

帯域可変スペクトルシェイパによる光スペクトル信号処理

三重野 光子¹, 駒井 友紀², 和田 尚也³, 品田 聡³, 中島 啓幾¹, 小館 香椎子²

¹早稲田大学大学院 先進理工学研究科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

²日本女子大学 理学部数物科学科 (〒112-8681 東京都文京区目白台2-8-1)

³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 (〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1)

Optical Signal Processing by Variable Bandwidth Spectrum Shaper

Mitsuko MIENO,¹ Yuki KOMAI,² Naoya WADA,³ Satoshi SHINADA,³

Hirochika NAKAJIMA,¹ and Kashiko KODATE²

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

²Faculty of Science, Japan Women's University, 2-8-1 Mejirodai, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8681

³Photonic Network Group, National Institute of Information and Communications Technology,

4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795

(Received November 25, 2009)

We demonstrated arbitrary optical pulse shaping and generation by spectral control and were able to control the phase and amplitude of the spectrum with 10 GHz resolution in the entire C-band, with rectangular pass-bands, using a variable bandwidth spectrum shaper. The experimental results of waveform generation were almost identical to the calculated results. We also experimentally demonstrated time-spread 200 Gchip/s, 10 Gbit/s, and 8-chip optical binary phase shift keying (BPSK) code generation and processing based on spectral control. To demonstrate applications of this spectrum controller to tunable optical label processing, we performed experiments and simulated label generation and processing by controlling the spectrum.

Key Words: Pulse shaping, Optical signal processing, Optical Binary phase shift keying (BPSK) code generation, Optical fiber communications, Fourier transform

1. はじめに

インターネット接続などにブロードバンドサービスが広く浸透しており、データトラフィック需要は年率50%という急速なペースで拡大している。今後さらに高精細映像のストリーミングサービスやYou Tubeに代表される動画共有サイトにおける大容量データ交換サービスなど、更なる大容量の情報を送受信するためのネットワークが必要となることが予想される[†]。これらに対応するための大容量通信インフラを実現するためには、光通信技術分野でのブレイクスルーが不可欠である。

近年、超高速デバイスの性能向上により、光ファイバで伝送できる伝送速度は飛躍的に向上した¹⁾。それにより、大容量通信の実現のために伝送速度の更なる高速化が進められ、テラビット伝送などの高度なフォトニック信号処理技術とそれを担う光機能システムが期待されている。フォトニック信号処理技術では、光信号のスペクトル制御により、新たな超高速光信号を生成、制御することが可能であり、この原理に基づいた光パルス整形、

符号生成等の多くの研究開発が行われている²⁻⁴⁾。160 GHz以上の高速繰り返し周波数をもつ光パルスの処理においては、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。特に回折格子と液晶空間光変調器を利用した自由空間型波形整形デバイスは、パルスシェイパとして盛んに研究が行われており、スペクトルの位相と振幅の独立制御、時空間偏光波形整形などの成果が得られている⁵⁻⁷⁾。これらの手法では繰り返し周波数や中心波長等のパラメータの可変性については十分に示されていなかったが、アクティブ光学デバイスの性能向上と微細素子の製作技術の向上により、フォトニックネットワークの柔軟性に不可欠な可変性を十分検討できるようになってきた。我々はこれまでに、Cバンド全域において10 GHzスペーシング(340チャンネル)でスペクトル成分の位相と振幅の独立制御が可能な帯域可変スペクトルシェイパ(Variable bandwidth spectrum shaper: VBS)を提案・試作している⁸⁾。VBSはパルスシェイパと同様に、回折

[†]URL: <http://www.jpix.ad.jp/jp/technical/traffic.html>

格子と液晶空間光変調器を用いているが、本研究ではスペクトル形状に着目して制御を行っているため、本デバイスをスペクトルシェイパと敢えて呼ぶ。通常のAWGを用いた光学系ではスペクトルの各モード(透過帯域)がガウシアン形状になるのに対し、VBSはフーリエ変換素子として回折格子を用いているため、スペクトルの各モードが原理的に矩形形状になり、自由度の高い任意の高精度なスペクトル制御が可能となる。この光学系をベースとして、高分解能・広帯域・低損失なスペクトル制御装置を実現するために各要素に独自の工夫を施している。

本論文ではフーリエ変換に基づいたスペクトル制御手法に着目し、VBSを用いたフォトニック信号処理の応用展開として、光パルス圧縮の方法(3節)、光パルス整形の方法(4節)、光符号ラベル生成・処理の方法(5節)について報告する。

2. VBSを用いたスペクトル制御の原理

VBSはサーキュレータ、コリメータ、フーリエ変換素子となる回折格子、集光レンズ、偏光子、液晶空間光変調器(Spatial Light Modulator: SLM)、ミラーから構成される。Fig. 1にVBSの基本構成を示す。

