

アレイ導波路格子を用いたマルチポート光波シンセサイザ による光スペクトル多重処理

杜塚 芙美¹, 駒井 友紀¹, 安西志摩子¹, 和田 尚也², 宮崎 哲弥², 小舘香椎子¹

¹日本女子大学理学研究科 数理・物性構造科学専攻

²独立行政法人 情報通信研究機構 第1研究部門 新世代ネットワーク研究センター
超高速フォトリックネットワークグループ

(2006年11月20日受理)

要 旨 超高速・大容量な情報通信ネットワークを実現するために、電気処理に依存していた転送処理部分に光技術を導入したフォトリックネットワークの研究開発が盛んに行なわれている。転送処理部分における光信号処理では超高速性、拡張性を兼ね合わせた革新的な光機能デバイスの開発が不可欠である。本研究室では光波の強度・位相・波長を一括制御可能なアレイ導波路格子 (Arrayed waveguide grating: AWG) を用いたマルチポート光波シンセサイザ (Optical spectrum synthesizer: OSS) を提案・構築した。このデバイスは、フーリエ変換を用いたスペクトル領域における光パルス整形の原理に基づいており、これまでに困難であった高分解能スペクトルの強度・位相の独立制御を可能にした。また、光の多重性を利用することにより1台のOSSで複数ラベルの同時処理を可能にし、多重処理可能な可変デバイスを実現した。この特性を利用し、光パケットスイッチング (Optical packet switching: OPS) や光符号分割方式 (Optical code division multiple access: OCDMA) への応用が期待される光ラベル処理への適用を行なった。本論文では光多重ラベル処理の原理確認として光符号・復号化と光符号分割多重をシミュレーションと実験により実証したので報告する。

キーワード: フォトリックネットワーク, 光波シンセサイザ (Optical spectrum synthesizer: OSS), アレイ導波路格子 (Arrayed waveguide grating: AWG), 光パケットスイッチング (Optical packet switching: OPS), 光符号分割多重 (Optical code division multiple access: OCDMA), 光パルス整形, 光多重ラベル処理

1. はじめに

近年、インターネットによる大容量コンテンツサービスの進展に伴い、情報通信量は年率2倍で急速に増大し続けている。現在の基幹光ネットワークでは、約1 Tbpsのネットワークが実用化されているが、増大し続ける情報通信量のニーズに対応するため、大容量伝送の研究が進められており、実験段階では14 Tbpsデータの160 km伝送が報告されている¹⁾。伝送容量の増加により、データの転送処理部分においても高速化が不可欠となる。そこで従来電気処理が行なわれている転送処理部分において、光技術を導入することにより、消費電力の削減や、シンプルかつ超高速なシステムの構築に繋がる見込みが

あるため、フォトリックネットワークの実現に向けた研究開発が盛んに行なわれている。転送処理部分においては光信号処理が重要となっており、特に超高速性、拡張性を兼ね合わせた革新的な光機能デバイスの開発が不可欠である。

本研究室では従来技術の未開拓領域における光の極限利用と光波マルチプロセッシング技術の実現のために、光の特性と利点を取り入れた位相の制御、分散の補正や時間・周波数情報の大容量一括処理を行なう新しい多重光機能システムの研究開発を進めている²⁾。また、本研究室では光の回折現象を利用し、小型・複合化・量産性に優れた回折光学素子に関する基礎研究が長年培われており、マルチレベルゾンプレータを用いた光スイッチングモジュール³⁾や角度多重ホログラム (Angular multiplexed optical spectrum hologram: AMASH) を

Contribution No.: MP 06-4

用いたラベルプロセッサ⁴⁾などの光機能デバイスの開発によりフォトニックネットワーク用信号処理への応用も行われている。この実績を基に、合分波器としても利用されている回折格子の一種である AWG を用いた OSS の提案を行ない、光信号処理のキーテクノロジーとなっている光ラベル処理への適用に向けて検討を進めている。

光ラベル処理は光信号の符号・復号化の原理により行なわれ、OPS や OCDMA へ応用することができることから、キーテクノロジーとして近年盛んに研究が行なわれている。従来の光パス方式では回線を占有してしまう

