

超高速時空間変換を用いた超短パルス光の信号処理

小 西 毅

Ultra-Fast Spatio-Temporal Conversion and Processing

Tsuyoshi KONISHI

Ultra-fast spatio-temporal conversion and processing is described. An ultra-short pulse is expected to be an ultimate information media in the next generation of optical communication because of its ultra-short temporal duration and ultra-high bandwidth. However, an ultra-short pulse requires ultra-fast processing which can not be achieved only by current electronic technologies. One promising approach to overcome this issue would be the substitution of an ultra-fast processing with a parallel processing. To realize such a substitution, various time-space conversion techniques have been already proposed. Especially, to realize parallel manipulation of both time and frequency variables, a novel technique is described for mapping time and frequency to a two-dimensional spatial plane.

Key words: ultra-short pulse, time-space conversion, time-frequency transform, spectrogram

現在、超短パルス光を情報の媒体としてとらえた次世代光通信の検討が精力的に進められている¹⁾。すでに、超短パルス光の長距離伝送などの基礎実験では、素晴らしい成果があげられている²⁾。超短パルス光を情報媒体として利用する信号多重化の方式として、OTDM (optical time division multiplexing)²⁾、WDM (wavelength division multiplexing)³⁾、OCDM (optical code division multiplexing)⁴⁾が挙げられる(図1)。帯域の広い超短パルス光を情報の媒体に用いることは、現在のエレクトロニクス技術の限界を超えることを意味しており、光の特徴を生かした信号処理を実現する新しい工夫が必要となる。これは、次世代の光通信のパラダイムであるフォトニックネットワークの開発の大きな動機ともなっている光・電気変換におけるボトルネックの問題とも共通している⁵⁾。

光波の記述の基本であるマクスウェルの方程式をみればよくわかるように、光波の時間と空間の多次元パラメータは互いに関係をもっている。この関係を上手に利用することが、現在のエレクトロニクス技術の限界を克服し、光

の特徴を生かす方法として注目されている⁶⁻¹³⁾。本稿では、時間と空間のパラメータを置き換えるインターフェース技術として、時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開する「時空間変換」の研究を中心に、超高速処理への応用について解説する。

1. 超短パルス光と時空間変換

超短パルス光の波形を制御する代表的な技術として、時空間変換を用いたパルス整形技術がある¹⁰⁾。 ω_c の中心周波数をもつ超短パルス光の光波は、一般に次式で表される。

$$u(t) = u_0(t) \cdot \exp(-j\omega_c t) \quad (1)$$

一方、図2における回折格子直後の光波は、次式で表される。

$$u(t; x_0) = w(x_0) \cdot u_0\left(t - \frac{\alpha x_0}{c}\right) \cdot \exp(-j\omega_c t) \quad (2)$$

ここで、 w は回折格子の窓関数、 α は単位周波数変化に対する回折角度の変化量を表す。レンズを用いてフーリエ変換した後には得られる光波分布(スペクトル分布)は、次

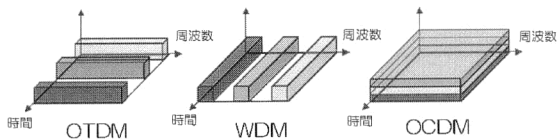


図1 光通信における多重化方式.

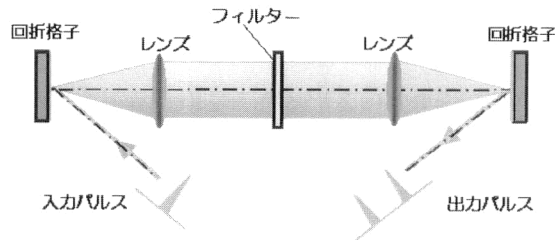


図2 パルス整形光学系.

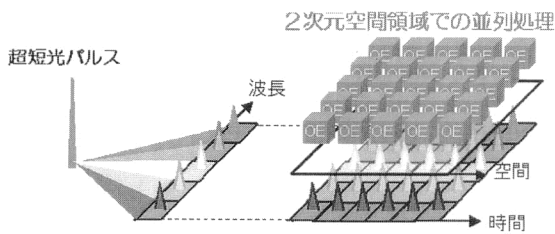


図3 時間と周波数の二次元分布の二次元空間への展開.

