

導波路型光波シンセサイザを用いた超高速光パルス信号処理

駒井 友紀¹, 三重野 光子^{1,†}, 品田 聡², 和田 尚也², 小館 香椎子¹

¹日本女子大学 理学部数物科学科†

²情報通信研究機構 超高速フォトニックネットワークグループ

Ultrafast Optical Pulse Signal Processing Using A Waveguide-Type Optical Spectrum Synthesizer

Yuki KOMAI,¹ Mitsuko MIENO,^{1,†} Satoshi SHINADA,² Naoya WADA,² and Kashiko KODATE¹

¹Faculty of Science, Japan Women's University

²Photonic Network Group, National Institute of Information and Communications Technology

(Received November 28, 2009)

We developed an optical spectrum synthesizer (OSS) based on high resolution synthesized AWG which consists of 20 GHz spacing, 32 ports AWG with tunable attenuators, optical phase shifters and a mirror. It can tune amplitude and phase of each spectrum component of pulse train. Spectrum domain matched filtering for optical code division multiple-access (O-CDMA) using this OSS is experimentally demonstrated. And we have proposed a tunable multi-port OSS for photonic multiplexed signal processing. In this paper, we report experimental and simulation results of photonic multiplexed spectrum label encoding and decoding using the multi-port OSS.

Key Words: Photonic network, Arrayed waveguide grating (AWG), Optical spectrum synthesizer (OSS), Encoding-decoding, Multi-port OSS

1. はじめに

近年の大量かつ変動するトラフィックに対応するため、超高速化・大容量化を可能とするフォトニックネットワークの実現が求められている。そのためにはフォトニック伝送技術の速度・容量に合ったフォトニック転送技術が不可欠である。この転送技術にはボトルネックの解消、小型化や低消費電力化などの問題を解決するために、ネットワークの透明度を上げる光処理の積極的な導入が進んでいる^{1,2)}。

160 GHz以上の繰り返し周波数を持つ超高速光パルスの処理は、光パルスをフーリエ変換し、そのスペクトルを変調することにより、制御後のスペクトルの逆フーリエ変換で得られる波形を間接的に制御する手法が有効である。このようなスペクトル制御技術はこれまでも多く開発されている³⁻⁵⁾が、スペクトル成分の位相と振幅を独立に制御することは困難であった。そこで、我々は入力した光パルスをアレイ導波路格子(Arrayed waveguide grating: AWG)でフーリエ変換し、スペクトル面で各スペクトル成分の振幅及び位相を可変振幅減衰器及び可変位相シフタで変調して、AWGで逆フーリエ変換することにより任意の波形を生成する導波路型光波シ

ンセサイザ(Optical spectrum synthesizer: OSS)を提案・実現した⁶⁾。OSSはスペクトル成分の振幅と位相を連続的かつ任意に調整可能であり、可変マッチトフィルタリングに応用することができる⁷⁾。

一方、前述のようなフォトニックネットワーク実現のための光処理を利用した転送処理におけるボトルネック解消の具体例としては、伝送するデータの前に送信先を示す光ラベルをつけて送受信し、符号処理を行う光パケットスイッチングネットワークが提案された。この方式は拡張性も高く、データ粒度も細かいため、研究開発が活発であり、近年ではIPネットワークと光パケットスイッチングネットワークを相互接続するための変換器の研究もなされている⁸⁾。光パケットラベル処理部分ではパケットヘッダラベルの認識処理が全光学的に行われるが、これに対して電子技術によるラベル処理には低速なメモリアクセスが必要になり、光スイッチの能力を制約する要因となる。この課題を解決するために、平面光導波路を用いた2値位相変調符号ラベルプロセッサ、ファイバブラッググレーティングを用いた多波長ラベルプロセッサ、時空間変換の原理に基づく角度多重ホログラムなどの超高速の全光ラベル処理技術が提案されている⁹⁾。しかし、現状では同時に複数の信号を処理しよう

†現在の所属：早稲田大学大学院 先進理工学研究科

†Present address: Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555

とした場合、並列処理の数と同数のデバイスが必要になるという課題が残っている。

そこで、我々は単一デバイスで複数の光信号を同時に処理可能な N 個の入出力ポートを有するAWGを搭載したマルチポートOSSを提案・試作した¹⁰⁾。さらに、複数ポートを使用したスペクトル信号の多重符号・復号化の検討、時間領域でのパルス波形の確認を行った¹¹⁾。本論文では多重OSSを用いた光ラベル処理への検討として試作シンセサイザと疑似乱数光信号データをのせたprime符号のパターンを使用し、光波マルチプロセッシングのための多ポート同時符号化・復号化の検討を行ったので報告する。

