アレイ導波路格子を用いた時空間変換光信号処理と 通信および情報処理への応用

黒川 隆志, 竹ノ内 弘和*, 津田 裕之**

東京農工大学 工学部電気電子工学科 (〒184-8588 東京都小金井市中町2-24-16)

*日本電信電話(株) フォトニクス研究所 (〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮3-1)

**NTTエレクトロニクス(株) (〒311-0122 茨城県那珂郡那珂町戸6705-2)

Time-space-conversion Optical Signal Processing Using Arrayed-waveguide Grating and its Applications to Communication and Information Processing Systems

Takashi KUROKAWA, Hirokazu TAKENOUCHI,* and Hiroyuki TSUDA**

Tokyo University of Agriculture & Technology, 2-24-16 Nakamachi, Koganei, Tokyo 184-8588

*NTT Photonics Laboratories, 3-1 Morinosato-Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198

**NTT Electronics Corp., 6705-2 Nakamachito, Naka-gun, Ibaraki 311-0122

(Received February 28, 2000)

Ultra-short optical pulse shaping based on time-to-space conversion has been widely demonstrated by using free-space optics with diffraction grating pairs and lenses. We have proposed time-to-space conversion optical signal processing using an arrayed-waveguide grating. The arrayed-waveguide grating system has the advantages of a long time window, and well suites to handle subpico- to several picosecond pulses. Moreover, it is compact, compatible with fiber optics, and can be integrated with functional photonic devices. We introduce several applications of this technology to terabit communication systems, such as pulse shaping, dispersion compensation, differential processing, optical phase-shift keying detection and optical CDM encoder and decoder.

Key Words: Time-to-space conversion, Pulse shaping, Optical signal processing, Optical communication, Arrayed-waveguide grating

1. はじめに

短光パルスの時空間変換処理は、当初パルスの周波数スペクトルをホログラムとして記録するスペクトラルホログラフィとして1984年Mazurenkoによって提案された¹⁾。1988年Weinerらはホログラムの代わりに周波数面上に空間フィルタを置くことにより、実時間で光パルスの波形整形を行うことができることを示した²⁾。その後、この技術は光パルスを制御、観測する有効な手法として多くの研究がなされてきた³⁾。

一方爆発的な通信需要の増大に応えるため、広帯域光通信技術の開発が進められているが、100GHzをこえる信号を電気的に処理することは困難である。そこで将来のテラビット光ネットワークの実現のためには、光レベルでの様々な信号処理技術の開拓が必須となる。前述の時空間変換処理はこれを実現しうるキイテクノロジーの1つとして期待できるが、これまでの手法においては回折格子を用いているため、いくつかの大きな問題があった。それは

①光通信などの実際的な目標となるサブピコ〜ピコ秒

パルスを扱うには時間窓が小さすぎる

②近赤外の通信波長を対象とする場合大きな回折格子が必要となり、またこの波長での検討がほとんどないこと

③空間光学系であるため、コンパクトな装置化や光源などとの集積化が困難なこと

などである。

上記の課題を解決し、通信、情報処理への短光パルス応用を拡大するため、筆者らは従来の回折格子の代わりにアレイ導波路格子を用いて時空間変換処理を行うことを提案した⁴⁾。石英光回路からなるアレイ導波路格子は、これまで波長多重(WDM)光通信用の素子として開発されてきたが、この提案により超高速の光時間多重(TDM)通信においても新たな役割が提示されたことになる。

2. 時空間変換とアレイ導波路格子

2.1 アレイ導波路格子系と回折格子系の比較

時空間変換処理の原理をFig.1に示す。包絡線波形を $u_0(t)$ とする光パルスが回折格子のような分散素子に入射す

Fig.1 Principle of time-to-space conversion processing system.