光ファイバより入力された光信号はサーキュレータを介してコリメータからビーム径12 mmのコリメート光として自由空間内に射出される。コリメータ部において偏波分離・偏光保持出力を行い、分光・集光光学系内は同一な直線偏光に保たれている。また、偏波分離後に両偏波間に生じる位相差は、コリメータ部において補償する設計となっている。入射光は溝周期が1100 lines/mmの回折格子で波長分散された後、焦点距離150 mmの集光レンズで波長ごとに集光され、SLMに入射する。SLM上では、10 GHzに相当するビーム領域が、短波長から長波長へ、およそ40 μm から60 μm に変化しており、20 μm 間隔のSLMセルの2個または3個を1チャンネル分として受光している。そのため正確な空間分解能は波長により若干異なり、1550 nmで10.5 GHz/ch、1540 nmで11.6 GHz/ch、1565 nmで9.7 GHz/chとなっている。SLMで制御されたスペクトルは、ミラーで折り返し反射され、回折格子によって再び時間波形に変換され、もとの光路をたどって

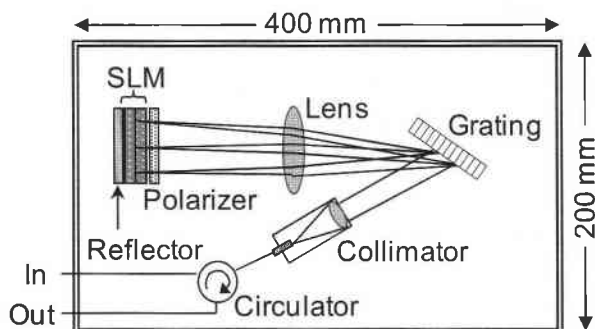


Fig. 1 Schematic configuration of variable bandwidth spectrum shaper (VBS).

コリメータへ再結合する。出力光はコリメータからサーキュレータを介して取り出される。

VBSの制御パラメータをTable 1に示す。VBSのチャンネル間隔は10 GHz、チャンネル数340 ch、挿入損失は10 dB以下であり、1538 nm~1567 nm(Cバンド)の帯域で動作する。実際に強度と位相の制御を行っているSLMは、強度制御用と位相制御用に2つのSLMを使用している。2つのSLMはいずれも平行配向タイプで、液晶層厚8 μm 、屈折率差0.1、液晶のピッチ20 μm 、往復光路差1.6 μm となっている。強度制御用のSLMは、配向方向を入力光の偏光方向に対し45度傾けており、位相差の制御により偏光状態を変化させ偏光子と組み合わせることで強度の制御を行う。強度制御のレンジは20 dBで、分解能は0.1 dBである。一方、位相制御用のSLMは、配向方向を入力光の偏光方向と平行にしており、偏光状態は変化させずに位相のみの制御を行っている。位相制御レンジは 2π で、分解能は $2\pi/50$ である。これらのSLMは外部コンピュータから個別に制御されている。強度と位相を独立に制御することができるため、強度制御による位相の変化を位相制御用のSLMで補償し、純粋な強度のみの制御を行うことも可能である。

回折格子の分散特性は波長に対して線形ではなく、長波長側で大きな分散となるため、実際には短波長側は2セルで1チャンネル、長波長側は3セルで1チャンネルというような構成で、回折格子の分散特性を考慮したSLMの制御を行っている。また、レンズ系は基本的に無収差で、チャンネルサイズに合わせた集光径を確保している。このような構成により、Cバンドで340 chの制御を実現している。分光・集光の光学系にテレセントリックな光学系を採用し、挿入ロスに波長依存性を抑えている。また、組み合わせレンズの使用による収差の無収差化、回折格子の格子間隔の微細化、SLMのピッチをビーム径に合わせて最適化したことにより、高い分解能を実現している。

3. VBSを用いた光パルス圧縮

周波数スペクトルの広がりと同じでも、光パルス幅は周波数スペクトルの位相関係により変化する。そのため、フーリエ変換限界(Fourier transform limited: FTL)になっていない光パルスに対しては、周波数成分の位相調整のみで光パルス幅を圧縮することができる。光パルス

Table 1 Parameters of the VBS.

