

光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer



田中 洋介 (Yosuke TANAKA, Dr. Eng.)

東京農工大学大学院工学研究院先端電気電子部門
准教授

(Division of Advanced Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Associate Professor, Tokyo University
of Agriculture and Technology)

電子情報通信学会 応用物理学会 日本光学会 IEEE OSA
SPIE 会員

著書：黒川 田中「プラスチックオプティカルファイバの基礎と実
際 (小池 宮田監修) 第1章-第3章 pp.3-30 NTS 2000年

研究専門分野：光エレクトロニクス

黒川 隆志 (Takashi KUROKAWA, Dr. Sci.)

東京農工大学大学院工学研究院先端電気電子部門
教授

(Division of Advanced Electrical and Electronic Engineering,
Faculty of Engineering, Professor, Tokyo University of
Agriculture and Technology)

電子情報通信学会 応用物理学会 日本光学会 IEEE OSA 会員

受賞：2007年 応用物理学会フェロー表彰 1990年 OEC'90 国際
会議 最優秀論文賞 1989年 MOC/GRIN'89 国際会議 最優秀論
文賞

著書：演習で身につくフーリエ解析 (黒川 隆志・小畑 秀文著) 共
立出版 2005年 光機能デバイス 共立出版 2004年 光情報通
信技術ハンドブック コロナ社 2003年 光情報工学 (黒川隆志
編著 / 滝沢國治 編著 / 徳丸春樹 著 / 渡辺敏英 著) コロナ社
2001年 プラスチックオプティカルファイバの基礎と実際 エ
ヌ・ティー・エス 2000年

研究専門分野：光エレクトロニクス

あらまし 高度情報通信ネットワーク社会構築の大前提として、超高速光通信による大容量通信の実現が挙げられる。近年、高速光デバイスの発展に伴い、数 10 Gbps の光信号伝送が実現されている。しかし、更にその先にある 100 Gbps を超える信号伝送が行われるようになったとき、それらを電氣的に整形、処理することは、電気回路の帯域制限から極めて難しい。そこで、筆者らは光信号を光信号のまま高速処理する「時空間変換光信号処理技術」を用いた光パルスシンセサイザの研究を進めてきた。光パルスシンセサイザは、入射光信号の位相・振幅スペクトルを自在に制御することが可能で、原理的に 100 Gbps を超える高速信号であっても任意のパケットパターンを整形可能である。これにより、将来の超高速時間分割多重光通信の可能性がひらかれてくる。また、光パルスシンセサイザの持つ帯域 100 GHz を越すスペクトル処理能力を活かすことで、極めて短い光パルスを合成することが可能となる。

本稿では、光パルスシンセサイザによる高速光信号パケットの自動整形、ならびに様々な光パルスの光ファイバ伝搬特性評価への応用を紹介する。

1. はじめに

現在、情報通信ネットワークには、文字、音声、静止画、動画など様々な情報が飛び交っている。伝送データ容量の増大は留まることを知らず、最近では立体映像データの伝送まで求められている。このような大量の情報伝送を実現するために、高速な光通信システムの開発が急務となっている。光通信は、光自体の周波数が 200 THz もの高周波であるため、原理的には、数 100 Gbps の高速信号であっても伝送可能となる。技術の進歩に伴い、最近では 40 Gbps の変調器が既に製品化され、市場に出ている。しかし、今後、必要な信号伝送速度が数 100 Gbps 以上になると、電気回路の帯域制限から、もはや電氣的な制御方法では対応できない。

そこで、筆者らは、「時空間変換光信号処理」を原理とする光パルスシンセサイザを開発し、電氣的な信号処理の限界を超える 100 Gbps 以上の超高速な光信号の整形、制御を検討した。パルス光シンセサイザを用

光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer

いれば、100 Gbps の光信号に対し実時間で特定の処理を施したり、100 Gbps のパケット生成が可能になる。こうした応用は、複数のデジタル信号を時間領域で一定の間隔で配置して伝送する時分割多重 (Time division multiplexing : TDM) 光通信の超高速化につながる。また、帯域 100 GHz を越すスペクトル処理能力を活用すると、超短光パルスや、ソリトン光通信のための種パルスを自在に生成することができる。本稿では、光パルスシンセサイザとその応用について、これまでの成果のいくつかを紹介する。