式で表される.

$$U(t, \omega; x_1) = W(\omega, x_1) \cdot U_0(\omega - \omega_c) \approx U_0(x_1) \quad (3)$$

ここで、 W および U_0 はそれぞれ窓関数 w と複素振幅 u_0 のフーリエ変換である. 近似的にスペクトル分布は空間分布に一致するので、超短パルス光のスペクトルの空間的な変調により時間波形の制御が可能となる. このパルス整形における空間領域へのスペクトル分解のことを一般的に「時空間変換」とよぶことが多い. 光通信における OTDM, WDM, OCDM などの多重化方式に対して、将来的には超短パルス光のもつ時間と周波数(波長)を並列に制御することが望まれる. 空間領域の二次元並列性を生かして、時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開する新しい「時空間変換」が提案・実現されている¹¹⁻¹⁴⁾(図3).

2. 時間と周波数の二次元情報の二次元空間への展開

2.1 時間と周波数の二次元的なとらえ方

時間信号に含まれる時間と周波数の情報の二次元的なとらえ方は、時間-周波数変換として、信号処理の分野で体系化されている¹⁵⁾. 時間-周波数変換は、時間信号 $s(t)$ を任意の局在的な直交関数系に展開する変換である. 最も簡単な短時間フーリエ変換の例を図4に示す. 処理の結果として、次式で表される局在的なスペクトル分布の時系列な集

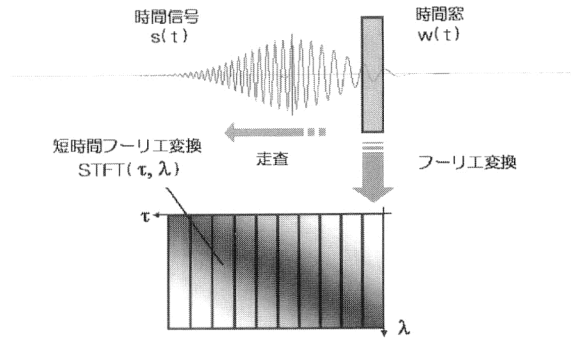


図4 短時間フーリエ変換の概念図.

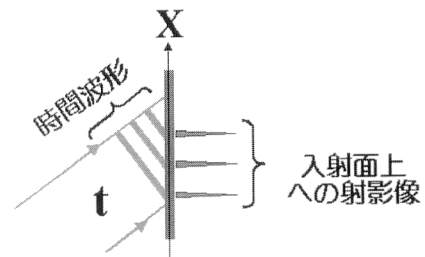


図5 時間波形の空間面への射影.

合(二次元分布)が得られる.

$$STFT(\tau, \omega) = FT[s(t) \cdot w(t - \tau)] \quad (4)$$

ここで、 FT はフーリエ変換を表す. この短時間フーリエ変換は、局在的な時間窓をもつテンプレート波形との相関処理を行っていることと等価である. さらに、このテンプレート波形に用いられる直交関数系としてさまざまな関数系を選ぶことが可能であり、変換自体に信号処理の考え方を導入することができる.

2.2 光学的実現

時間と周波数の二次元情報を二次元空間面に展開するためには、分光技術を利用して周波数情報を空間に展開する従来の時空間変換に加えて、時間情報を空間に直接展開する直接時空間変換が必要となる. 式(2)は超短パルス光が空間面を移動することを意味しており、例えば、図5に示すように空間面に適当な角度をつけて入射された超短パルス光は、空間面にその瞬間的な射影像をつくる. この射影像は、時間的な分布に対応しているため、瞬間的な直接時空間変換を実現することができる^{12,16,17)}. 直接時空間変換後の信号を空間的に並列に配置された変調デバイスアレイにより変調する場合、アレイ数に応じてデバイスの立ち下りの緩和時間は比較的長くてもよい. これは、デバイスが再応答するのは、全アレイデバイスの処理が一巡した後になるからである.