Wavelength resolution	10 GHz
Control wavelength region	1538-1567 nm
Number of control channels	340 ch
Insertion loss	9 dB
Amplitude control range	30 dB
Amplitude control resolution	0.1 dB
Phase control range	2π
Phase control resolution	$2\pi/50 = 0.04\pi$
Package size	$400 \times 200 \times 150 \text{ mm}^3$

の時間波形とスペクトル分布は互いにフーリエ変換の関係にあり、光パルス幅 Δt とスペクトル幅 $\Delta \nu$ は(1)式の関係が成り立つ。

$$\Delta t \Delta \nu \geq k \quad (1)$$

ここで k はスペクトルの関数に依存し、ガウス型、hyperbolic secant²(sech^2)型などが用いられる。モード同期レーザー (Mode locked laser diode: MLLD) からの出力光は sech^2 型となるので、 $k=0.315$ となる。

(1)式において等号が成り立つ場合、光パルスに含まれる各スペクトル成分は全て同相となっており、時間的に最短の光パルス幅が得られる。この光パルスをFTLパルスという。不等号が成り立っている場合は、ある周波数成分の初期位相が有限な値をもっているため、その分だけ時間幅は広がりをもつ。この状態をチャープと呼ぶ。このチャープを利用すれば光パルス幅を広げることができ、ピークパワーを低く保つこともできる。

光の電界波形を光強度で見た光パルスの形状が同じでも、光パルス内の搬送波瞬時周波数が変化(周波数チャープ)しているか否かで、その周波数スペクトルの形状は異なる。

光パルス内での瞬時位相を時間 t で展開すると、 $\phi(t) = \phi_0 + \omega_0 t + \beta t^2 + \rho t^3 + \dots$ と表すことができ、これより瞬時角周波数は $\omega(t) = \partial\phi / \partial t = \omega_0 + 2\beta t + 3\rho t^2 + \dots$ となる。したがって、式の2次以上の項が周波数チャープに相当し、2次以上の項がない場合、つまり、 $\omega(t) = \omega_0$ (一定)の場合がFTLパルスといえる。一方、周波数領域でみると、周波数スペクトル成分の位相が周波数に対し線形に変化している場合に光パルス幅が最短のFTLパルスとなり、線形でない場合に周波数チャープが生じる。以上の原理に基づき、VBSによってスペクトルの位相を制御し、時間領域での光パルス幅の変化を観測した(Fig. 2)。

Fig. 3に光パルス圧縮の実験系を示す。光パルス幅を測定するために、第二高調波発生(Second Harmonic Generation: SHG)相関法を用いたスキヤニングオートコリレータを利用し、SHG自己相関波形を取得した。また、スペクトルを観測するために、モニタとしてスペクトルアナライザを用いた。

Fig. 4 (a), (b)にMLLDから発振された繰り返し周波数10 GHzの光パルス列の位相制御を行っていないときのSHG自己相関波形とスペクトルを示す。SHG自己相関

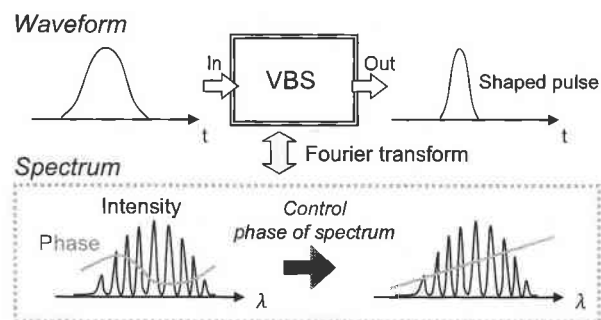


Fig. 2 Principle of pulse shaping.

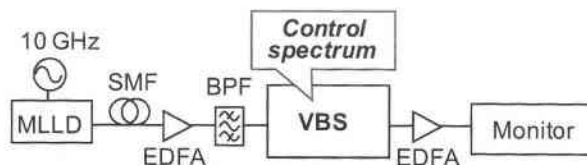


Fig. 3 Experimental setup of pulse shaping.

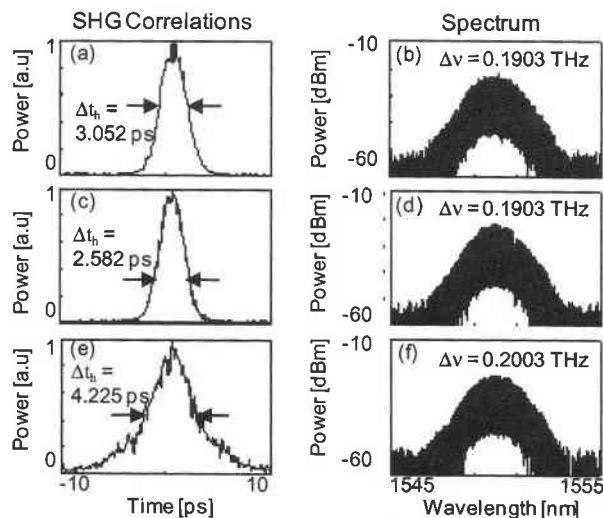


Fig. 4 Experimental results of pulse shaping.

- (a), (b) Generated pulse from MLLD ($\Delta t = 3.052$ ps).
- (c), (d) Reshaped pulse ($\Delta t = 2.582$ ps).
- (e), (f) Reshaped pulse ($\Delta t = 4.225$ ps).

