

超高速全光アナログ-デジタル変換

小 西 毅・伊東 一良

Ultra-Fast All-Optical Analog-to-Digital Conversion

Tsuyoshi KONISHI and Kazuyoshi ITOH

Ultra-fast all-optical analog-to-digital conversion by using self-frequency shifting in a fiber and a pulse-shaping technique is described. An optical approach has been attracting interest to aim at breakthrough in various fields including the optical communication now. In analog-to-digital conversion, the purposes of optical sampling and optical quantization are in the possibility of the speed-up of sampling and quantization processes using various ultra-fast nonlinear phenomena depending on an intensity of a light. As a result of a preliminary experiment, variable digitized pulse patterns are generated by variation of an intensity of an ultra-short analog input pulse.

Key words: ultrashort pulse, analog-to-digital conversion, optical communication, self-frequency shift

現在、光通信をはじめとするさまざまな分野で光化によるブレイクスルーを目指す動きがある。光通信における伝送実験については、すでにテラビット級の伝送実験例が多数報告されているが、伝送されてきた超高速信号の処理をどのようなアプローチで実現するかについては、現在活発に検討されている状況にある¹⁾。誤解を恐れずに書けば、現在利用されている信号はすべてデジタル信号とみなしたアナログ信号である。例えば、デジタル化された信号が劣化してアナログ的な要素が顕著になると、信号の再デジタル化である波形整形が必要となる²⁾。このことから、デジタル信号を重畳する信号媒体自体がアナログ的な要素を含んでいることは明らかである。一方で、情報の統合性、耐雑音性などの観点から、現在の技術体系の中での処理や記録、そして伝送に適した信号形態は、やはりデジタル信号であり、信号媒体と信号形態のインターフェースとしてのアナログ-デジタル変換は、光通信に限らずあらゆるシステムで必須のものとなっている。このアナログ-デジタル変換の性能を示す指標としては、ビット分解能とサンプリングレートが挙げられる。アナログ-デ

ジタル変換のビット分解能とサンプリングレートは応用によって決まるが、一般にトレードオフの傾向にある³⁾。例えば、最も高いサンプリングレートを必要とする例である衛星通信応用では、ビット分解能が数ビット程度であるのに対し、サンプリングレートのほうは、数十ギガヘルツに達する。このようなアナログ-デジタル変換を光化する目的は、1) 光の強度に依存するさまざまな非線形現象の超高速性を利用した量子化プロセスの高速化の可能性と、2) 光サンプリング技術に裏づけされたサンプリングレートの高高速化の可能性にある。

本稿では、これらの従来の研究の課題を解決することにより、筆者らが新規に開発した超高速アナログ-デジタル変換の手法⁴⁾を中心に解説する。

1. アナログ-デジタル変換と光化の課題

一般に、アナログ-デジタル変換は、サンプリング処理、量子化処理、デジタル符号化処理から構成される(図1)。アナログ-デジタル変換の光化の研究は、過去に DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency)

大阪大学大学院工学研究科生命先端工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1 GSE コモンイースト 10 階)
E-mail: konishi@mls.eng.osaka-u.ac.jp

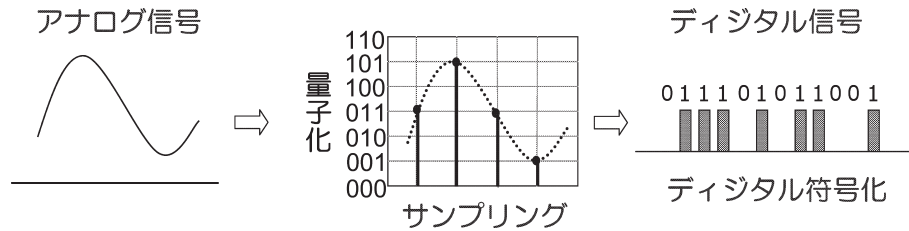


図1 アナログ-デジタル変換処理の概要.