2. AWGを用いた導波路型OSS

光パルス信号はフーリエ変換を施すことでスペクトル分布へと変換され、スペクトル分布の各モードの振幅および位相に変調を加えると、新たなスペクトル分布が生成される。これを逆フーリエ変換することにより、時間領域の光パルス信号へと変換され、直接時間領域内で制御が困難な光パルス信号も操作することが可能となる。

超高速光信号の処理手法として、我々はこのスペクトル領域の信号処理に着目した。ここで、Fig. 1に示すようにコム状の時間波形を有する光信号の電界強度は

$$E(t) = \frac{1}{2} \sum_n E_n e^{j(\omega_n t + \phi_n)} + c.c. \quad (1)$$

で表される。ただし、ここで ω_n および ϕ_n は n 番目の発振光モードの角周波数および位相であり、 $c.c.$ は前の項の複素共役を示している。 ω_n がモード ω_p 間隔で並ぶとき n 番目の発振光モードは

$$E(t) = \frac{1}{2} \left\{ \sum_n E_n e^{j(n\omega_p t + \phi_n)} \right\} e^{j\omega_0 t} + c.c. \quad (2)$$

である。ただし、 ω_0 は任意のモードの角周波数である。モード間隔 ω_p に対応する周期を $T = 2\pi/\omega_p$ とすれば、 t に $(t+T)$ を代入すると

$$\sum_n E_n e^{j[n\omega_p(t+T) + \phi_n]} = \sum_n E_n e^{j[n\omega_p t + \phi_n]} \quad (3)$$

と表すことができ、レーザーの出力波形は周期 T の周期関数になっている。 E_n がガウス分布をとり、 $\phi_n = 0$ のときのスペクトル分布の幅を $\Delta\omega_0$ とすると

$$\sum_n E_n e^{j[n\omega_p t + \phi_n]} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{2\omega_p}{\Delta\omega_0} \right)^2 n^2 + jn\omega_p t \right] \quad (4)$$

となる。この信号のフーリエ変換パターンはコム状のスペクトル分布に相当する。 $t=0$ 付近の時間波形は

$$I(t) \cong 2\pi E_0^2 \left(\frac{\Delta\omega_0}{2\omega_p} \right)^2 \exp \left[-\left(\frac{\Delta\omega_0}{2} \right)^2 t^2 \right] \quad (5)$$

となる。これは、パルス幅が

$$\Delta t = \frac{4}{\Delta\omega_0} \quad (6)$$

であることを表しており、パルスの時間波形とスペクトルはフーリエ変換により逆数の関係になる。また、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ことが分かる。繰り返し周波数が高い光パルス信号では、パルス間隔が非常に密になっていることから、高速な制御が必要となってくる。このとき、スペクトル領域においては、高速になるほどモード間隔が疎になるため、制御が容易となる。Fig. 1に示すように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、光パルスを任意に整形することができる。

この手法に基づき、任意の超高速光パルス信号処理を行うためのフーリエ変換機能デバイスとして、AWGに着目した。AWGは入出力導波路と2つのスラブ導波路、一定の長さの差を持つアレイ導波路群から構成されており、フーリエ変換機能を有する。先に述べたパルス整形の原理より、入力に光パルスまたはパルス列を用いた場合、時間軸上での直接処理が難しい100 GHz以上の超高速の信号を扱うことが可能である⁹⁾。この利点を活かしたOSSは、石英ガラス光導波路を用いた光回路および入出力用の偏波保持ファイバ、温度制御回路、位相シフト駆動用配線部から構成される。OSSの構成をFig. 2

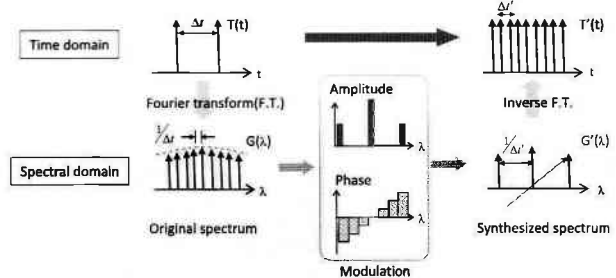


Fig. 1 Principle of waveform control by spectrum modulation.