波形の半値幅は $\Delta t = 3.052$ ps、 sech^2 関数でフィッティングしたときの半値幅は $\Delta t = 1.978$ ps、スペクトル幅は $\Delta \nu = 0.1903$ THzとなった。このスペクトルの位相分布が単調増加になるように、VBSを用いて制御を行った後のSHG自己相関波形とスペクトルをFig. 4 (c), (d)に示す。このときのSHG自己相関波形の半値幅は $\Delta t = 2.582$ ps、 sech^2 関数でフィッティングしたときの半値幅は $\Delta t = 1.673$ psとなった。スペクトル分布の半値幅は $\Delta \nu = 0.2003$ THzとなった。位相制御を行っていないときの光パルス幅 Δt とスペクトル幅 $\Delta \nu$ の積が 1.978 ps \cdot 0.1903 THz $=0.3764$ であるのに対し、VBSによって位相制御を行った後の積は 1.673 ps \cdot 0.2003 THz $=0.33512$ となった。位相制御を行ったことにより、FTLパルス($\Delta t \cdot \Delta \nu = 0.315$)に近づいたといえる。

次に、VBSを用いたスペクトルの位相制御による光パルス幅拡大の例を示す。Fig. 4 (e), (f)にSHG自己相関波形とスペクトルを示す。このときのSHG自己相関波形の半値幅は $\Delta t = 4.225$ ps、 sech^2 関数でフィッティングしたときの半値幅は $\Delta t = 2.738$ psとなった。このときスペクトル分布の半値幅はほとんど変化していない($\Delta \nu = 0.1903$ THz)。MLLDから発振された元の光パルスと比べると、大幅に光パルス幅が広がったといえる。

以上の結果から、VBSを用いてスペクトルの位相を制御することにより、光パルス幅を任意に変化させることが可能であると実証した。

4. VBSを用いた光パルス整形

スペクトルの位相と強度を制御することにより、光パルスの幅だけでなく形状を制御可能であることを示すために、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform: FFT)シミュレーションと実証実験を行った。

光パルスの繰り返し周波数が10 GHzで、三角形パルスに整形後の光パルスの底辺の間隔が10 ps、20 ps、40 psとした、スペクトル制御による光パルス整形実験系はFig. 3と同様である。光パルス整形後の時間波形、スペクトルを観測するため、それぞれストリークカメラとスペクトルアナライザを用いた。

VBSを用いてスペクトルの強度・位相制御を行い、底辺が20 ps、40 psの三角パルス整形を行った結果をFig. 5に、幅が10 ps、20 psの矩形パルス整形を行った結果を

Fig. 6に示す。FFTシミュレーションと実験結果はほぼ一致した結果が得られており、VBSを用いたスペクトル制御により、光パルスを任意の形状に制御可能であることを実証した⁹⁾。

5. VBSを用いた光符号ラベル生成・処理

VBSを用いたスペクトル制御による、超高速な光パルスの符号・復号化を行うことも可能である。この符号化技術はノードにおける光符号ラベル生成・処理に使われる。

スペクトル制御により光符号ラベル生成・処理の原理を以下に示す。初めに、VBSに入力する光信号の時間波形とスペクトルをそれぞれ $e_i(t)$ 、 $F[e_i(t)]$ (F はフーリエ変換関数)、符号化、一致符号で復号化、不一致符号で