のプロジェクトのひとつとして進められた経緯もあり、これまでにさまざまなアプローチが多数提案されている⁴⁻¹⁸⁾。代表的なものを簡単に紹介する。超高速アナログ電気信号をデジタル信号に変換するために光を用いるアプローチとして、超高速アナログ電気信号のサンプリングと信号の低速化を実現するために超短パルス光を用いた例がある⁵⁻⁸⁾。超高速アナログ電気信号により変調された超短パルス光を光ファイバー内の分散効果などを利用して伸長し、電気的な処理で扱える帯域までの超高速信号の低速化を行う。その後、電氣的に量子化およびデジタル符号化を実現しているが、光変調素子の線形性などに課題が残るとされている。超高速アナログ光信号を超高速デジタル光信号に変換するアプローチとして、光ソリトンにおける高次ソリトンへの分岐を利用した光量子化も提案されているが、量子化のレベル数などに課題が残る^{16,17)}。また、超短パルス光であるキャリア信号と超高速アナログ光信号とを同期させて光ファイバー内に入力し、強度に依存した非線形光学効果による波長シフトにより超高速アナログ光信号の強度値を波長に変換する例があるが、キャリア信号との同期などに課題が残る¹⁴⁾。

サンプリング処理の光化は、すでに光サンプリングオシロスコープなどの計測装置にも導入されているように技術的にはかなり進んできている¹⁹⁾。量子化処理の光化については、二値レベルの量子化と等価な超高速光スイッチの研究はかなり進んでいるが、二値レベルからマルチレベル量子化への展開はあまり進んでいない³⁾。デジタル符号化処理については、超高速な符号化技術としての波形整形技術の研究がかなり進んでいる^{20,21)}。このような状況から、超高速光アナログ-デジタル変換の実現には、量子化処理の光化が重要な鍵となると考えられる。

2. 光ファイバー内の自己周波数シフトを用いた光マルチレベル量子化

2.1 光ファイバー内の自己周波数シフト

超短パルス光は、光ファイバー内でさまざまな非線形効果を引き起こす^{22,23)}。その中で、光の強度に依存する現象

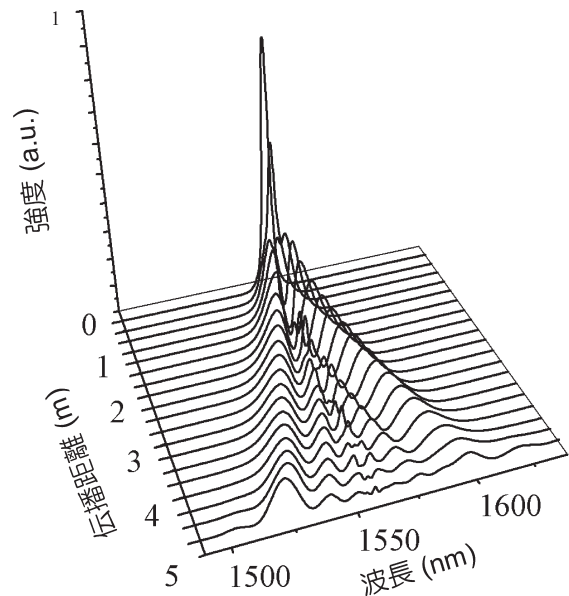


図2 自己周波数シフト現象のシミュレーション結果.

に自己周波数シフトがある。例えば、ラマン自己周波数シフトによる入力パルスの中心周波数 ω_c の変化は、次のような式で与えられる²³⁾。

$$\frac{d\omega_c}{dZ} = \frac{8}{15} \sigma_R I^2 \quad (1)$$

ここで、 Z は光ファイバー内の伝播距離、 σ_R は自己誘導ラマン効果の係数、 I は入力パルスの強度である。式(1)は入力パルスの強度の二乗に比例して、ラマン自己周波数シフトが増加することを示している。また、実験では、分散したパルスが光ファイバー内を伝播した場合に、強度 I に比例して中心周波数がシフトすることが確認されている²³⁾。

図2に、非線形シュレーディンガー方程式をもとに、スプリットステップフーリエ法²³⁾を用いてこの自己周波数シフト現象をシミュレートした結果を示す。計算では、高非線形ファイバーの有効コア面積を $10 \mu\text{m}^2$ 、損失係数を 0.63 dB/km 、分散パラメーターを $+0.04 \text{ ps/nm/km}$ 、分散スロープを $+0.03 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ 、ラマン散乱係数を $0.05/\text{m}$ とした。また、パルスの中心波長を 1560 nm 、パルス幅を