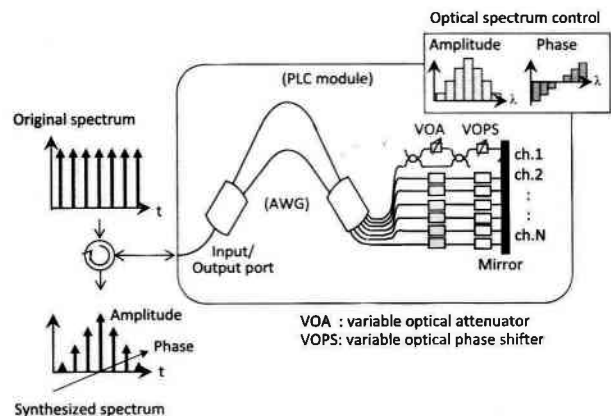


Fig. 2 Schematic configuration of our proposal OSS.

に示す。AWGでフーリエ変換された周波数スペクトルの各導波路上にはMach-Zehnder型可変振幅減衰器 (Variable Optical Attenuator: VOA) および可変位相シフタ (Variable Optical Phase Shifter: VOPS) が作製されている。振幅および位相を変調するためのヒータに加わる電流量は外部のコンピュータから波長チャンネル毎に独立に制御でき、変調に要する時間はヒータの動作時間により約3 msである。各波長チャンネルのスペクトル成分はVOAとVOPSを用いて任意の振幅と位相に変調される。変調された信号は反射ミラーで再びAWGに戻り、逆フーリエ変換によりパルス波形に変換され、AWG付き平面光波回路 (Planar lightwave circuit: PLC) の単芯入出力用ポートから出力される。AWGは温度依存性を有しているため、温度安定化が必要である。そのため、OSSの基板はペルチェ素子および温度センサで制御されており、出力光の波長を微調整することができる。さらに、波長チャンネル毎の損失と位相差に差が生じないように、AWGの第2のスラブ導波路からVOA・VOPSまでの導波路はすべて等しい光路長に設計されている。

3. 導波路型OSSを用いたマッチトフィルタリング

導波路型OSSを用いた超高速光パルス信号処理の実証実験としてスペクトル制御による全光型マッチトフィルタリングを行った。本論文において全光型マッチトフィルタリングとは、画像処理技術で多く適用されているように、入力信号が雑音に埋もれている場合に入力信号を最大の信号対雑音比で検出する処理を示す¹³⁾。OSSを用いた全光型マッチトフィルタリングは符号化された多重光信号を復号化し、特定のパターンの光信号を取り出すことを意味している。したがって、取り出したいパターンに合わせてVOAやVOPSの変調量を設定できる。Fig. 3に実験系を示す。光源のモードロックレーザー (Mode-locked laser diode: MLLD) からは繰り返し周波数9.95328 GHz、パルス幅1.5 ps、中心波長1552.69 nmのパルスを発生させ、OSSに搭載したAWGの波長チャンネル間隔が19.9 GHzであることから光時分割多重 (Optical Time Division Multiplexing: OTDM) 装置でパルス周期を19.9 GHzに合わせた。また、OSSに装着されているペルチェ素子による

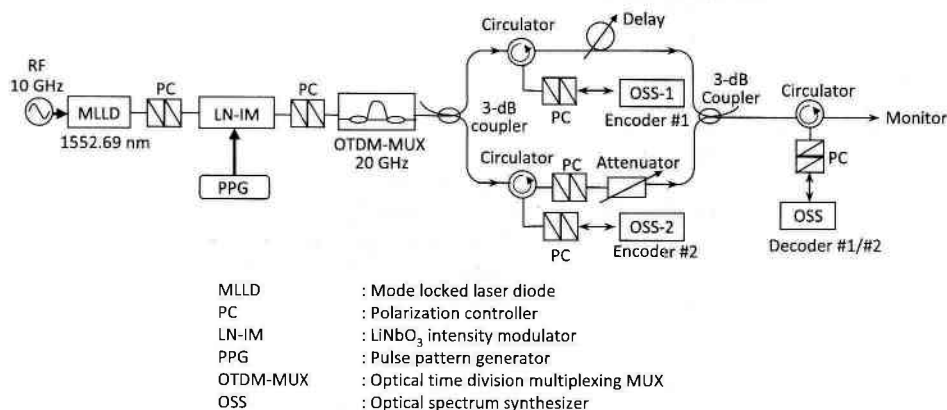


Fig. 3 Experimental setup for matched filtering.

Input spectrum mode	Control of VOA	
	ON(current-off) 1	OFF(current-on) 0
ON(intensity:1) 1	1 (output intensity:1)	0 (output intensity:0)
OFF(intensity:0) 0	0	0

Fig. 4 Output spectrum intensity depended on input spectrum mode intensity and current control of VOA.