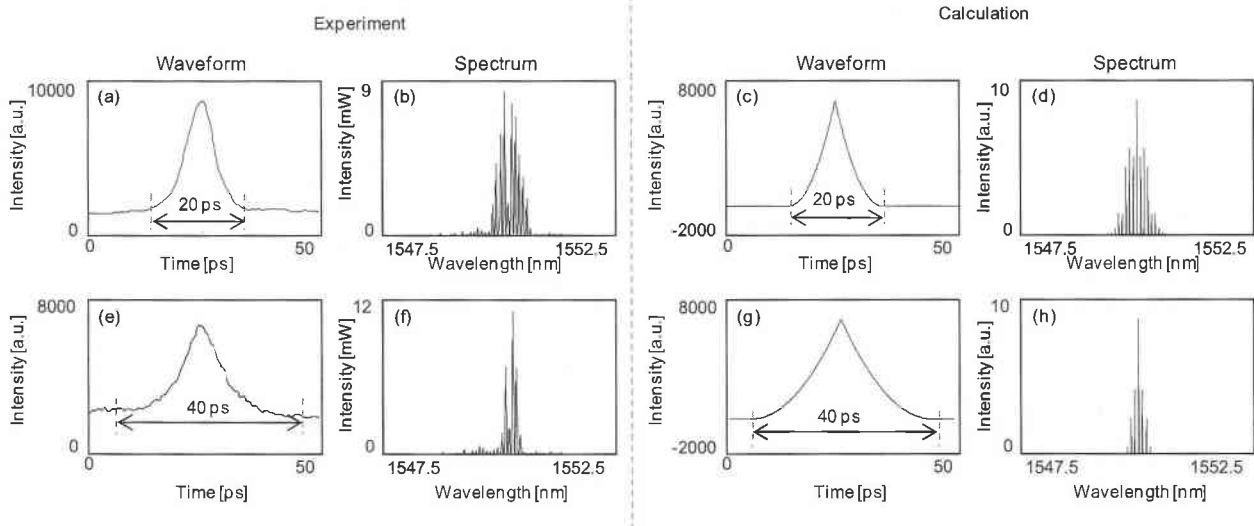


Fig. 5 Experimental and calculation results of triangular pulse generation.
(a), (b) (c), (d) Triangular pulse (bottom width: 20 ps).
(e), (f), (g), (h) Triangular pulse (bottom width: 40 ps).

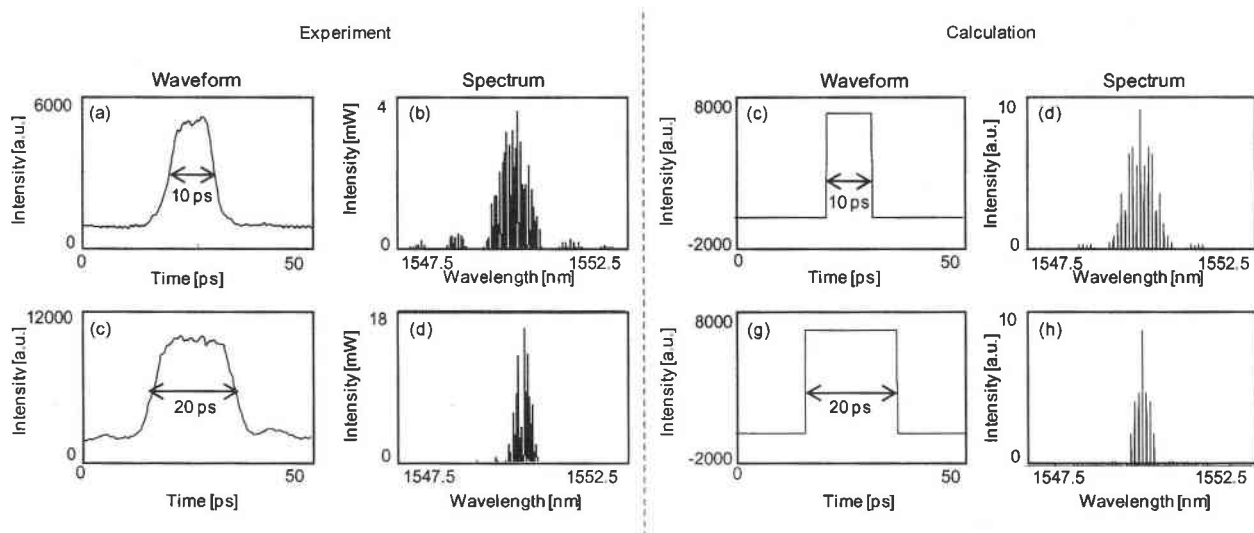


Fig. 6 Experimental and calculation results of rectangular pulse generation.
(a), (b), (c), (d) Rectangular pulse (width: 10 ps).
(e), (f), (g), (h) Rectangular pulse (width: 20 ps).

復号化を行う際のVBSのフィルタ関数をそれぞれ $T_{encoder}(\omega)$, $T_{decoder1}(\omega)$, $T_{decoder2}(\omega)$ とする。これらを用いて、VBSにより符号化されたスペクトル $E_0(\omega)$ は、(2)式のように表される。

$$E_0(\omega) = T_{encoder}(\omega)F[e_i(t)] \quad (2)$$

このとき、出力される光信号の時間波形 $e_0(t)$ は、 $e_0(t) = F[E_0(\omega)]$ のように表され、これはスペクトル制御により生成した時間拡散符号を表している。この原理をFig. 7に示す。この符号化された $e_0(t)$ を、再びVBSに入力し復号化を行う。一致符号で復号化を行った場合に、VBS後のスペクトルは(3)式のように表される。

$$E_m(\omega) = T_{decoder1}(\omega)F[e_0(t)] \quad (3)$$

(3)式において $e_0(t)$ を展開していくと(4)式のようになる。

$$\begin{aligned} E_m(\omega) &= T_{decoder1}(\omega)F[e_0(t)] \\ &= T_{decoder1}(\omega)E_0(\omega) \\ &= T_{decoder1}(\omega)T_{encoder}(\omega)F[e_i(t)] \end{aligned} \quad (4)$$