0.4 ps, パルスを入力平均強度を 4.5 mW, 光源の繰り返し周波数を 50 MHz, 高非線形ファイバー長を 5 m として計算した。図 2 から, パルスが高非線形ファイバー内を伝播するに従って, スペクトル分布がもとの中心周波数を中心に左右にシフトしていく様子がわかる。

図 3 に, アンチストークス側の自己周波数シフトによる中心周波数のシフト量の強度依存性を示す。計算には, 図 2 のシミュレーションで用いた高非線形ファイバーと同じもので, ファイバー長が 2 m のものを用いている。入力パルスの強度に比例して, 中心波長が短波長側にシフトしている様子がわかる。

2.2 光ファイバー内の自己周波数シフトを用いた光マルチレベル量子化

特別な素子や同期信号を用いずに, マルチレベルの光量子化を実現する方法として, 筆者らは, 上述の光ファイバー内の自己周波数シフトを用いた光マルチレベル量子化を提案している。図 4 にその概念図を示す。光ファイバー内の自己周波数シフトによる中心周波数のシフト量は, 式 (1) で表されるように入力パルスの強度に依存する。特に, アンチストークス側の自己周波数シフトによる中心周波数のシフト量は, 強度に比例する。したがって, 自己周波数シフトを用いることにより, 入力パルスの強度に応じて中心周波数を変化させた出力パルスを波長分散素子を用いて分離し, 量子化することができる。この結果, 特別な素子や同期信号を用いない光マルチレベル量子化処理を実

現することができる。100 nm を超える自己周波数シフトの報告もあり, 非常にレベル数の多い光マルチレベル量子化処理を実現することが可能となる²⁴⁾。

3. 光マルチレベル量子化処理を用いた超高速全光アナログ-デジタル変換

図 5 に, 光マルチレベル量子化処理を用いた超高速全光アナログ-デジタル変換システムの構成を示す。図には, 光サンプリング後のアナログ信号を対象とした光量子化処理, デジタル符号化処理のみについて示している。デジタル符号化処理の実現には, パルス波形整形技術に基づく光符号器もしくは, 固定の PLC (planar light-wave cir-