温度制御により、AWGの中心波長はMLLDからの発振光パルスの波長と等しくした。OSSへの光パルス信号の送信と反射した光パルス列の取り出しには光サーキュレータを用い、出力パルス列の波形モニタリングにはストリークカメラとサンプリングオシロスコープ、スペクトラムアナライザを使用した。さらに、多重化したパルスが重ならないようにパルスを間引く必要がある。そこで、光パルス列の繰り返し周波数を1/64にするためのLiNbO₃の強度変調器 (LN-IM)、パルスパターンジェネレータ (PPG) を用いた。10/64 GHzの光パルスを20/128 GHzにするために光時間多重装置 (OTDM-MAX) を、パルス符号器としてのOSS2台と復号器としてのOSS1台を使用した。

この全光型マッチトフィルタリングではOSSの機能をわかりやすく示すため、VOAを用いたスペクトル振幅制御のみを行い、直交符号であるprime符号¹⁴⁾を適用した。prime符号では、prime numberを p 、周期 p^2 、生成符号 $P = [C_{i0} C_{i1} \dots C_{i(p^2-1)}]$ とすると、 $i = S_{ij} + jp$ ($j = 0, 1, \dots, p-1$, $S_{ij} = x \cdot j \text{ mod } p$) のとき $C_{xi} = 1$ 、その他の場合は $C_{xi} = 0$ となる。実験では、prime number 5のprime符号を用い、入力されたスペクトルの強度を1と符号化するスペクトルのモードは制御せず、強度を0と符号化するスペクトルのモードが最も抑圧されるように、各チャンネルのVOAに電流を与えた。復号化では、VOAに電流が印加された場合は、入力されたスペクトルの強度は抑圧されて出力は0になり (VOA: ON状態)、電流が印加されなければ入力されたスペクトルの強度と同じ出力になる (VOA: OFF状態)。Fig. 4にスペクトルの強度とVOAの電流印加状態に対する出力の関係を示す。

Fig. 5 (a)は光源からの光パルス列をストリークカメラとサンプリングオシロスコープで撮影した時間波形で

ある。Fig. 5 (b), (c)は符号器用のOSS-1とOSS-2でそれぞれ符号化された光パルスを、Fig. 5 (d), (e)はその光パルスのスペクトル分布を示している。伝送中には光パルスが拡がっているのが分かる。Fig. 5 (f), (g)は符号化(#1)光パルスに時間差を付加して符号化(#2)光パルスと合成した光パルス列の時間波形とそのスペクトルを示している。Fig. 5の(h), (i)は復号化符号#1, #2(符号化符号#1, #2とパターンは同じ)でそれぞれ復号化した光パルスの時間波形と、Fig. 5 (j), (k)はそのスペクトルである。2つの符号の場合、良好なマッチトフィルタリングができ、不一致の場合の信号も無視できる程度に抑圧されている。これらの結果から、マッチトフィルタリングをはじめとするスペクトル領域での全光型光パルス信号処理や整合フィルタなど幅広い応用にOSSが有効であることがわかる。

4. マルチポートOSS

OSSに搭載するAWGを、設計パラメータから最適化された出力導波路と同じピッチで、入力導波路を複数化した $N \times N$ 周回性AWGにすると、ある1つの出力導波路に強め合う波長は入力導波路によってシフトする。したがって、 N 個のフーリエ周波数成分で $N \times N$ パターンを構成するためには、AWGの周回性を利用することができる。各入力導波路の光路はAWGのFree Spectrum Range (FSR)に依存する周波数帯域を有しており、FSRをチャンネル間隔周波数 Δf の N 倍になるように設計すると、 $N \times N$ のパターン内で使用する周波数成分は合計 N 個になる。したがって、AWGの入力を N ポートに増やすことによ

て、異なるチャンネルから入力された同じ波長の光信号は、過不足なく必ず異なる出力チャンネルから出力される¹⁰⁾。

この原理をふまえ、 N 個の周波数面チャンネル数の変調パターンに合う入力チャンネルポートに光パルス列を入力することにより、一括で波形整形や光ラベル処理を可能にするマルチポートOSS (Fig. 6) を考案し、中心波長1552.524 nm、チャンネル間隔10 GHz、チャンネル数20のAWGを組み込んだ20ポートOSSを試作した。

マルチポートOSSはどの入力ポートへ光を入力しても出力チャン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。Fig. 7に入出力ポート対出力チャンネル波長相関表を示す。例えばFig. 8 (a)に示すように、中心のポート10に $\lambda_1 \sim \lambda_{20}$ のスペクトル成分をもつ信号を入力すると、シングルポートと同様に各出力チャンネルからは $\lambda_1 \sim \lambda_{20}$ 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