2. 時空間変換光信号処理と光パルスシンセサイザ

超高速な光信号として、例えば、100 Gbps 8bit の光信号パケットを考えてみる。この信号パケットは、1 または 0 に対応する 8 つの信号列からなる。1 つの信号パルスはわずか 10 ピコ秒、パケット全体で 80 ピコ秒と極めて短い。このような超高速信号を正面から時間領域の操作で生成したり、処理したりすることは、特に電気回路の処理速度の制限から、非常に難しい。しかし、所詮 1 と 0 の信号を作るだけなの単純な話なので、何か打開策はありそうに思える。

ここで、例え話をしたい。引越して、次から次へとトラックから積みおろされる荷物の仕分けをするとき、どうするだろうか。一人でそれぞれの荷物を所定の場所に運ぶのでは、時間もかかるし身も持たない。この種の単純作業は、大勢の手伝いを借りるに限る。各人に予め担当の荷物と運ぶ場所を割り当てておけば、あとはそれぞれ自分が担当する荷物だけに集中すればよいので、一人一人は特に急がなくてもあつという間に仕事は片付いてしまう。実は、時空間変換光信号処理は、これと全く同じことをする。光信号を異なる周波数成分に分け、それぞれを平行して処理するのである。

光信号の異なる周波数成分を分離するには、回折格子を使えばよい。回折格子からの出射光は、周波数毎に異なる方向に進む。この過程は、光信号の時間から空間への変換と解釈できるため、時空間変換と呼ばれる。回折格子によって得られる空間ビームの強度分布は、もとの光信号の強度スペクトルと同じ形をしている。そこで、出射ビームを適当な透過率分布や位相分

布をもったフィルタに通し、各周波数成分の強度や位相を並列に制御する。あとは、再び回折格子によって、各周波数成分を合成すれば、所望の時間波形を有する光信号が得られる。これが時空間変換光信号処理で、高速なデバイスを用いることなく、光信号の並列処理によって高速信号の生成や制御が可能な有効な手段である。

時空間変換光信号処理は当初、短光パルスの記録と生成の観点から提案された^{(1),(2)}。フェムト秒の短光パルスは、非常に広い周波数帯域に渡ってスペクトル成分を持つため、大きな回折格子が必要になる。しかし、光通信に必要な光パルスは、超高速な場合でも 10 ピコ秒から数ピコ秒程度なので、大きな回折格子は必要ない。また、高い安定性が要求される実際の光通信システムへの応用を考えると、空間光学系の利用は望ましくない。

そこで、実際の光通信に応用可能なよう、アレイ導波路格子(Arrayed waveguide grating: AWG)⁽³⁾をベースとする光導波路による時空間変換光信号処理が提案されている(図 1)^{(4),(5)}。AWG は波長分割多重 (Wavelength division multiplexing: WDM) 光通信システムの分波器として開発されたデバイスだが、その分光機能に着目すれば、時空間変換光信号処理に活用できる。しかも、AWG は光通信用デバイスのため、コンパクトで安定性を備えているのは勿論のこと、光通信にマッチした周波数分解能と時間幅で波形整形ができる。これは、一般の回折格子が 1 次の回折を利用するのにに対し、AWG では高次の回折光を利用することによる。

開発した光パルスシンセサイザは、AWG の出力導波路それぞれに強度制御器、位相制御器、ミラーを取り付けたもので、4 インチの石英基板上にモノリシックに集積化されている。AWG の出力導波路数は 30 チャネルで、隣接チャネル間隔は 12.5 GHz である。光パルスシンセサイザへの入射光は、AWG のチャネルと同じ中心周波数、および周波数間隔を持つスペクトルをもつ必要がある。このようなコムスペクトルは、2 台の LN 位相変調器の縦列接続により生成でき、30 本以上の平坦で安定なスペクトルの発生が確認されている。