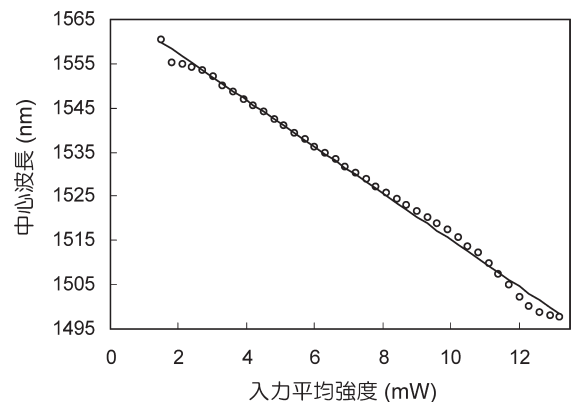


図 3 アンチストークス側の自己周波数シフトによる中心周波数のシフト量の強度依存性。

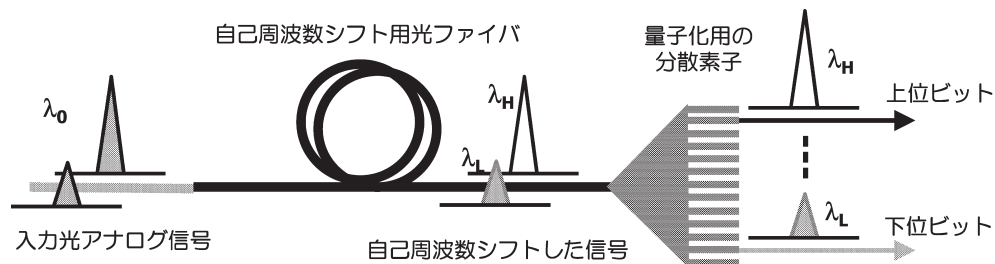


図 4 光ファイバー内の自己周波数シフトを用いた光マルチレベル量子化の概念図。

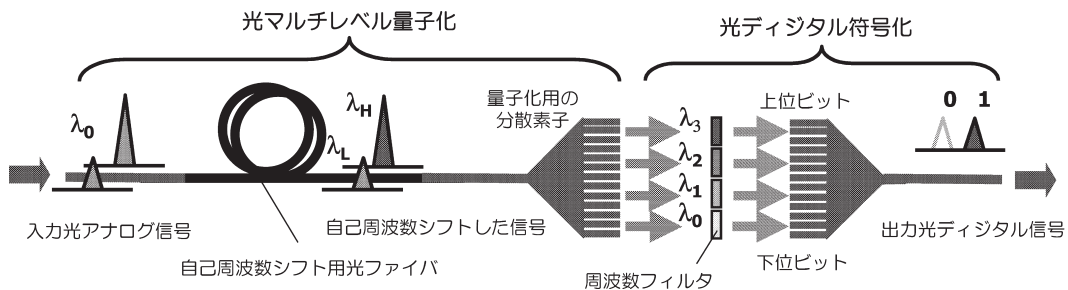


図 5 光マルチレベル量子化処理を用いた超高速全光アナログ-デジタル変換システムの構成図。

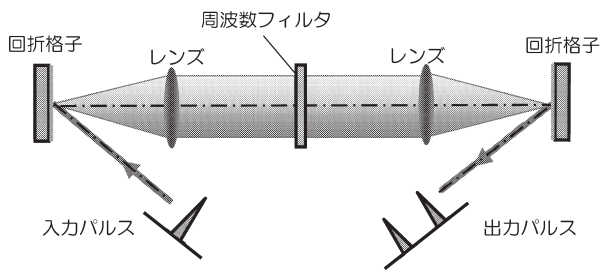


図6 典型的なパルス波形整形の原理図。

cuit) を用いた光遅延回路などにより構成される光符号器を用いることができる。

図6に、パルス波形整形の典型的な原理図を示す。このパルス波形整形の操作は、次式で近似的に与えられる。

$$S_{\text{code}}(t) = FT_{\text{time}} [S_{\text{orig}}(X:\omega) \cdot F_{\text{code}}(X:\omega)] \quad (2)$$

ここで、 $S_{\text{code}}(t)$ 、 $S_{\text{orig}}(X:\omega)$ 、 $F_{\text{code}}(X:\omega)$ はそれぞれ、波形整形により符号化された信号、入力パルスのスペクトル分布、符号化用の周波数フィルタの分布である。また、 FT_{time} は時間に関するフーリエ変換を表す。符号化用の周波数フィルタの分布を設計することにより、原理的に任意のパルス波形を整形することができる。この原理に基づいて、PLC回路の一種であるAWG (arrayed waveguide grating) を分散素子として用いた符号器も数多く提案されている²⁵⁾。

光ファイバー内の自己周波数シフトを用いた光マルチレベル量子化処理により波長分散素子から分離出力された出力パルスは、上述の対応した光符号器によりそれぞれ異なる符号に変換される。この結果、超高速全光アナログ-デジタル変換が実現される。

4. 超高速全光アナログ-デジタル変換の実験例

光マルチレベル量子化処理を用いた超高速全光アナログ-デジタル変換システムの原理確認実験を行っている^{4,26)}。ここでは、光符号器にAWGとVOA (variable optical attenuator) により構成したパルス波形整形技術に基づく光符号器⁴⁾、および固定の光遅延回路により構成した光符号器²⁶⁾を用いた実験例を紹介する。前者はパルス光のスペクトル分布の影響が符号化後の波形に残るものの、安定して超高速信号が得られる特徴をもつ。一方、後者は、遅延回路の経路の違いによる安定性に問題が残るものの、パルス光のスペクトル分布が符号化後の波形に影響しない特徴をもつ。

AWGとVOAにより構成したパルス波形整形技術に基づく光符号器を用いた実験系を図7に示す。光量子化には、図2のシミュレーションおよび図3の実験による波長シフト特性をもつ2mの高非線形ファイバーを利用して、フェムト秒ファイバーレーザーからの出力パルス光の強度を、可変アテニュエーター (ATT) を用いて調節し、光サンプリング後のアナログ信号とみなした。強度を調節したパルス光を2mの高非線形ファイバーを伝播させ、自己周波数シフトにより中心波長を変化させる。強度に応じて中心波長を変化させたパルス光をAWG1に入射させることで、波長の違いを利用して異なる強度の信号に分離する。分離した信号を対応したVOAに入力し、周波数フィルタリングを行う。フィルタリング後の信号を再びAWG2により合波することで、入力信号光強度に応じて異なるデジタル信号に符号化する。図8に、各強度に応じて得られたデジタル信号の自己相関波形の結果を示す。実験結果より、平均強度7.9 mW、8.2 mW、8.4 mW