ると、分散素子の遅延によりその出射面上で波形は $u_0(t - \beta x/c)$ のように変換される。ここで β は分散素子の回折能で、回折角を θ 、光のキャリア周波数を ν_0 として

$$\beta = \nu_0 \left| \frac{d\theta}{d\nu} \right| = \lambda_0 \left| \frac{d\theta}{d\lambda} \right| \quad (1)$$

と表される。この式でパルス波形は時間だけでなく、空間軸上にもマッピングされている。これは分散素子の出射面上で時間波形が $c\beta$ の速度で移動し、逐次的にフーリエ変換された像がレンズの焦点面上に形成されると解釈できる。したがってレンズの焦点面上にパルスの時間周波数スペクトルが空間的に展開されることになる。このスペクトルに空間フィルタで変調をかけてやり、逆の過程で戻せば入射パルスの波形は時間的に変調を受けたことになる。これは丁度、画像に対して空間フィルタリングをおこなうアナログ光演算処理の手法に対応している。

さてこの光学系で取り扱える時間窓(一度に処理できるパルス列の長さ) T_0 は一義的には分波素子における最大遅延時間によって決まり、

$$T = \frac{n\beta}{c} Nd = \frac{mN}{\nu_0} \quad (2)$$

となる。ここで d は格子(または導波路)のピッチ、 N は格子(または導波路)の本数、 m は回折次数である。分散素子として回折格子とアレイ導波路格子を用いた場合を比較してみよう(Fig.2)。アレイ導波路格子は石英の光導波路を規則的に多数ならべたもので、隣接する導波路間の長さは一定値づつ異なる⁵⁾。回折格子の場合、 $\beta = m\lambda/d \rightarrow \beta = m\lambda/d$ で与えられるが、格子のピッチ d と回折次数 m は独立ではないので、分散能を1より大きくすることができない。一方アレイ導波路格子の場合は隣接導波路間の長さ ΔL によって回折次数を任意に設定できる(通常数10~100)ので、分散能 $\beta = \Delta L/d$ は大きな値にすることができる。したがって(1)式から、回折格子系では通常 $m=1$ なので

$$T = \frac{N}{\nu_0} \quad (3)$$

となり、時間窓は回折格子の大きさ(即ち光ビームが照射する回折格子の本数)によって制限される。またアレイ導波

Fig.2 Diffraction grating (DG) and Arrayed-waveguide grating (AWG).

路格子系では

$$T = \frac{mN}{\nu_0} \quad (4)$$

となり、回折次数と導波路本数との積によって決まる。ここで N は実効的な導波路の本数であり時間窓幅が導波路アレイ中の最大遅延時間となっていることを示している。 N の値は通常100~500程度である。AWGは回折次数を導波路間遅延差の設計によって任意な大きな値に設定することができるので、大きな時間窓の処理が可能となる。一方取り扱える最小パルス幅 τ はこれまた一義的には分波素子の Free Spectral Range (FSR) によって決まるが、回折格子系では実際上焦点面に置かれる空間フィルタのサイズ H によって次のように制限される。

$$\tau \geq \frac{cf}{nd\nu_0^2 H} \quad (5)$$

AWGでは最小パルス幅はFSRによって決まり、

$$\tau \geq \frac{m}{\nu_0} \quad (6)$$

となる。結局パルス列において取り扱えるパルス数は、回折格子系では

$$K_{\max} = \frac{\nu_0 n H N d}{2cf} \quad (7)$$

またAWG系では

$$K_{\max} = \frac{N}{2} \quad (8)$$

となる。その様子をFig.3に示す。縦軸はパルス列におけるパルス数、横軸は単位パルスの幅を示す。その積が取り扱える最大のパルス列時間長(時間窓)となり、図からわかるようにアレイ導波路格子系においては回折次数の自由度により回折格子系よりも1桁以上大きく数100ピコ秒まで可能である。このことから光通信など当面のターゲットであるサブピコ秒からピコ秒パルスにアレイ導波路格子の適合性がよいことがわかる。

さらにAWG系においては通信波長帯での設計が容易であり、ファイバとの接続、アライメントフリーでコンパクトな装置化が可能なことなど、実用的な観点から多くの利点が期待される。

2.2 アレイ導波路格子を用いた処理系

アレイ導波路格子を用いた具体的な処理系をFig.4に示す。アレイ導波路格子はシリコン基板上に製作された石

Fig.3 Pulse processing performance comparison between AWG and DG at wavelength of 1.55 μm .

Fig.4 Schematic of time-to-space conversion processing system using AWG.