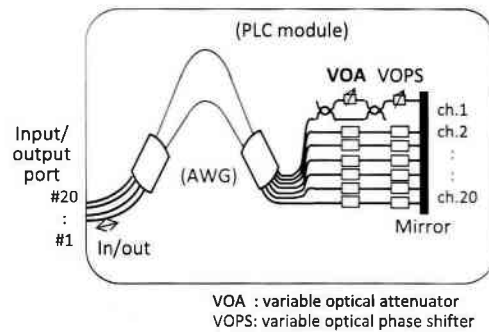


Fig. 6 Schematic configuration of a multi-port OSS with N input/output ports.

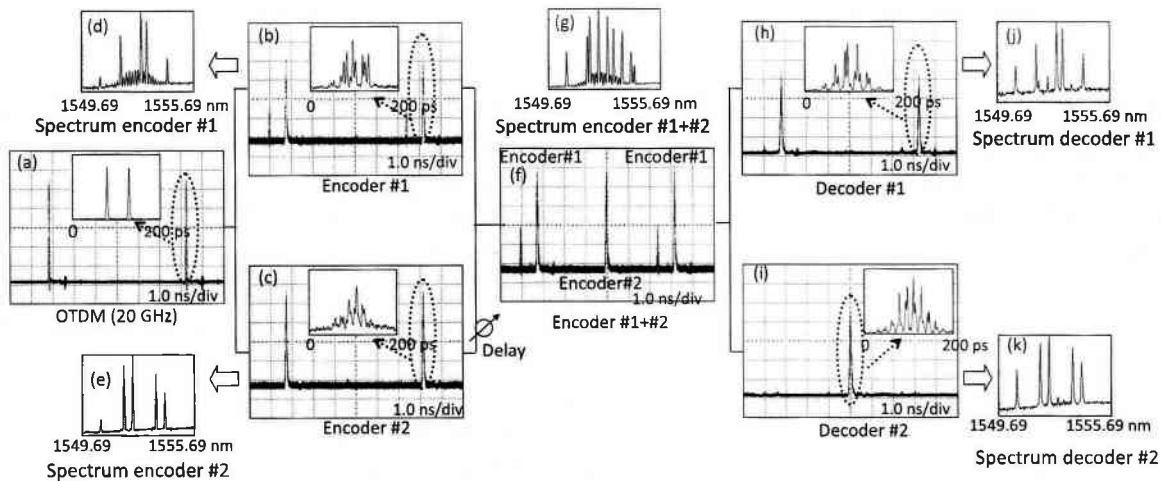


Fig. 5 Experimental results of matched filtering.

- (a) generated optical pulse train (20 GHz) by OTDM.
- (b) encoded optical pulse train by label #1.
- (c) encoded optical pulse train by label #2.
- (d) magnified view of encoded optical pulse train by label #1.
- (e) magnified view of encoded optical pulse train by label #2.
- (f) multiplexed optical pulse train.
- (g) magnified view of multiplexed optical pulse train.
- (h) decoded optical pulse train by label #1.
- (i) decoded optical pulse train by label #2.
- (j) magnified view of decoded optical pulse train by label #1.
- (k) magnified view of decoded optical pulse train by label #2.

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

Fig. 7 Output spectrum components of Input ports v.s. output channels.

と、各出力チャンネルにはポート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ンネルから出力されるスペクトルはシフトし、VOAとVOPSで制御を行うことにより、周回符号を生成することが可能となる。Fig. 8中のグレーの色がけのスペクトルモードはVOAがON状態、色がかかっていないスペクトルモードはVOAがOFF状態であることを示している。次にポート10で符号化したラベルをポート10に入力すると、Fig. 8 (b)に示すように、符号化と同様にス