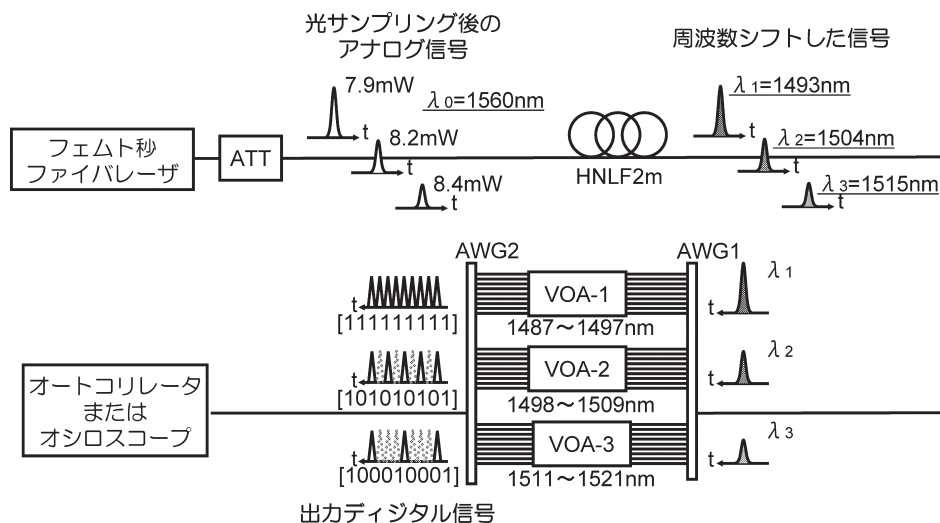


図7 パルス波形整形技術に基づく光符号器を用いた超高速全光アナログ-デジタル変換実験系。

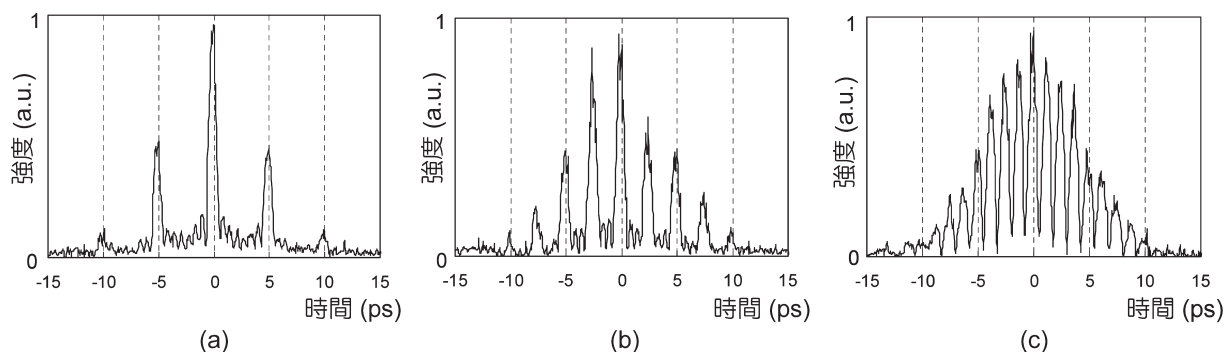


図8 異なる強度をもつ入力光アナログ信号に対して得られた光デジタル信号の自己相関波形の結果。平均強度；(a) 7.9 mW, (b) 8.2 mW, (c) 8.4 mW.