のに対し、OPS はデータをパケットの単位で送るため、データの粒度が細かく拡張性の高い転送方式として実現が期待されている。Fig. 1 (a) に OPS の構成を示す。光パケットはデータとヘッダ部分に宛先を示す符号化された光ラベルから構成される。OPS はルーティング、ラベル処理、スイッチング、スケジューリング、バッファリングの 5 つの機能に分けることができ、ラベル処理では光ラベルを認識し、出力ポートの決定を行なう。一方、OCDMA は各チャネルのデータの各ビットをさらに細かいパルス列で構成される光符号によって各チャネル異なる符号で符号化を行なう多重化の手法である。Fig. 1 (b) に OCDMA の構成を示す。各チャネルのデータを符号器により符号化、多重化し、伝送したデータは復号器により復号化し、各チャネルに識別・分離する。

このような光ラベル処理を行なうための光機能デバイスとして、時間拡散により時間領域での符号化を行う平面光導波路⁵⁾、超格子構造ファイバブラッググレーティング⁶⁾、スペクトル領域符号化として時空間変換によるスペクトル領域でのパルス整形の原理に基づいた空間光変調器 (Spatial light modulator: SLM) と回折格子を用いたフリースペース型⁷⁻⁹⁾などの提案・実証が行なわれてきている。これらの光ラベル処理用デバイスでは、1 つの光ラベルに対し、1 つのデバイスが必要となるため、多数の光ラベルを処理する際には装置の大きさや消費電力が課題として挙げられる。課題を解決するため、本研究室では時空間変換に基づくフリースペース型の AMASH を用いた光ラベル処理の提案により、5 多重のラベル処理まで実証している (Table 1 (a))⁴⁾。また、時間拡散によるラベル処理デバイスとして高い自己・相互相関比を持つ AWG 型符号・復号器も提案されており、16 多重のラベル処理の実証が行なわれている (Table 1 (b))^{10, 11)}。しかし、多重処理可能な可変デバイスの提案は未だされていない。本研究ではフーリエ変換を用いたスペクトル領域におけるパルス整形の原理に基づき、多

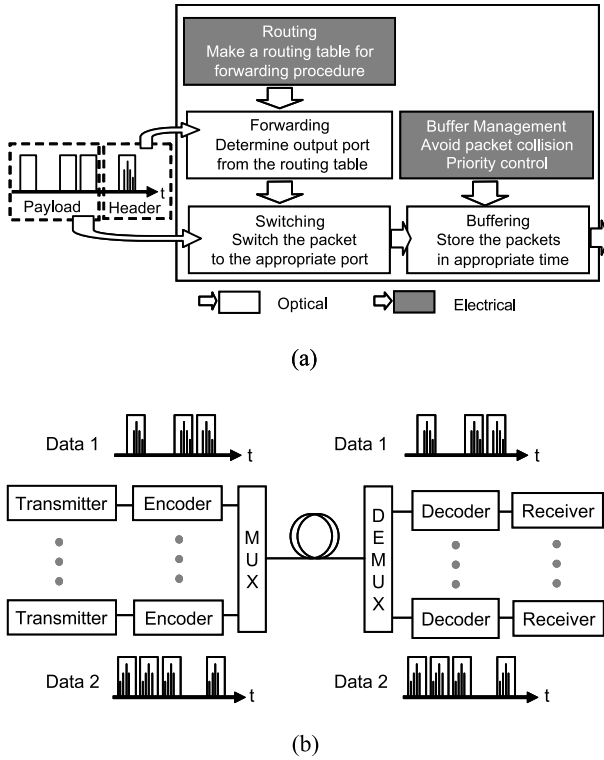


Fig. 1. Optical label processing.

- (a) Optical packet switching.
(b) Optical code division multiple access.