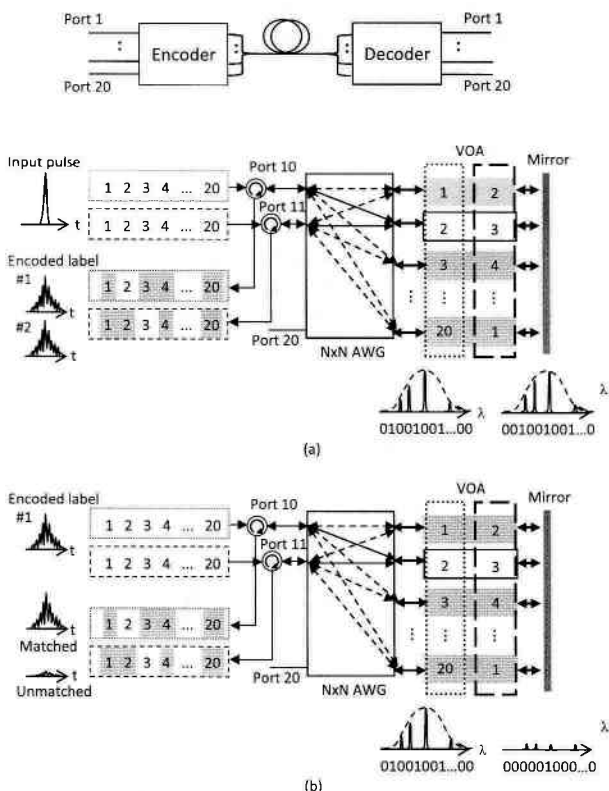


Fig. 8 Principle of multiple en/decoding using multi-port OSS.

- (a) Principle of encoding (example of port 10 and 11).
- (b) Principle of decoding (example of port 10 and 11).

ペクトルが出力される。フィルタリングのVOAパターンを符号#1と同じにしておくと、OSSから出力される結果は符号化したパターンと同様になり、出力も大きい。10以外の他のポートに入力すると、スペクトルはシフトするため、prime符号のような直交符号を用いるとフィルタリングによって各チャンネルの光スペクトルが抑圧され、パワーの小さい波形が出力される。この動作により、マルチポートOSSはポート数分の擬似ランダム多重符号・復号処理を実現する。

5. マルチポートOSSを用いた光パルス信号の符号・復号化のシミュレーションおよび実験的検討

基本的には符号・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・分離を行った。また、実験的検討では符号・復号化にスペクトル強度符号を用いた。4章で述べたようにVOAは各スペクトル成分を制御するマッチト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適用した。

光ラベル処理にむけたフォトニック多重処理の検討として、周期9のprime符号 {0100100100} (prime numberは3, 先頭の0はダミーのビット)を用い、スペクトル領域における光多重符号・復号化を行った。実験系をFig. 9に示す。本来は符号器、復号器としてOSSが1台ずつ必要であるが、実験では1台のOSSを利用し、全20ポートの内、ポート1, 2を符号化用、ポート11~20を復号化用として使用した。また、光源として、MLLDからマルチポートOSSに搭載したAWGの中心波長と同じ波長1552.52 nm, 繰り返し周波数10 GHz, パルス幅2 psの光パルスを発生させ、符号器となるOSSのポート1, 2に同時に光信号を入力し、VOAを使って各スペクトル成分の強度パターンをprime符号で符号化し、ラベル生成を行った。AWG

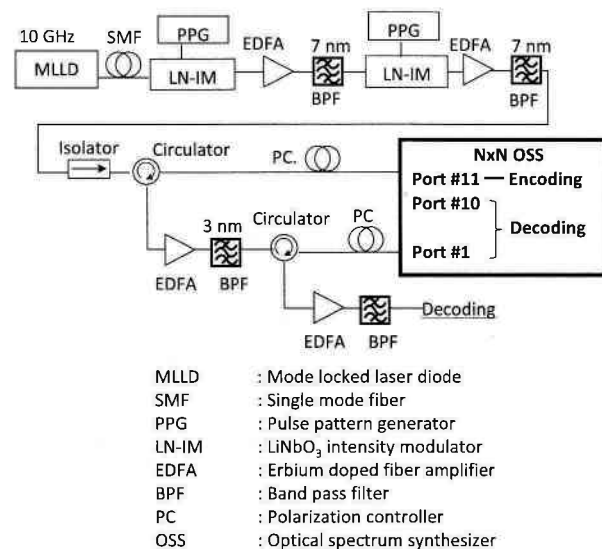


Fig. 9 Experimental setup of spectrum encoding and decoding using the 20-ports OSS.