よってこのとき、 $T_{encoder} = T_{decoder1}^*$ であれば符号化前の光信号 $e_i(t)$ を再現することができ、これが自己相関波形となる。

同様に不一致符号で復号化を行った場合には、VBS後のスペクトルは(5)式のように表される。

$$E_u(\omega) = T_{decoder2}(\omega)F[e_0(t)] \quad (5)$$

これは(4)式と同様に展開することができ、 $T_{encoder} \neq T_{decoder2}^*$ の場合には元の光信号 $e_i(t)$ を再現することができなくなる。つまりピークが抑圧された相互相関波形が取り出される。これらの復号化の原理をFig. 8に示す。以上の原理を用いて、スペクトル制御による時間拡散符号生成・処理のシミュレーションと実証実験を行った。

VBSを用いたスペクトル制御により位相符号化後、トランスバーサルフィルタ(Transversal Filter: TVF)¹⁰⁾で復

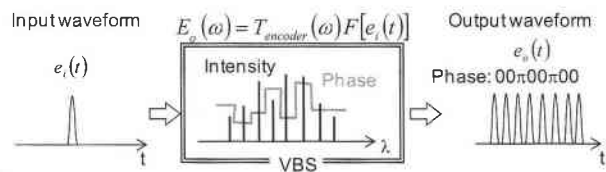


Fig. 7 Principle of optical code label generation.

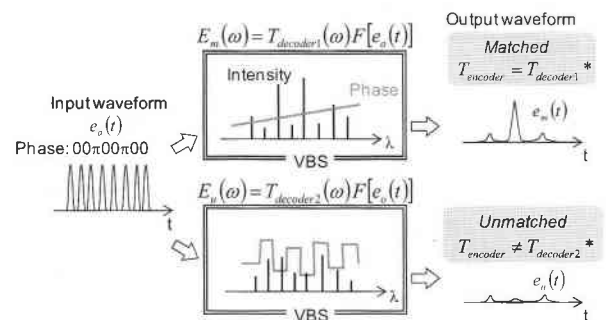


Fig. 8 Principle of optical code label processing.

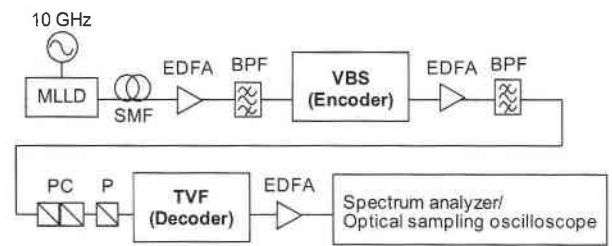


Fig. 9 Setup of label generation and processing.

号化を行う実験系をFig. 9に示す。MLLDから発振された10 GHzの光パルスはSMFを通り、EDFAによって光パワーの増幅をし、幅15 nmのバンドパスフィルタ(Band Pass Filter: BPF)により必要な帯域のみを切り出した。VBSでスペクトル制御し、時間拡散符号生成を行い、VBSから出力された光符号化信号をEDFAで増幅し、幅15 nmのBPFを通した。復号器として用いるTVFは偏波依存性があるため、偏波コントローラ(Polarization Controller: PC)と偏光子(Polarizer: P)を用いた。TVFで復号化を行い、復号化された光信号をスペクトルアナライザと光サンプリングオシロスコープを用いて観測した。使用したTVFで符号・復号化可能な最大チップ数は8 chipであり、チップ間隔は200 Gchip/sである。

10 GHzの光パルスを発振するMLLDと分解能10 GHzでスペクトル制御可能なVBSを用い、8 chip、200 Gchip/s、10 Gbpsの時間拡散BPSK(Binary Phase Shift Keying)符号生成を行った。本実験系を用いて制御可能な信号の速さは10 Gbpsの整数倍、チップ間隔は信号の速さ以上で10 Gの整数倍であり、これらはVBSのスペクトル制御可能帯域にも依存し、チップ数に関しては、入力パワーと信号の速さ、チップ間隔によるため、使用環境に合わせてパラメータを最適化することができる。符号化には位相符号#1(00π00π00)を用いた。スペクトル制御によって光パルスの符号化を行っているため、符号のパターン、チップ数やチップ間隔、中心波長は任意に変えることができる。

VBSを用いたスペクトル制御により、#1(00π00π00)の光符号ラベルを生成し、一致符号#1(00π00π00)と不一致符号#2(ππ0π0π00)、#3(ππππ0000)で復号化したシミュレーション結果をFig. 10、実験結果をFig. 11にそれぞれ示す。これらの符号は、自己相関で中心に高いピークが得られ、相互相関ではピークが抑圧されることをシミュレーションで確認できたため、実験に使用した。シミュレーションでは、符号化後の波形のみに着目している。Fig. 10の符号化後の波形は、Fig. 7の原理図の右側の出力波形に対応しており、チップパルス幅が2 ps、チップパルス間隔が5 ps、符号化された光パルスはMLLDから発振された光パルス間隔と同じ100 ps間隔である。つまり、Fig. 10(a)は、100 ps間隔に並んでいるパルスの1つを示したものである。