Table 1. Optical devices for multiplexed optical label processing

(a) Angular Multiplexed Spectral Hologram (AMSH)	(b) Arrayed waveguide grating (AWG) Configuration
<p>5 labels</p>	<p>16 labels</p>

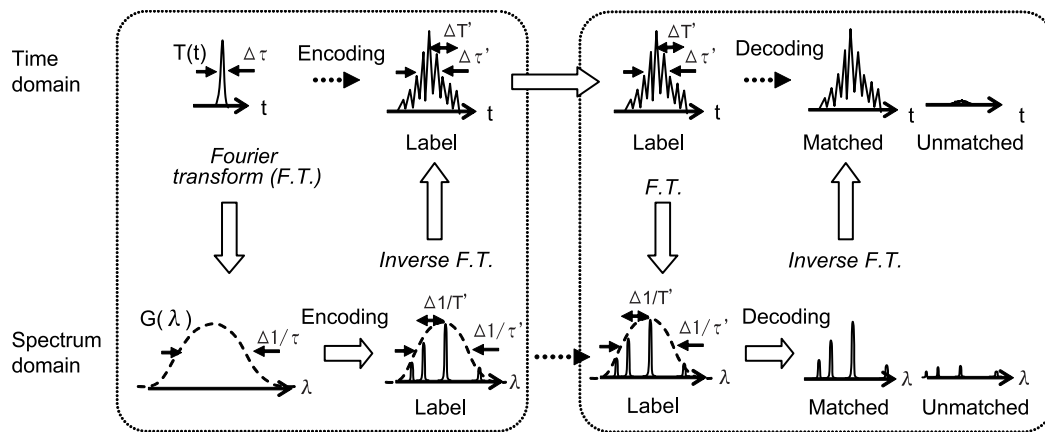


Fig. 2. Optical en/decoding in spectrum domain.

重処理可能な可変デバイスである AWG を用いたマルチポート OSS の提案と光多重ラベル処理に向けた検討を行なったので報告する。

本論文では、第2章でフーリエ変換を用いたスペクトル領域におけるパルス整形の原理を述べる。第3章ではAWGのフーリエ変換機能によるパルス整形の原理と今回新たに提案を行なったマルチポートOSSの原理について述べる。第4章ではマルチポートOSSによる光多重ラベル処理の原理と光符号・復号化の実験により得られた結果を記述し、第5章で得られた成果についてまとめる。

2. フーリエ変換を用いたスペクトル領域におけるパルス整形

時間波形とスペクトル波形はフーリエ変換により逆数の関係にあり、パルス間隔はスペクトル成分の各縦モードの間隔、パルスの包絡線の半値幅はスペクトルの包絡線の半値幅に対応している。スペクトルの各モードの強度・位相を制御することで、モード間隔や包絡線が変化し、パルスの間隔や包絡線、位相状態などを任意に整形することが出来る。そのため、時間軸上で直接制御することが困難な超高速光パルスに対して高精度なパルス制御が可能となる。この原理を基に、スペクトル領域における光ラベルの符号・復号化に適用することが出来る。スペクトル領域における光符号・復号化の原理を Fig. 2 に示す。パルスをフーリエ変換によりスペクトルへと変換し、スペクトル成分の各モードの強度または位相を制御し、符号化を行なう。符号化したスペクトルは逆フーリエ変換により符号化された光ラベルとして取り出される。同様にフーリエ変換したスペクトルの振幅または位相制御を行なうことにより、復号化を行い逆フーリエ変換することで符号ラベルが一致する場合には高い中心ピーク値をもつ信号が出力され、不一致の場合には低い出力となる。

スペクトル領域における光パルス整形技術は、1988年 Weiner らが周波数面上に空間フィルタをおくことにより、実時間で光パルス整形を実証したことから確立された技術である。スペクトル領域での符号・符号化の手法としては、回折格子、レンズと SLM を組み合わせた手法⁷⁻⁹⁾ AWG のフーリエ変換機能を用いて、得られた周波数分布を SLM で変調する手法¹²⁾ などが検討されている。しかし、これらの手法では変調するスペクトル分布の空間分解能が SLM の画素サイズに依存し、スペクトルの各成分の振幅と位相を独立に制御できない。また、最大の課題は多重処理が出来ない点にある。本研究室ではこの課題を解決するため、高分解能 AWG の各出力チャンネルに導波路型の変振幅減衰器と可変位相シフタを設置することにより、各スペクトル成分の振幅と位相を独立かつ任意に制御可能な OSS の提案・試作を行なっている。また、光の多重性を利用することにより光信号の多重処理の実現が可能となる。