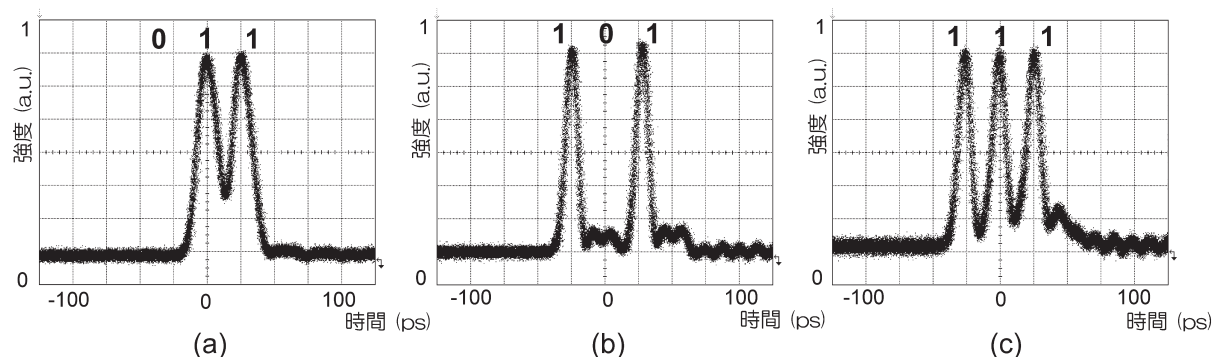


図9 異なる強度をもつ入力光アナログ信号に対して得られた光デジタル信号の時間波形の結果。平均強度；(a) 8.9 mW, (b) 9.9 mW, (c) 10.4 mW.

の異なる強度をもつ3つの入力アナログ信号に対して、1.25 ps 間隔の異なるデジタル信号が得られていることがわかる。

最後に、光遅延回路により構成した光符号器を用いた実験例を示す。図7の実験系とは、符号器の部分を除いて全く同じ構成である。図9に、各強度に応じて得られたデジタル信号の時間波形の結果を示す。実験結果より、平均強度 8.9 mW, 9.9 mW, 10.4 mW の異なる強度をもつ3つの入力アナログ信号に対して、1.25 ps 間隔の異なるデジタル信号が得られていることがわかる。

光通信の分野では、時間、波長だけでなく、振幅、位相をはじめとするさまざまな光の物理的なパラメータの活用による信号の多重化が現在進められている^{27,28)}。今回紹介した信号形態間のインターフェースとしての超高速全光アナログ-デジタル変換は、信号の多重化に加えて、光化において利用することのできる信号の形態の自由度をさらに拡張することができる技術であると位置づけられる。また、パルス波形整形技術、PLC 技術をはじめとするさまざまな技術を境界なく活用することにより、非線形光学

効果をもつ高非線形光ファイバーや AWG などの受動光学デバイスを超高速光デバイスとして用いた全光処理を実現している。光通信をはじめとするさまざまな分野で現在進められている光化においては、個々のデバイスにおける光化での利点だけでなく、システム全体での総合的な光化の利点を出せるかどうかは課題である。その中でも、すでに伝送において光が導入されている光通信分野は、その他の部分での光化の利点を直接生かしやすい分野であるといえ、今後、さまざまな技術を境界なく活用していくことにより、新しい光化技術が創出されることが期待される。

最後に、本研究の遂行に協力してくれた大阪大学大学院工学研究科西谷隆志君ほかの皆様へ厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 例えば、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.
- 2) T. Durhuus, C. Joergensen, B. Mikkelsen, R. J. S. Pedersen and K. E. Stubkjaer: “All optical wavelength conversion by SOA's in a Mach-Zehnder configuration,” IEEE Photonics Technol. Lett., 6 (1994) 53-55.
- 3) B. L. Shoop: *Photonic Analog-to-Digital Conversion* (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001).