Fig. 11の時間波形において、符号化後の各チップのピーク強度が一定でないという課題があるが、8 chipの符号の全体の幅(40 ps)がシミュレーション結果とほぼ合っている。よって、時間波形の強度の制御はほぼでき

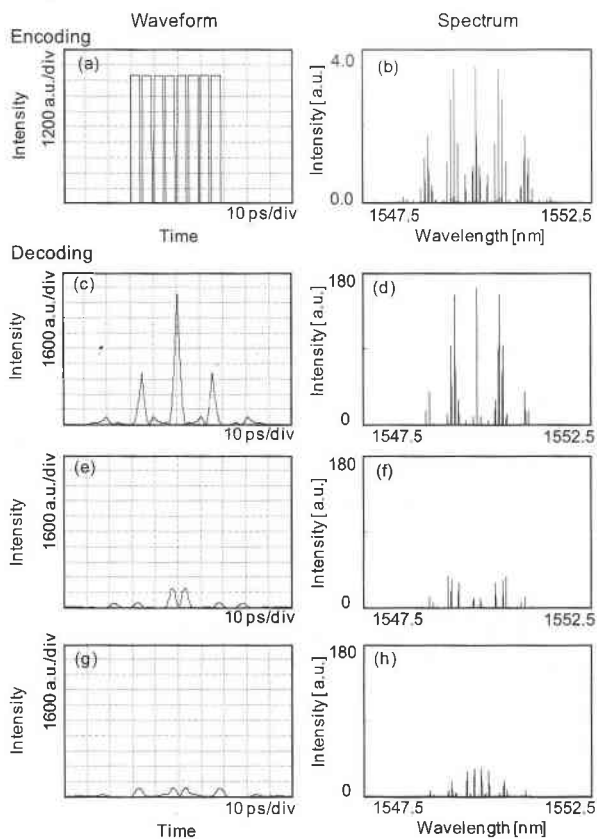


Fig. 10 Calculation results of optical label encoding/decoding.

- (a), (b) Encoding (00 π 00 π 00).
- (c), (d) Decoding of matched label (00 π 00 π 00).
- (e), (f) Decoding of unmatched label (π π 0 π 0 π 00).
- (g), (h) Decoding of unmatched label (π π π π 0000).

ていると考えられる。この時間波形の強度のばらつきやスペクトルの形状の補正を行うためには、VBSに入力する光源の波長特性等の詳細なパラメータを調べ、それらを考慮して、VBSによる制御値の最適化を行うことが有効であると考えられる。

Fig. 11 (c)の一致符号#1で復号化した時間波形は中心に高いピークが立っており、自己相関波形だと判断することができる。また、不一致符号である#2と#3で復号化した場合には中心のピークが抑圧されていることが確認できる。#2で復号を行った場合には、サイドローブが目立っているが、自己相関波形のピークの半分以下の強度に抑えられているため、識別を行うことはできると考えられる。しかし、高精度な符号・復号化を行うためには、これらのサイドローブをより抑圧できるよう検討する必要がある。実際の通信に用いる場合に一致・不一致の識別は、相関波形の中心部分を時間窓によって切り出し、それをフォトディテクタで検出した後、電気信号に変換し、しきい値処理により行う。これらの処理は、今後検討を行う予定である。