光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer

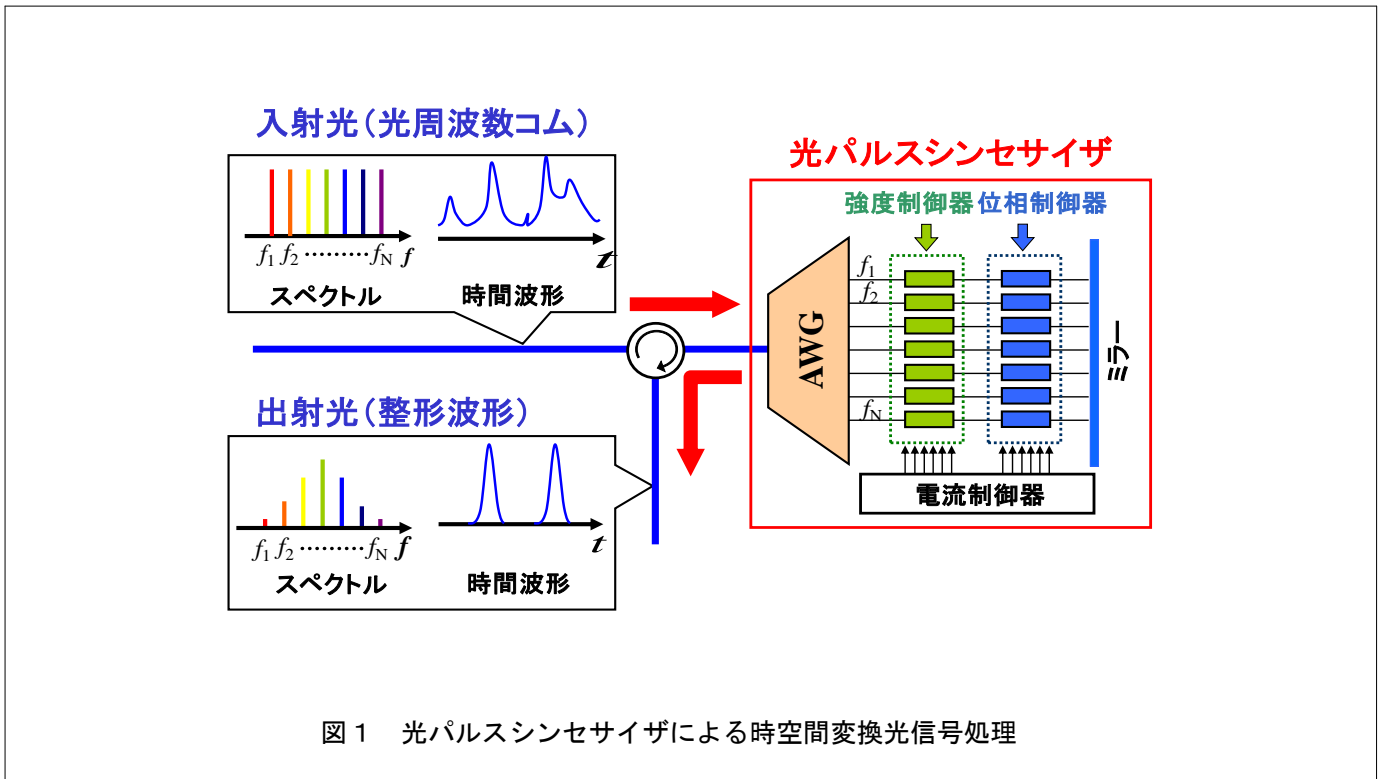


図1 光パルスシンセサイザによる時空間変換光信号処理

3. 高速光信号パケットの自動生成

開発した光パルスシンセサイザを用いて、まず 100 Gbps 8bit の光信号パケットの生成を試みた⁽⁶⁾⁻⁽¹⁰⁾。図2に入射光のコムスペクトルを示す。このコムスペクトルの強度と位相を光パルスシンセサイザによって、所望の光信号パケットが得られるように調整した。光スペクトルの強度調整は、単純に光スペクトラムアナ

ライザの出力を観測して行えばよいので簡単に行える。一方、光スペクトルの位相を直接観測する手法はないため、遺伝的アルゴリズム(Genetic algorithm: GA)を用いたフィードバック制御系を構築した(図3)。この制御系では、光パルスシンセサイザの出力波形を自己相関器、または高速な光サンプリングオシロスコープで観測し、目標波形との誤差ができるだけ小さくなる