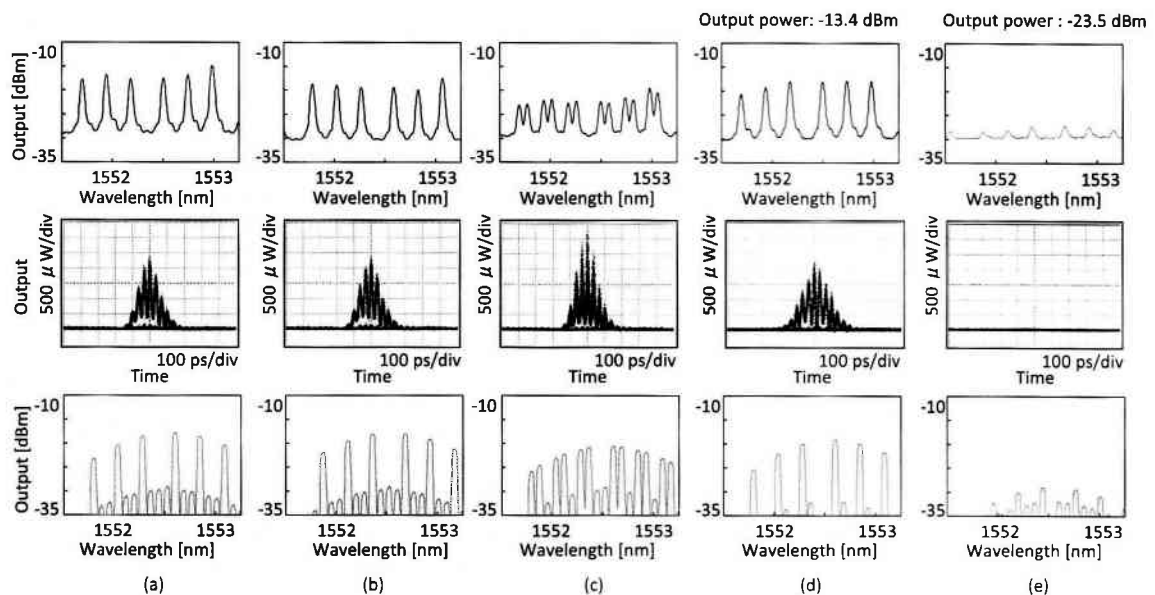


Fig. 10 Encoding and Decoding in Spectrum and time domain.

- (a) Encoded label #1.
- (b) Encoded label #2.
- (c) Multiplexed pulse for label #1 and #2.
- (d) Matched decoding.
- (e) Unmatched decoding.

の波長シフト特性によりポート2ではポート1から出力されるラベル#1に対して1 bitシフトしたラベル#2の光信号が出力される。このラベル#1と#2を合波し、マルチポートOSSの復号化用ポート11~20を用いて復号化を行った。

Fig. 10にスペクトル符号・復号化の結果(上段: スペクトル(実験), 中段: 時間波形(実験), 下段: スペクトル(シミュレーション))を示す。ラベル#1, #2で符号化された光信号を合波し、復号化によりラベル#1, #2の光信号を取り出すことができた。また他の出力からは符号化と不一致のスペクトルが出力された。一致符号と不一致符号の出力の消光比は10 dBになった。光通信システム専用のシミュレーションにおいても実験と同様の結果が得られ、マルチポートOSSが光多重符号・復号器として良好に機能していることを実証した。

さらに、提案したマルチポートOSSの光ラベル処理適用の検討として、時間領域で光強度がデータ変調され、スペクトル領域で符号・復号化される光ラベルのビットエラーレート評価を行った。ここでもマルチポートOSSの多重特性を利用し、OSS1台のみで実験を行った。符号化後にパルス幅が広がることを考慮し、隣り合うパルスと重ならないようにするためにパルス幅2 psのパルス列の繰り返し周波数を10 GHzから1 GHzに変換し、復号化後に十分な消光比を得るためにパルス列の繰り返し周波数より低速な50 Mbit/sの擬似ランダム信号(Pseudo Random Bit Stream (PRBS): $2^{23}-1$)によって光強度変調を行った。そのランダムパルス列の各スペクトル成分をマルチポートOSSのVOAにてprime符号(prime number: $p=3$)で符号化し、繰り返し周波数1 GHz相当の擬似ランダム光ラベル列を生成した。Fig. 11の実験結果に示すように、復号化後の誤り率が通信におけるしきい値 10^{-9} 以下

を達成し、良好な結果を得た。

6. まとめ

フォトニックネットワークにおける超高速光パルス信号処理の応用において重要な役割を果たす任意波形のパルス制御を行うため、AWG(32 ch, チャンネル間隔19.9 GHz)の実時間フーリエ変換機能およびスペクトル面における振幅・位相変調デバイスを組み合わせた導波路型OSSを提案し、全光型マッチトフィルタリングの実