3. 光波シンセサイザによるパルス整形の原理

3-1. AWG 光波シンセサイザの構成と原理

OSS は光サーキュレータ, AWG, AWG の各チャネル導波路上に可変振幅減衰器 (Variable optical attenuator:

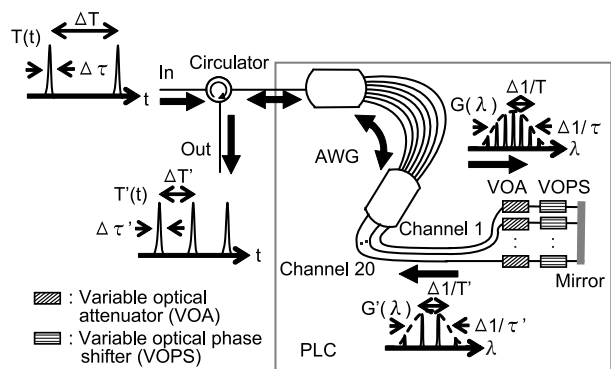


Fig. 3. Configuration of optical spectrum synthesizer.

VOA) と可変位相シフタ (Variable optical phase shifter: VOPS), ミラーが一体化された構成となっている (Fig. 3) ¹³⁾。AWG は入出力ポート, 2つのスラブ導波路と長さが ΔL ずつ異なるアレイ導波路群, チャネル導波路から構成され, フーリエ変換および波長合分波機能を有する。Mach-Zehnder 型 VOA および VOPS は熱光学効果に基づいており, 導波路上の薄膜ヒータに電流を印加することにより導波路の屈折率・光の位相が変化し, 光の強度・位相を制御することができる。電流は外部コンピュータから制御でき, 制御時間はヒータの制御時間に依存し, 約 3 ms である。また, 光の強度は約 20 dB, 位相は $0 \sim 2\pi$ まで任意に制御可能である。この構成により, 各光スペクトル成分の強度と位相を独立かつ任意に制御することができる。また, OSS には PLC 回路の温度安定化のためにペルチェ素子および温度センサを組み込んでモジュール化しており, 温度コントローラを調整することにより AWG の使用中心波長の微調整が可能である。

光パルスを OSS の入出力ポートに入力すると, AWG によりフーリエ変換されスペクトルへと変換される。各チャネル導波路からは各スペクトル成分が出力され, 各スペクトル成分の強度・位相を VOA, VOPS を用いて任意に制御を加え, ミラーで反射され AWG により逆フーリエ変換され整形された光パルスが光サーキュレータから取り出される。提案した OSS は高分解能かつスペクトル成分の強度・位相を独立制御可能であり, 可変性と高精度制御を兼ね備えたデバイスである。

試作した OSS (入出力ポート数: 1, チャネル数: 32, チャネル間隔: 19.9 GHz, 中心波長: 1552.524 nm) を用いて, 19.9 GHz の光パルス列から最大 160 GHz までの Return-to-zero パルス整形を行い, キャリア圧縮 Return-to-zero パルス列についても同様に 160 GHz 周期のパルス列を整形した。また, 歪みを含んだパルスの第 2 高調波相関測定で $\Delta = 5.458$ ps のパルス列を, $\Delta = 3.286$ ps のパルス列へ整形することや, スペクトル領域マッチトフィルタリングの実証を行っている ^{14, 15)}。

3-2. マルチポート光波シンセサイザの原理

多重信号処理を行なうために, 新たに提案したマルチポート OSS を Fig. 4 に示す。OSS に使用している AWG の設計パラメータは入出力ポート数 20, チャネル数 20, チャネル間隔 10 GHz, 中心波長 1552.524 nm である ¹⁶⁾。マルチポート OSS は周回性 AWG を用いた複数入出力ポートを持つ OSS であり, どの入力ポートへ光を入力しても出力チャネル導波路から過不足なく全てのスペクトル成分が出力される特性をもつ。Table 2 に入出力ポート対出力チャネル波長相関表を示す。 $\lambda_1 \sim \lambda_{20}$ のスペクトル成分をもつ信号を中心ポートである 10 に入力す



Fig. 4. Photograph of multi-port optical spectrum synthesizer.

