Technology, Vol.27, No.1, pp.60-67	Jan. 2009
Photonic Label Recognition by Time-Space Conversion and Two-Dimensional Spatial Filtering with Delay Compensation	Journal of Lightwave Technology, Vol.27 (to be published)	2009
Recognition of Wavelength-Multiplexed Hierarchical Label with Acousto-optic Waveguide Circuit	Jpn. J. Appl. Phys., Vol.48, No.7 (to be published)	July 2009
Proposal of Waveguide-Type Optical Circuit for Recognition of Optical QPSK Coded Labels in Photonic Router	OECC/ACOFT 2008, Sydney, ThK-1	July 2008
All-Optical Label Recognition and Classification Using Complex-Valued Neural Network	OECC/ACOFT 2008, Sydney, ThK-3	July 2008
Recognition of Hierarchical Label with Acousto-optic Processor for Photonic Router	Int. Conference on Photonics in Switching 2008 (PS2008), Sapporo, P-23	Aug. 2008
Optical Multiple-Wavelength BPSK Label Recognition with Self-Routing Waveguide-Circuit	The 7th Int. Conf. on Optical Internet (COIN2008), Akihabara, Tokyo, C-16-PM1-2-5	Oct. 2008
Photonic Label Recognition by Time-Space Conversion and Two-Dimensional Filtering with Delay Compensation	Int. Topical Meeting in Information Photonics (IP2008), Awaji, Hyogo, P1-24	Nov. 2008
Waveguide-Type Optical Circuit for Multi-Bit Address Recognition of Optical QPSK Labels in Photonic Router	The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Newport Beach, CA, WD2	Nov. 2008
Autonomous Buffering with All-Optical Manager Using Output-Packet Sensing	The 21st Annual Meeting of The IEEE Lasers & Electro-Optics Society, Newport Beach, CA, WD5	Nov. 2008
Recognition of Wavelength-multiplexed Labels with Acousto-optic Waveguide Circuit for Hierarchical Photonic Routing	Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS2009), Beijing, 4A4-5	Mar. 2009

All-Optical Wavelength-Selective Switch Controlled by Raman Amplification for Wide Wavelength Range	The 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2009), Hong Kong	July 2009
avelength Dependence of Waveguide-Type Optical Circuit for Recognition of Optical QPSK Labels in Photonic Router	The 14th OptoElectronics and Communications Conference (OECC2009), Hong Kong	July 2009
Nonlinear optical and ellipsometric studies of manganese-phthalocyanine thin films	SPIE Photonic Devices + Applications, San Diego, 7413-24	Aug. 2009