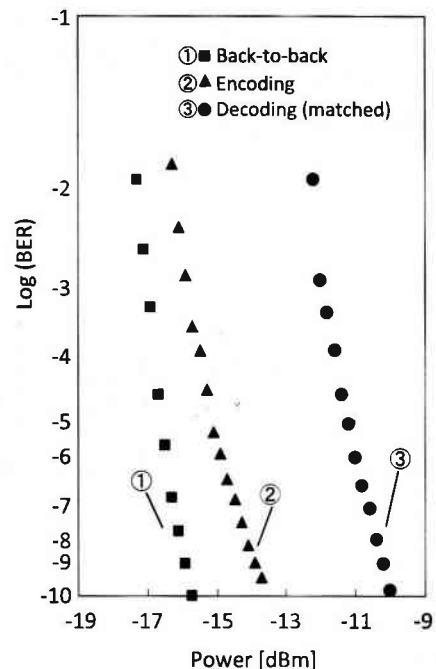


Fig. 11 Measured BER.

証実験において有用性を確認した。

さらに、ラベル処理のための光多重処理機能デバイスとして、中心波長1552.524 nm, チャネル間隔10 GHz, 入出力ポート数20, チャネル数20のAWGを用いたマルチポートOSSを提案した。マルチポートOSSを用いたフォトニック多重処理の検討として、スペクトル領域における光多重符号・復号化のシミュレーションと実験的検討を行い、理論とほぼ一致した実験結果を得た。さらに、疑似乱数光信号データを載せた、光パルスのprime符号によるスペクトル領域の多重符号・復号化を行い、消光比10 dBの良好な結果が得られた。また、光ラベル処理への応用として符号・復号化した50 Mbit/sの疑似ランダム信号によって光ラベルのビットエラーレート評価を行い、誤り率 10^{-9} 以下を得ており、提案デバイスの光符号・復号器としての有用性を確認した。

これらの結果により、提案した導波路型OSSがフォトニック多重処理に適用可能であることを確かめた。

謝 辞

本研究に関して多くのご助言頂きました東京大学名誉教授・(独)情報通信研究機構プログラムコーディネーターの神谷 武志教授、(独)情報通信研究機構総合企画部統括の宮崎 哲弥氏に感謝致します。また、実験に御協力頂きました日本女子大学理学研究科、杜塚 美美氏(現、(株)東芝研究開発センター)、安西 志摩子氏(現、住友電気工業(株)伝送デバイス研究所)に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Kitayama and N. Wada: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** (1999) 1689.
- 2) K. Sato, N. Yamanaka, Y. Takigawa, M. Koga, S. Okamoto, K. Shiimoto, E. Oki, and W. Imajuku: *IEEE Commun. Magazine*, **40** (2002) 96.
- 3) T. Kurokawa, H. Tsuda, K. Okamoto, K. Naganuma, H. Takenouchi, Y. Inoue, and M. Ishii: *Electron. Lett.* **33** (1997) 1890.
- 4) K. Takiguchi, K. Okamoto, T. Kominato, H. Takahashi, and T. Shibata: *Electron. Lett.* **40** (2004) 537.
- 5) K. Mandai, D. Miyamoto, T. Suzuki, H. Tsuda, A. Aizawa, and T. Kurokawa: *Photon. Technol. Lett.* **18** (2006) 679.
- 6) Y. Komai, H. Watanabe, K. Kodate, N. Wada, and F. Kubota: *Opt. Eng. (OIE 2003)* **5** (2003) E5.
- 7) N. Wada, F. Kubota, H. Watanabe, Y. Komai, and K. Kodate: *Opt. Eng. (OIE 2003)* **5** (2003) E6.
- 8) H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, M. Naruse, H. Otsuki, K. Ikezawa, A. Toyama, N. Itou, H. Shimizu, H. Fujinuma, H. Iiduka, and T. Miyazaki: *J. Lightwave Technol.* **27** (2009) 2379.
- 9) A. M. Weiner, D. E. Leaird, D. H. Reitze, and E. G. Paek: *Opt. Lett.* **17** (1992) 224.
- 10) Y. Komai, F. Moritsuka, N. Wada, F. Kubota, and K. Kodate: *Technical Digest of Eighth International Symposium on Contemporary Photonics Technology* (2005) 157.
- 11) Y. Komai, N. Wada, F. Moritsuka, and K. Kodate: *Proc. SPIE* **6025** (2006) 204.
- 12) H. Tsuda, K. Okamoto, T. Ishii, Y. Inoue, H. Takenouchi, and T. Kurokawa: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** (1999) 569.
- 13) E. Watanabe, Y. Ichikawa, R. Akiyama, and K. Kodate: *Jpn. J. Appl. Phys.* **47** (2008) 5964.
- 14) L. Tancevski and I. Andonovic: *Electron. Lett.* **30** (1994) 1388.