英の平面光回路で、多数の導波路が規則的にならんだ導波路アレイとその両側に配置された2つのスラブ導波路、および入力用の導波路からなる。導波路は単一モードの設計となっている。光ファイバから入力用光導波路を介して入射した信号光は、最初のスラブ導波路においてひろがり導波路アレイに分配される。スラブ導波路の両側はそれぞれの反対側の端を中心とする円弧で形成されているのでレンズとして機能し、入射用導波路からの光は等位相で各導波路に結合される。導波路アレイ中の各導波路の長さは少しずつ異なっているので、光は各導波路から一方方向に一定の遅延をもって第二のスラブ導波路に入射する。第二のスラブ導波路の入射端も同様な円弧状となっているのでレンズとして機能し、入射信号光のスペクトルが円弧状に結像する。実際には光回路の外の自由空間上に結像するように構成され、結像面に反射形の空間フィルタを配置した。したがって、空間フィルタから反射した光は再度アレイ導波路格子を戻りファイバに出力される反射形の構成となっている。これは透過型とした場合、完全に同じ形状の対象なアレイ導波路格子をつくることは光回路が大きくなり製造上難しくなるためである。入射光と出射光の分離を図るために、サーキュレータを用いた。なお、空間フィルタが曲面でなく平面であるため信号光に対して分散をもつことになるが、これはフィルタ設計時にその分散分を補償するように設計することなどの方法で解決することができる。

光源として半導体レーザまたはCr/YAGモードロックレーザを用い、またパルス波形の観測にはクロスコリレータを用いて、次節でのべる応用実験をおこなった。

3. 通信情報処理への応用

3.1 光パルス整形

光通信のみならず全ての高速光パルスの応用において任意波形のパルス列発生は有用である。時空間変換処理を利用した、モードロックレーザのモード位相制御によるパルス列制御はそれを行う一つの有効な方法であり、光パルスシンセサイザの一種とも言える⁶⁾。一例として、パルスの繰り返し周波数を2倍倍するには、Fig.5に示すようにモードロックレーザの隣接するモード間の位相差を $\pi/2$ にすればよい。これは時空間変換処理において、このような位相変調に対応した空間フィルタを用意することで容易に実現できる。これまでパルスの通倍方法として長尺の光ファイバの分散を利用してモード間の位相差を制御する方法があるが⁷⁾、この方法では独立にモード位相を制御できない。時空間変換処理による方法では、いろいろな位相変調パターンの空間フィルタを用意することで独立にモード位相を制御し、任意形状のパルスおよびパルス列の整形が可能となる⁸⁾。Fig.6に繰り返し20GHzの半導体モードロックレーザのパルス列を時空間変換処理によって、2通倍および任意整形した実験結果を示す。任意パルスの発生では各モードに対して $(\dots, 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \dots)$ の位相変調を加えた。出力波形はクロスコリレーションによって測定した。

Fig.5 Principle of frequency doubling based on time-to-space conversion processing.

Fig.6 Experimental results of frequency doubling (20 GHz to 40 GHz) and pulse shaping.

3.2 分散補償

超高速光通信システムにおいて光ファイバの分散補償は重要な課題である。二次分散補償は分散補償ファイバやファイバグレーティング⁹⁾によりほぼ可能であり、特に問題となるのが三次分散補償と可変分散補償である。時空間変換処理では短光パルスの任意の位相補償が可能なので、三次以上の高分散補償にも適用できる¹⁰⁾。また可変の空間フィルタ(空間変調器など)を利用して可変の分散補償も可能である。Fig.7にAWG(導波路本数340, 回折次数59)を用いた場合の最大補償可能な二次分散値と三次分散値のパルス幅依存性を示す。トランスフォームリミットのガウシアンパルスを仮定した。パルス幅が狭い場合、分散による波形の広がりが大きく時間窓幅を超えてしまうため、最大補償値が小さくなる。光ファイバの三次分散は $0.1\text{ps/nm}^2 \cdot \text{km}$ 程度なので、約10psのパルスに対しては十分な補償能力と考えられる。Fig.8に三次分散補償用のフィルタを付けたAWGに光パルスを入射したときの実験結果を示す。1.1psの非対称な入力パルスに対して設計値 $+0.3\text{ps/nm}^2$ のフィルタでは0.9psの対象なパルスに整形され

Fig.7 Total second- and third order dispersion that can be compensated as a function of the input unchirped Gaussian pulsewidth when $m = 59$, $N = 340$, $v_0 = 193$ Hz.