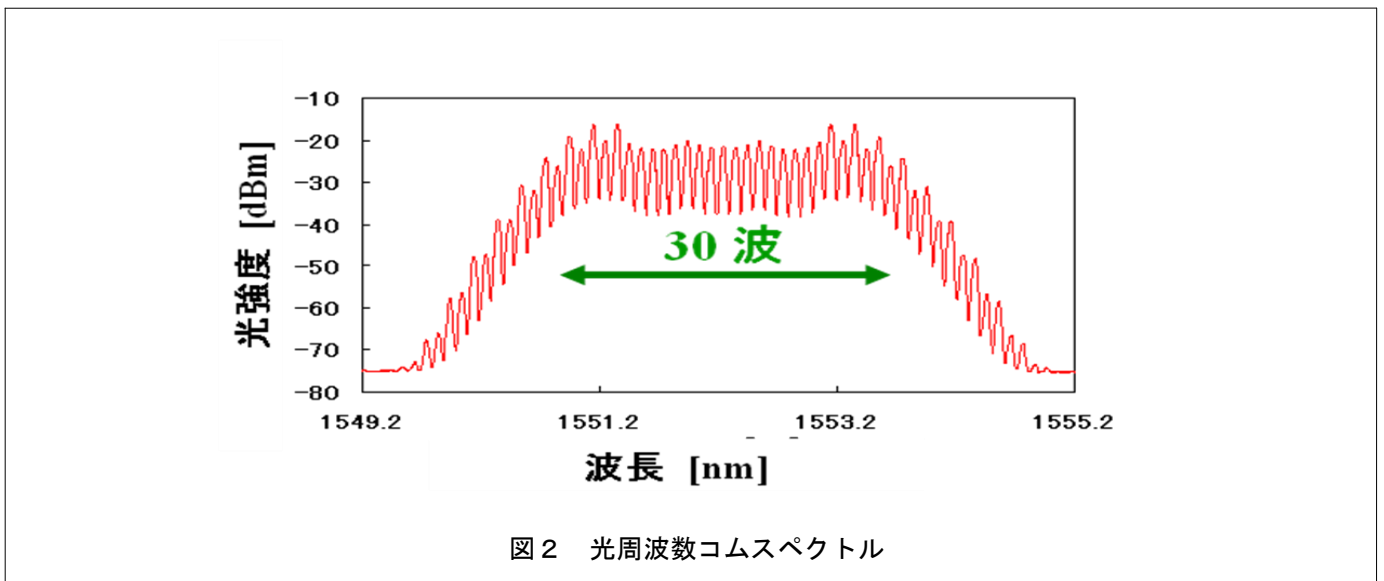
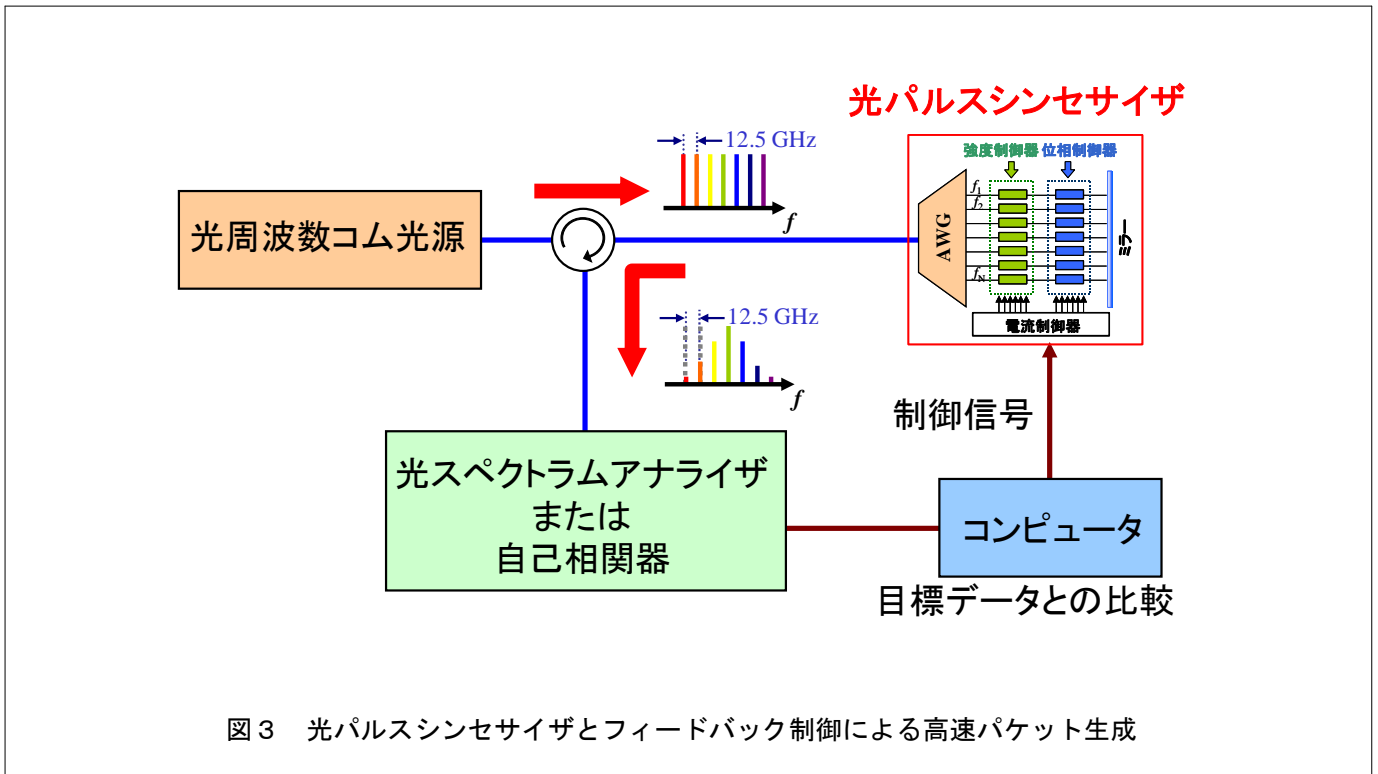