Table 2. Output spectrum components of Input ports V.S. output channels

Ch. Port	1	2	3	4	...	17	18	19	20
1	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	...	λ_8	λ_9	λ_{10}	λ_{11}
2	λ_{13}	λ_{14}	λ_{15}	λ_{16}	...	λ_9	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}
...		\vdots						\vdots	
8	λ_{19}	λ_{20}	λ_1	λ_2		λ_{15}	λ_{16}	λ_{17}	λ_{18}
9	λ_{20}	λ_1	λ_2	λ_3		λ_{16}	λ_{17}	λ_{18}	λ_{19}
10	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	...	λ_{17}	λ_{18}	λ_{19}	λ_{20}
11	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5		λ_{18}	λ_{19}	λ_{20}	λ_1
12	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6		λ_{19}	λ_{20}	λ_1	λ_2
...		\vdots						\vdots	
19	λ_{10}	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	...	λ_6	λ_7	λ_8	λ_9
20	λ_{11}	λ_{12}	λ_{13}	λ_{14}		λ_7	λ_8	λ_9	λ_{10}

ると, シングルポートと同様に各出力チャネルからは $\lambda_1 \sim \lambda_{20}$ の順でスペクトル成分が出力される。隣接ポートであるポート 11 に同じ信号を入力すると, 各出力チャネルにはポート 10 の場合に出力されるスペクトル成分から 1 つずつずれたスペクトル成分が出力される。このように, 入力ポートを変化させることにより出力チャネルから出力されるスペクトルはシフトする。これにより, 周回符号が生成可能となる。

4. マルチポート光波シンセサイザを用いた光符号ラベル処理

4-1. 光波シンセサイザを用いた光符号・復号化の原理

マルチポート OSS を用いた光多重符号・復号化の原理を Fig. 5 に示す。符号・復号器にマルチポート OSS を各 1 台ずつ使用し, 符号化した光ラベルを多重伝送し, 復号化により識別・分離を行なう。符号・復号化にはスペクトル強度符号を用いた。マルチポート OSS に設置している VOA を ON にした時は強度が減衰し 0 となり,

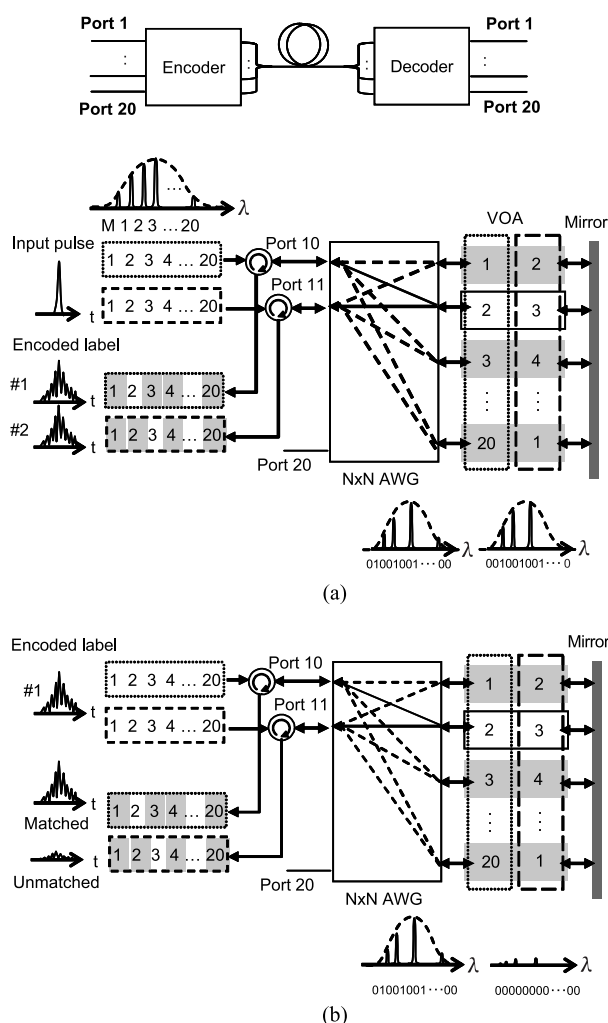


Fig. 5. Principle of multiple en/decoding using multi-port OSS.