Fig.8 Input waveform and the output waveforms with third-order dispersion control.

た。また設計値 -0.76ps/nm^2 のフィルタでは三次分散の影響でパルス端部に振動が生じていることが観測された。

3.3 微分処理

空間フィルタリングによるアナログ画像処理では、画像の輪郭抽出などを行うために微分フィルタを用いる。同様な手法をこの技術に適用すれば時間波形の微分ができることになる。厳密な微分フィルタは振幅と位相の両方の変調が必要だが、フィルタの作製が難しくまた光の損失も大きい。そこで次式

$$H(\omega) = i \cdot \text{sgn}(\omega - \omega_0) \quad (9)$$

のようなキャリア周波数の前後で位相を π 変えた疑似微分フィルタを用いてパルス波形の微分を行った結果をFig.9に示す¹¹⁾。入射光はCr/YAGレーザーの幅1.2psのチャープのないパルスである。微分された波形振幅は正負にまたがった波形となっているはずだが、クロスコリレーションで強度を観測しているのでダブルのピークとなっており、シミュレーションともよく一致している。また入射パルスにチャープがある場合にはチャープ量に比例した強度変化があらわれるが、これを利用してパルスのチャープを求めることもできる¹²⁾。

Fig.9 Experimental results on differential processing. (a) Measured input pulse waveform, (b) Measured output pulse waveform, (c) Calculated waveforms.

3.4 位相変調検出への応用

前期の微分処理の手法を用いて、位相変調された光信号の検出に応用することができる。現在の光通信システムは強度変調光信号の直接検波方式で構成されている。位相変調方式の場合、ピーク強度が小さいためファイバの非線形性の問題が緩和される利点があるが、受信器の構成が複雑になるなどの原因で実用にいたっていない。位相変調光信号に対する比較的簡単な構成の受信回路を実現するために、微分処理によって位相変調信号を強度変調信号に変換することができる¹³⁾。すなわち、位相変調信号を

$$u(\omega) = u_0 \exp(i\phi(t)) \exp(i\omega_0 t) \quad (10)$$

とすると、その微分出力は

$$u'(\omega) = iu_0 \phi'(t) \exp(i\phi(t)) \exp(i\omega_0 t) \quad (11)$$

となるので、位相の時間微分、すなわち位相変調による周波数シフトに比例した強度の光出力が得られる。Fig.10にその実験結果を示す。(a)は送信用位相変調器のドライバーの駆動波形、(b)は位相変調後の駆動波形、(c)は伝送された光信号波形、(d)は時空間処理による出力波形、(e)はフリップフロップにより復元された受信波形で送信波形がNRZ信号に変換されて復元されている。

3.5 光符号化多重への応用

光通信ネットワークの伝送容量増大のために、これまで時間多重(TDM)、波長多重(WDM)が導入されてきた。これらと組み合わせて効率的なネットワークを構成する1つの方法として光符号化多重(CDM)の導入も検討されている。CDMでは送信側で信号の符号化を行い、複号化する受信側と1対1の関係が確立されるが、このときの符号化、複号化を光レベルで高速に行うことが技術的に重要な課題となる。時空間変換技術において空間フィルタを用いて

Fig.10 Measured waveforms in PM-AM conversion using an AWG and a differential filter. (a) Driving waveform applied to LN phase modulator, (b) launched waveform modulated by the phase modulator, (c) Transmitted waveform, (d) PM-AM converted optical signal, (e) Recovered signal with a low pass filter.

Fig.11 Experimental setup for spectral encoding and decoding.