図6に、時間と周波数の二次元情報を二次元空間上へ展

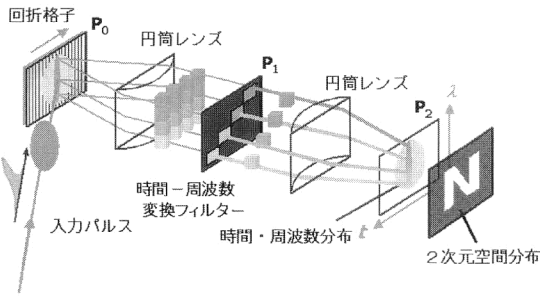


図6 時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開する光学システム。

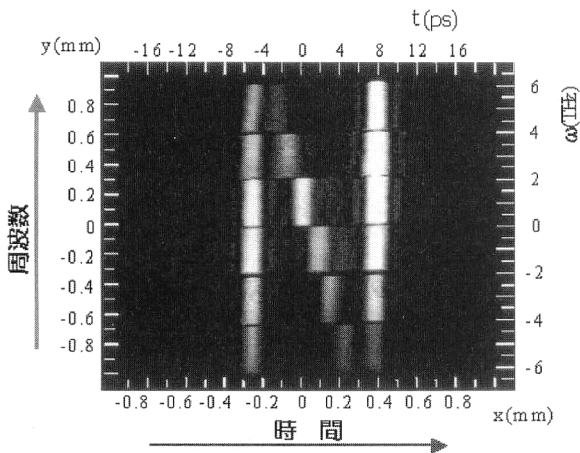


図7 超高速の展開により得られた文字画像“N”。

開する光学システムの例を示す。システムは、回折格子と2枚の円筒レンズと二次元空間フィルターから構成されている。回折格子に斜め入射された超短パルス光の時間波形は、瞬間的に回折格子に射影される。この射影像が出力面に結像され、水平軸に瞬間的な時間波形が得られる。同時に回折格子によって水平方向に分光された光波は、二次元空間フィルター（時間-周波数変換フィルター）によって垂直方向に異なるスペクトル成分が切り出され、スペクトル分布の軸が垂直軸に回転して出力面に結像される。その結果、時間と周波数の二次元情報が二次元空間面に展開される。出力面に超高速時間ゲートを用いることにより、展開した瞬間的な二次元空間分布を固定化して観察することができる。実証実験の例として、文字画像“N”に対応する時間と波長の二次元情報をもつ変調超短パルス光から得られた二次元空間面への変換結果を図7に示す。各空間チャンネルあたりの展開速度は数百フェムト秒である¹⁴⁾。

3. 応用例

3.1 超高速光スペクトログラム計測

時間と波長の二次元情報を二次元空間に展開する機能を超短パルス光の計測に応用することにより、周波数分布の

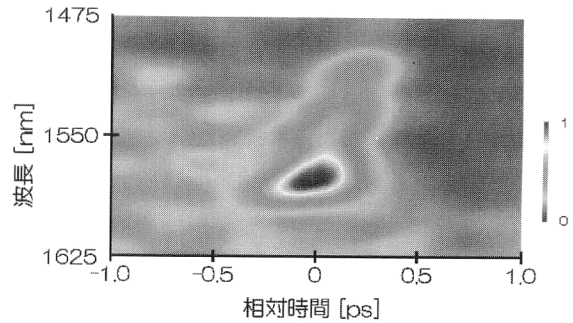


図8 超高速光スペクトログラムの計測結果。

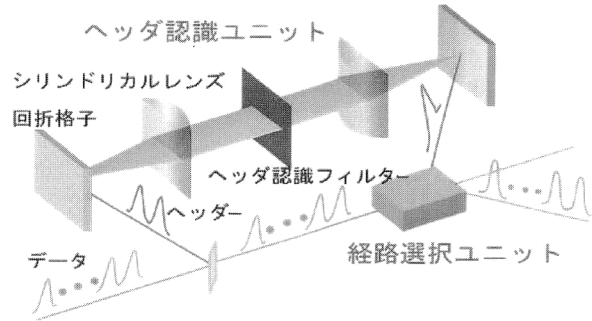


図9 超高速光ヘッダー認識システムの概念図。

時間的な変化である光スペクトログラムを空間的な干渉縞として計測することができる^{18,19)}。既知の超短パルス光の振幅と位相を基準にすることにより、信号超短パルス光の振幅と位相を求めることができる。原理的にシングルショット計測が可能である。図8に、超短パルス光の光スペクトログラムの計測結果を示す。

3.2 超高速光ヘッダー認識

空間領域での光相関処理を用いることにより、フォトリックネットワークにおける光ヘッダー認識処理の実現が可能である。時間と周波数の二次元情報を二次元空間に展開するために用いるテンプレート波形の直交関数系として、複数のヘッダー信号波形群を採用することにより、複数のヘッダー信号波形の並列認識が可能となる。基礎実験として、特定のひとつのヘッダー信号をテンプレート波形に用いた超高速ヘッダー認識実験が行われている²⁰⁾ (図9)。

現在、時間と波長の二次元情報を二次元空間に展開する機能の光学的実現方法の確立がようやく終わったところであり、今回紹介した応用例はその特徴のごく一部のみを用いたものである。このほか、超高速 A/D 変換処理、超高速信号に対する暗号化処理等の機能の発現が可能である^{21,22)}。このように、今後、空間領域の光技術のもつ二次元並列性を活用したさらに新しい機能を創出することが期待される。

最後に、本研究の遂行に多大なご協力を賜りました奈良工業高等専門学校一岡芳樹校長（大阪大学名誉教授）ならびに（財）大阪科学技術センター尾下善紀氏，ほかの皆様へ深く感謝いたします。また、本研究は、文部科学省都市エリア産学官連携促進事業（大阪/和泉地域）の一部援助を受けて行った。