- (a) Principle of encoding.
(b) Principle of decoding.

OFF の時は 1 の符号が与えられる。このように VOA は各スペクトル成分を制御するフィルタとして機能し、各スペクトルを 2 値の強度 0, 1 で符号を与える。また、VOA に与える符号のパターンは符号・復号化の場合も常に同じパターンに固定したまま用いた。

符号化では光パルスをマルチポート OSS の中心ポートのポート 10 に入力すると、各スペクトル成分は各チャネルから出力される。各スペクトル成分の強度を VOA により符号化を行い、光ラベルが出力ポートから出力される。隣接ポートのポート 11 に入力した場合には出力チャネルから出力されるスペクトルが 1 つシフトする。ここで、VOA での符号パターンは固定となっているため、ポート 10 の時に符号化されたスペクトルから 1 つシフトした符号化パターンとなり、異なる光ラベルが出力される。これにより 1 台のマルチポート OSS により、ポート数と同数の光ラベルが生成可能である。復号化で

は符号器によりポート 10 で符号化した光ラベルを復号器のポート 10 に入力すると、各出力チャネルからは同じスペクトル成分が出力され、同じ制御が加えられるため、出力される光ラベルは符号化と一致したものが出力される。一方、符号器によりポート 10 で符号化した光ラベルを復号器の他ポートに入力すると、VOA の符号パターンが符号化されたものとずれるため、いくつかのスペクトル成分はさらに減衰し、取り出される光ラベルは不一致となり低いピークの出力となる。このように符号器と同じポートに入力した際に一致する仕組みとなっており、光ラベルを認識することができる。

4-2. マルチポート光波シンセサイザを用いた光符号・復号化実験

この原理に基づき、光ラベルの符号・復号化を行なった。光符号・復号化の実験光学系を Fig. 6 に示す。光源には繰り返し周波数 10 GHz、パルス幅 2 ps のモード同期レーザ (Mode-locked laser diode: MLLD) を使用した。通常、符号・復号器としてマルチポート OSS を 1 台ずつ用いるが、今回試作したマルチポート OSS は 1 台のみであったため、OSS のポート 11 により符号化したラベルをポート 1 ~ 10 を用いて復号化を行なった。

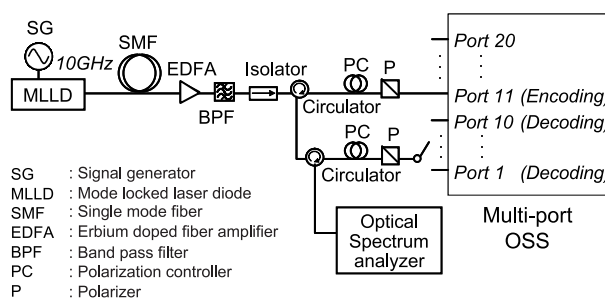


Fig. 6. Experimental set-up for optical en/decoding.

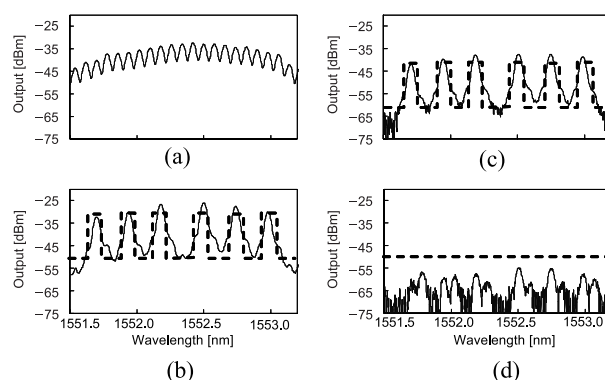


Fig. 7. Experimental result of optical spectrum en/decoding.

- (a) Input spectrum.
(b) Encoded spectrum.
(c) Matched decoded spectrum.
(d) Unmatched decoded spectrum.