本論文では省略するが、VBSを光符号ラベルのマッチトフィルターとして用いられることも参考文献¹¹⁾で示している。

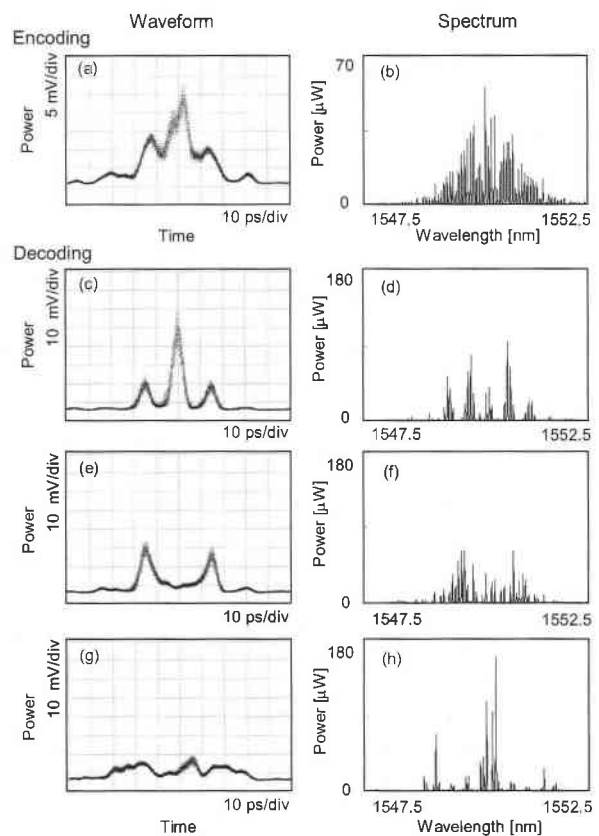


Fig. 11 Experimental results of optical label encoding/decoding.

- (a), (b) Encoding (00 π 00 π 00).
- (c), (d) Decoding of matched label (00 π 00 π 00).
- (e), (f) Decoding of unmatched label (π π 0 π 0 π 00).
- (g), (h) Decoding of unmatched label (π π π π 0000).

6. まとめ

フーリエ変換に基づいたスペクトル制御手法を用いて、光パルスの任意波形整形およびパラメータ可変の超高速光符号ラベル生成・処理のシミュレーションと実証実験を行い、その有効性を示した。

提案したVBSのパラメータは、波長分解能が10 GHz、制御波長帯域1538-1567 nm、チャンネル数340 ch、挿入損失9 dB、強度制御レンジ30 dB、位相制御レンジ 2π となっている。

光パルスのスペクトルの位相を制御することにより、FTLパルスに近い光パルス幅を得ることができ、光パルス幅を圧縮できることを実験的に実証した。また、光パルスの幅だけでなく、形状も任意に制御可能であることを示した。MLLDから発振されたsech²型の幅2 psの光パルスをスペクトル制御により、底辺が20 ps、40 psの三角形パルス、幅が10 ps、20 psの矩形パルスへの整形を行った。この光パルス整形手法では、整形後の光パルス幅や中心波長を任意に変化させることができる。これらの技術は光通信における光信号のチャープ補償や、転送部におけるゲート用矩形パルスの生成などに幅広く適用することが可能である。

さらに、光パルスの符号化を行うためのスペクトル制

御手法を提案した。VBSを用いてスペクトルの強度と位相の制御を行い、時間拡散BPSK符号生成・処理をシミュレーションと実験の両方から比較、検討した。VBSとTVFを用いてチップ数8 chip, チップ間レート200 Gchip/s, 伝送速度10 Gbpsの位相符号・復号化を行い、自己相関、相互相関の形状、ピーク強度を確認することにより、符号・復号化ができていないことを確認した。この光符号ラベル生成・処理手法では、生成・処理する符号のチップ数やチップ間隔を任意に変化させることが可能である。よって、ネットワークの需要に対応した光符号ラベルの生成・処理が実現可能である。

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。VBS試作に御協力頂きました(株)オプトクエスト依田 琢也氏に感謝致します。また、実験に御協力頂きました日本女子大学理学研究科、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) A. H. Gnauck, G. Chalet, P. Tran, P. Winzer, C. R. Doerr, J. C. Centanni, E. C. Burrows, T. Kawanishi, T. Sakamoto, and K. Higuma: OFC 2007, PDP19 (2007).
- 2) X. Wang and N. Wada: *J. Lightw. Technol.* **4** (2006) 3012.
- 3) V. J. Hernandez, W. Cong, J. Hu, C. Yang, N. K. Fontaine, R. P. Scott, Z. Ding, B. H. Kolner, J. P. Heritage, and S. J. B. Yoo: *J. Lightw. Technol.* **25** (2007) 79.
- 4) S. Anzai, Y. Komai, M. Mieno, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: *Opt. Express* **17** (2009) 4932.
- 5) Z. Jiang, D. E. Leaird, and A. M. Weiner: *Opt. Express* **13** (2005) 10431.
- 6) Y. Esumi, MD Kabir, and F. Kannari: *Opt. Express* **17** (2009) 19153.
- 7) M. M. Wefers and K. A. Nelson: *Opt. Lett.* **20** (1995) 1047.
- 8) S. Anzai, M. Mieno, Y. Komai, N. Wada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: *The Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) 2008, JThA25* (2008).
- 9) M. Mieno, Y. Komai, N. Wada, S. Shinada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: *Microoptics Conference (MOC) '08, E-2* (2008) 306.
- 10) N. Wada and K. Kitayama: *J. Lightw. Technol.* **17** (1999) 1758.
- 11) M. Mieno, Y. Komai, N. Wada, S. Shinada, T. Yoda, T. Miyazaki, and K. Kodate: *IEEE Photon. Technol. Lett.* **21** (2009) 860.