文 献

- 1) 末田 正, 神谷武志: 超高速光エレクトロニクス (培風館, 1991).
- 2) M. Nakazawa, H. Kubota, K. Suzuki, E. Yamada and A. Sahara: "Ultra-high-speed long-distance TDM and WDM soliton transmission technologies," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (2000) 363-396.
- 3) S. Kawanishi, H. Takara, K. Uchiyama, I. Shake and K. Mori: "3 Tbit/s (160 Gbit/s/spl times/19 channel) optical TDM and WDM transmission experiment," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 826-827.
- 4) K. Kitayama: "Novel spatial spread spectrum based fiber optic CDMA networks for image transmission," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, **12** (1994) 762-772.
- 5) 北山研一: "21世紀ネットワークの創造と限りないインパクト", *電子情報通信学会誌*, **85** (2002) 298-305.
- 6) Y. T. Mazurenko: "Pulsed Fourier optics," *Opt. Spectrosc.*, **57** (1984) 1-6.
- 7) J. P. Heritage, R. N. Thurston, W. J. Tomlinson, A. M. Weiner and R. H. Stolen: "Spectral windowing of frequency-modulated optical pulses in a grating compressor," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 87-89.
- 8) K. Ema: "Real-time ultrashort pulse shaping and pulse-shape measurement using a dynamics grating," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30** (1991) 2046-2049.
- 9) P. C. Sun, Y. T. Mazurenko and Y. Fainman: "Femtosecond pulse imaging: Ultrafast optical oscilloscope," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 1159-1170.
- 10) A. M. Weiner: "Femtosecond Fourier optics: Shaping and processing of ultrashort optical pulses," *Trends in Optics and Photonics*, ed. T. Asakura (Springer Verlag, Berlin, 1999) pp. 223-246.
- 11) Y. Ichioka and T. Konishi: "Temporal-spatial optical information processing," *Proc. SPIE*, **3137** (1997) 222-227.
- 12) T. Konishi and Y. Ichioka: "Ultrafast image transmission by optical time-to-two-dimensional-space-to-time conversion," *J. Opt. Soc. Am. A*, **16** (1999) 1076-1088.
- 13) K. Iwamoto, T. Konishi, J. Tanida and Y. Ichioka: "Two-dimensional image transmission based on the ultrafast optical data format conversion between a temporal signal and a two-dimensional spatial signal," *Appl. Opt.*, **40** (2001) 6527-6534.
- 14) Y. Oshita, T. Konishi and Y. Ichioka: "Ultrafast time-to-two-dimensional-space conversion system using SHG crystal," *Opt. Rev.*, **9** (2002) 141-145.
- 15) L. Cohen: *Time-Frequency Analysis* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995).
- 16) K. G. Purchase, D. J. Brady and K. Wagner: "Time-of-flight cross correlation on a detector array for ultrafast packet detection," *Opt. Lett.*, **18** (1993) 2129-2131.
- 17) T. Konishi, H. Furukawa, Y. Ichioka, K. Nakagawa, M. R. Melloch and D. D. Nolte: "Direct time-space conversion of ultra-fast pulses based on interferometric time-of-flight cross correlation using a fast optical addressable spatial light modulator," *Opt. Quantum Electron.*, **33** (2001) 1063-1076.
- 18) T. Konishi and Y. Ichioka: "Optical spectrogram scope using time-to-two-dimensional space conversion and interferometric time-of-flight cross correlation," *Opt. Rev.*, **6** (1999) 507-512.
- 19) K. Tanimura, T. Konishi, K. Itoh and Y. Ichioka: "Amplitude and phase retrieval of ultrashort optical pulse using optical spectrogram scope," *Opt. Rev.*, **10** (2003) 77-81.
- 20) T. Konishi, T. Kotanigawa, K. Tanimura, H. Furukawa, Y. Oshita and Y. Ichioka: "Fundamental functions for ultrafast optical routing by temporal frequency-to-space conversion," *Opt. Lett.*, **26** (2001) 1445-1447.
- 21) T. Konishi, K. Tanimura, Y. Oshita and Y. Ichioka: "All optical analog-to-digital converter by using self-frequency shift in fiber and pulse shaping technique," *J. Opt. Soc. Am. B*, **19** (2002) 2817-2823.
- 22) T. Konishi, Y. Oshita, K. Itoh and Y. Ichioka: "Encrypted ultra-fast image transmission by using OTDM/WDM scheme," *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **5** (2003) 365-369.

(2003年5月14日受理)