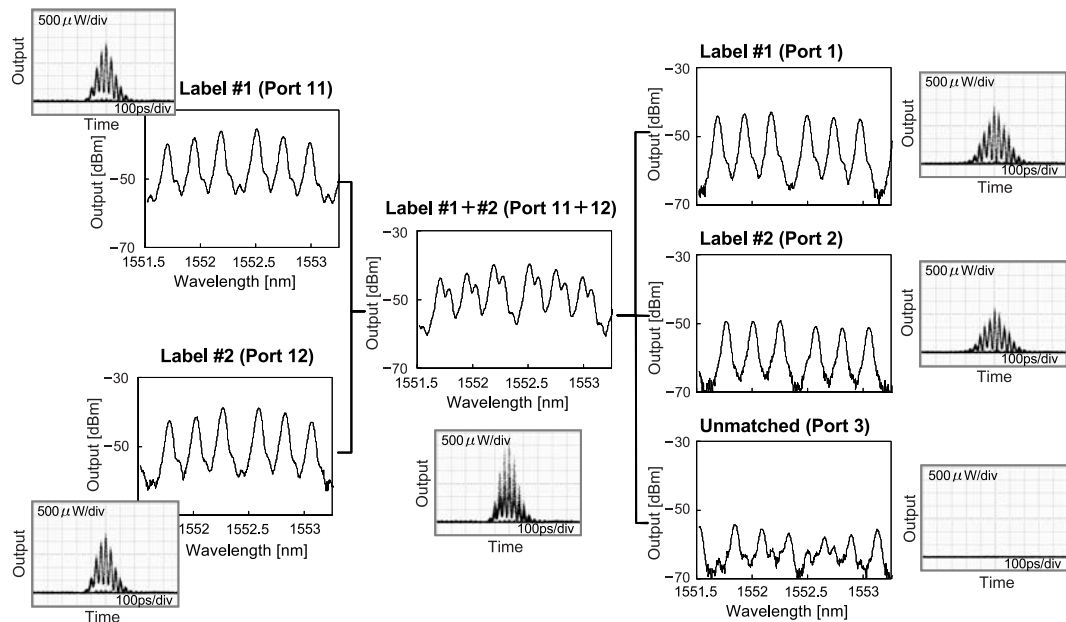


Fig. 10. Experimental results of OCDMA.

た。また、他のポートからは不一致符号となり、低い出力が得られた。この結果より、1台のマルチポート OSS を用いて、OCDMA を実証することに成功した^{18, 19)}。

5. ま と め

単一デバイスで多重処理可能な AWG と導波路型 VOA・VOPS を設置したチャネル間隔 10 GHz、ポート数 20 のマルチポート OSS を提案した。

光ラベル処理への適用として、1台のマルチポート OSS を用いた光符号・復号化を行ない、スペクトル領域において符号・復号化の良好な結果が得られた。また、応用として OCDMA を実験とシミュレーションによる検討を行なった。その結果、マルチポート OSS が光多重符号・復号器として適用可能であることを理論的にも実証した。今後はスペクトルの強度だけでなく位相制御の検討や、光符号・復号化の最適符号への検討を加える予定である。

本研究は日本女子大学と独立行政法人情報通信研究機構の共同研究で進めています。実験にご協力・ご助言を頂きました情報通信研究機構第 1 研究部門新世代ネットワーク研究センター超高速フォトリックネットワークグループの宮崎哲弥氏、和田尚也氏、他グループの皆様にご感謝いたします。また、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」の助成を受けて行なわれています。