符号化、複号化をテラビット級の高速の信号に対しておこなうことができる。この構成をFig.11に示す¹⁴⁾。送信側において光信号はAWG encoderで符号化される。空間フィルタにM系列の二値の位相フィルタを用いた。受信側に全く同じパターンの空間フィルタをもつAWG decoderを配置することで信号の複号化がなされる。仮にdecoderの空間フィルタのパターンをわずかにencoderのそれと変えると信号は復元されない。このような構成で10Gb/s, 810fsのRZ信号を40km伝送してエラーフリーの復号がおこなえることが確認されている。

4. まとめ

時空間変換による短光パルスの整形や信号処理はこれまで多くの研究がなされてきたが、通信や情報処理への具体的応用は少ない。本稿ではアレイ導波路回折格子を用いることにより、これらの応用が視野に入ってくることを紹介した。さらに今後の進展のためにはアレイ導波路回折格子の更なる高分解能化、高速の位相変調器アレイの開発、単一の基板への集積化等についての発展が期待される。

謝 辞

本研究をすすめるにあたりNTTフォトニクス研究所の岡本 勝就特別研究室長、長沼 和則主任研究員ほか多くの研究所の方々の協力をえた。ここに感謝の意を表する。

なお本稿の一部は国際コミュニケーション基金の助成を得てまとめたものである。

参考文献

- 1) Mazurenko: Opt. Spectr. **56** (1984) 357.
- 2) A. M. Weiner, J. P. Heritage, R. J. Hawkins, R. N. Thurston, E. M. Kirschner, D. E. Leaird, and W. J. Tomlinson: Phys. Rev. Lett. **61** (1988) 2445.
- 3) A. M. Winer and A. M. Kan'an: IEEE J. Selected Topics Quant. Electron. **4** (1998) 317.
- 4) T. Kurokawa, H. Tsuda, K. Okamoto, K. Naganuma, H. Takenouchi, Y. Inoue, and M. Ishii: Electron. Lett. **33** (1997) 1890.
- 5) H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi: J. Lightwave Technol. **12** (1994) 989.
- 6) T. Kobayashi, A. Morimoto, M. Doi, B. Y. Lee, and T. Sueta: *Ultrafast Phenomena VI* (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1988) p.135.
- 7) S. Arahira, S. Kutsuzawa, Y. Matsui, D. Kunitatsu, and Y. Ogawa: J. Lightwave Technol. **16** (1998) 405.
- 8) 津田 裕之, 石井 哲好, 佐藤 憲史, 竹ノ内 弘和, 長沼 和則, 杉田 彰夫, 岡本 勝就, 黒川 隆志: 1998年 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会講演論文集 1 (1998) p.298.
- 9) M. Durkin, M. Ibsen, M. J. Cole, and R. I. Laming: Electron. Lett. **33** (1997) 1891.
- 10) H. Tsuda, K. Okamoto, T. Ishii, K. Naganuma, Y. Inoue, H. Takenouchi, and T. Kurokawa: IEEE Photon. Technol. Lett. **11**(5) (1999) p.569.
- 11) H. Takenouchi, H. Tsuda, K. Naganuma, T. Kurokawa, Y. Inoue, and K. Okamoto: Electron. Lett. **34**(12) (1998) p.1245.
- 12) H. Takenouchi, H. Tsuda, T. Goh, K. Okamoto, C. Amano, and T. Kurokawa: IEICE Trans. Commun. **E82-B**(8) (1999) p.1252.
- 13) H. Takenouchi, H. Tsuda, C. Amano, T. Goh, K. Okamoto, and T. Kurokawa: in OSA TOPS Vol.29 WDM components (1999) p.222.
- 14) H. Tsuda, H. Takenouchi, T. Ishii, K. Okamoto, T. Goh, K. Sato, A. Hirano, T. Kurokawa, and C. Amano: Electron. Lett. **35**(14) (1999) p.1186.

レーザーワード

時空間変換(time-to-space conversion)

100GHz以上の超高速の光信号を時間軸上で直接処理することは困難である。しかし時間信号と信号スペクトルとはフーリエ変換により1対1の関係があるから、信号スペクトルを処理すれば時間信号を処理したことになる。ここで時間軸上の光信号を空間軸上のスペクトルに展開する手法が時空間変換と呼ばれる技術である。光パルスを

分散素子に入射すると、分散素子の出射面に沿って遅延が生じ光パルス波形は空間的に展開される。これをレンズによってフーリエ変換すれば、レンズの焦点面上に信号スペクトルが展開される。逆の光学系によって、空間軸上のスペクトルを時間軸上の光信号に変換できる。

(黒川 隆志)