- 4) T. Konishi, K. Tanimura, K. Asano, Y. Oshita and Y. Ichioka: "All-optical analog-to-digital converter by use of self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique," *J. Opt. Soc. Am. B*, **19** (2002) 2817-2823.
- 5) A. S. Bhushan, F. Coppinger and B. Jalali: "Time-stretched analogue-to-digital conversion," *Electron. Lett.*, **34** (1998) 1081-1083.
- 6) B. Jalali, F. Coppinger and A. S. Bhushan: "Photonic time-stretch offers solution to ultrafast analog-to-digital conversion," *Opt. Photonics News*, December (1998) 31-32.
- 7) F. Coppinger, A. S. Bhushan and B. Jalali: "Photonic time stretch and its application to analog-to-digital conversion," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **47** (1999) 1309-1314.
- 8) D. H. Chang, H. Erlig, M. C. Oh, C. Zhang, W. H. Steier, L. R. Dalton and H. R. Fetterman: "Time stretching of 102 GHz millimeter waves using novel 1.55-mm polymer electro-optic modulator," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **12** (2000) 537-539.
- 9) J. C. Twitchell: "Extending the performance of optically sampled time-demultiplexed analog-to-digital converters," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2000*, Vol. 39 of OSA Trend in Optics and Photonics (Optical Society of America, Washington, D.C., 2000), paper CFMZ.
- 10) P. W. Juodawlkis, J. C. Twitchell, G. E. Betts, J. J. Hargreaves, R. D. Younger, J. L. Wasserman, F. J. O'Donnell, K. G. Ray and R. C. Williamson: "Optically sampled analog-to-digital converters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **49** (2001) 1840-1853.
- 11) T. R. Clark, J. U. Kang and R. D. Esman: "Performance of a time- and wavelength-interleaved photonic sampler for analog-digital conversion," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **11** (1999) 1168-1170.
- 12) P. Rabiei and A. F. J. Levi: "Analysis of hybrid optoelectronic WDM ADC," *J. Lightwave Technol.*, **18** (2000) 1264-1270.
- 13) R. Urata, R. Takahashi, V. A. Sabnis and D. A. B. Miller: "Ultrafast differential sample and hold using low temperature grown GaAs MSM for photonic A/D conversion," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **13** (2001) 717-719.
- 14) P. P. Ho, Q. Z. Wang, J. Chen, Q. D. Liu and R. R. Alfano: "Ultrafast optical pulse digitization with unary spectrally encoded cross-phase modulation," *Appl. Opt.*, **36** (1997) 3425-3429.
- 15) L. Brzozowski and E. H. Sargent: "All-optical analog-to-digital converters, hard limiters, and logic gates," *J. Lightwave Technol.*, **19** (2001) 114-119.
- 16) Y. Yamamoto, A. Maruta and K. Kitayama: "A quantization scheme based on soliton phenomena for all-optical analog-to-digital conversion," *Conference on OECC/IOOC 2001* (Sydney, Australia, 2001) pp. 595-596.
- 17) S. Oda and A. Maruta: "2-bit all-optical analog-to-digital conversion by slicing supercontinuum spectrum and switching with nonlinear optical loop mirror and its application to quaternary ASK-to-OOK modulation format converter," *IEICE Trans. Commun.*, **E88-B** (2005) 1963-1969.
- 18) K. Ikeda, J. M. Abdul, S. Namiki and K. Kitayama: "Optical quantization and coding for ultrafast A/D conversion using nonlinear fiber-optic switches based on Sagnac interferometer," *Opt. Express*, **13** (2005) 4296-4302.
- 19) N. Yamada, S. Nogiwa and H. Ohta: "640-Gb/s OTDM signal measurement with high-resolution optical sampling system using wavelength-tunable soliton pulses," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 1125-1127.
- 20) 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.
- 21) T. Konishi and Y. Ichioka: *Optical Information Processing: A Tribute to Adolf Lohmann* (SPIE Press, Washington, 2002) pp. 311-341.
- 22) A. Hasegawa and Y. Kodama: *Solitons in Optical Communications* (Oxford U. Press, New York, 1995).
- 23) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 2nd ed. (Academic Press, Boston, 1995) pp. 51-55.
- 24) N. Nishizawa, R. Okamura and T. Goto: "Analysis of widely wavelength tunable femtosecond soliton pulse generation using optical fibers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 4768-4771.
- 25) K. Takiguchi, T. Kominato, H. Takahashi and T. Shibata: "Flexible pulse waveform generation using a silica waveguide based spectrum synthesis circuit," *Conference on Optical Fiber Communications Conference*, Tu15 (2004).
- 26) T. Nishitani, T. Konishi and K. Itoh: "Integration of a proposed all-optical analog-to-digital converter using self-frequency shifting in fiber and a pulse-shaping technique," *Opt. Rev.*, **12** (2005) 237-241.
- 27) M. Ohm and J. Speidel: "Quaternary optical ASK-DPSK and receivers with direct detection," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15**, (2003) 159-161.
- 28) 菊池和郎: "光位相情報の活用を目指した光複素振幅測定システムの構築", 第52回応用物理学関係連合講演会, 30p-ZH-5 (2005) p. 91.

(2005年8月17日受理)