参考文献

- 1) A. Sano, H. Masuda, Y. Kisaka, S. Aisawa, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Koga, K. Hagimoto, T. Yamada, T. Furuta, H. Fukuyama: *ECOC2006* Th4. 1. 1 (2006).
- 2) 小館香椎子, 駒井友紀, 和田尚也, 宮崎哲弥: 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「新世代光通信へのイノベーション」第 1 回公開シンポジウム平成 17 年度成果報告書. 55-59 (2006).
- 3) Y. Komai, K. Kodate, T. Kamiya: *Jpn. J. Appl. Phys.* **4** 4831 (2002).
- 4) N. Kawakami, K. Shimizu, N. Wada, F. Kubota, K. Kodate: *Opt. Rev.* **11** 2 126-131 (2004).
- 5) K. Kitayama, M. Maruta: *J. Lightwave Technol.* **21** 2753-2764 (2003).
- 6) X. Wang, N. Wada, T. Hamanaka, K. Kitayama: *OFC'05* PDP33 (2005).
- 7) C. Yang, W. Cong, F. Xue, V.J. Hernandez, R.P. Scott, J.P. Heritage, B.H. Kolner, Z. Ding, S.J. Yoo: *ECOC2006* Th3. 6. 4 (2006).
- 8) V.J. Hernandez, Y. Du, W. Cong, R.P. Scott, K. Li, J.P. Heritage, Z. Ding, B.H. Kolner, S.J. Yoo: *IEEE J. Lightwave Technol.* **22** 2672-2679 (2004).
- 9) Z. Jiang, D.S. Seo, S.-D. Yang, D.E. Leaird, R.V. Roussev, C. Langrock, M.M. Fejer, A.M. Weiner: *IEEE J. Lightwave Technol.* **23** 143-158 (2005).
- 10) N. Wada, G. Cincotti, S. Yoshima, N. Kataoka, K. Kitayama: *IEEE J. Lightwave Technol.* **24** 113-121 (2006).
- 11) X. Wang, N. Wada, G. Manzacca, G. Cincotti, T. Miyazaki, K. Kitayama: *ECOC2006* Th3. 6. 5 (2006).
- 12) 黒川隆志, 竹ノ内弘和, 津田裕之: 光技術コンタクト. **38** 12 727-732 (2000).
- 13) N. Wada, F. Kutota, H. Watanabe, Y. Komai, K. Kodate:

- CLEO in Europe* CEP-8-THU (2003).
- 14) 駒井友紀, 和田尚也, 小舘香椎子: 日本女子大学紀要理学部. **12** 15-24 (2004).
- 15) N. Wada, Y. Komai, F. Moritsuka, K. Kodate: *Proceesing of SPIE* **6028** 414-421 (2006).
- 16) Y. Komai, N. Wada, F. Moritsuka, F. Kubota, K. Kodate: *MOC'04* G-4 (2004).
- 17) Y. Komai, F. Moritsuka, N. Wada, F. Kubota, K. Kodate: *CPT2005* 157-158 (2005).
- 18) Y. Komai, N. Wada, F. Moritsuka, K. Kodate: *Proceesing of SPIE* **6025** 204-210 (2006).
- 19) 杜塚芙美, 駒井友紀, 和田尚也, 安西志摩子, 小舘香椎子: 2005ソサエティ大会講演論文集. B-12-2 (2005).

Multi-port Spectrum Synthesizer Using Arrayed Waveguide Grating for Multiplexed Optical Spectrum Processing

Fumi Moritsuka¹, Yuki Komai¹, Shimako Anzai¹, Naoya Wada²,
Tetsuya Miyazaki² and Kashiko Kodate¹

¹The Graduate School of Science, Division of Mathematical and Material Structure Science,
Japan Women's University

²Research Department 1, New Generation Network Research Center, Photonic Network Group,
National Institute of Information and Communications Technology

(Received November 20, 2006)

Abstract: In order to meet the demand of the explosive increase in internet protocol (IP) traffic, a photonic network enabling ultra high-speed and large capacity communication systems is to be hoped for. To this end, it is desirable to develop flexible optical signal processing and transfer technology in the optical domain with enhanced data speed and photonic transmission capacity. Additionally, with a view to resolving the electronic router's bottleneck, label processing technology needs to be examined. As a solution, we have proposed the use of wavelength and amplitude and phase tunable multi-port optical spectrum synthesizer (OSS) using arrayed waveguide grating (AWG).

This system based on pulse reshaping in the spectrum domain using Fourier transformed enable the amplitude and phase of high resolution spectrum to be controlled. Moreover, an OSS can process multiplexed optical labels. We have applied the OSS to optical label processing, expected as an application of optical packet switching (OPS) and optical code division multiple access (OCDMA). In this paper, we will report on the experimental demonstration and simulation of optical en/decoding using our proposal OSS and OCDMA.

Key words: Photonic networks, Optical spectrum synthesizer (OSS), Arrayed waveguide grating (AWG), Optical packet switching (OPS), Optical code division multiple access (OCDMA), Optical pulse shaping, Multiplexed optical label processing