図2 光周波数コムスペクトル

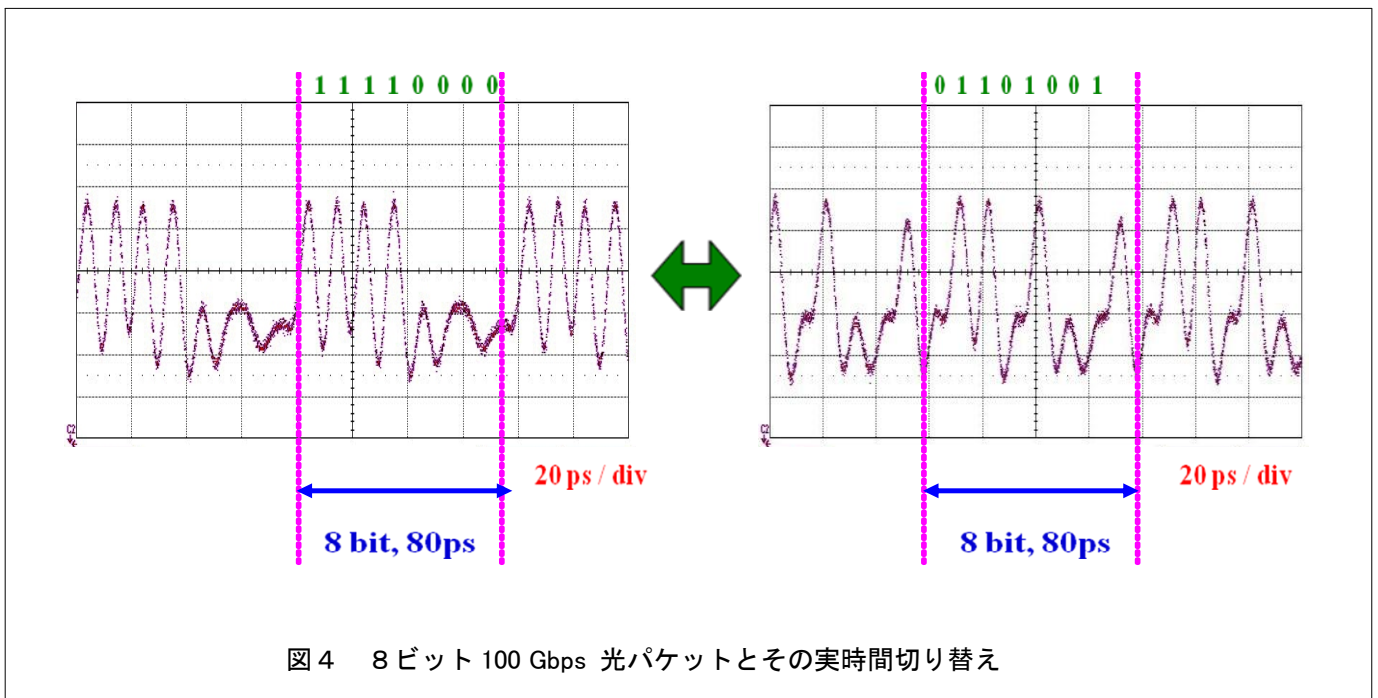
光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer



ように GA で計算した制御電圧を位相制御器に印加する。この操作の繰返しにより、特定の packets 整形に必要な制御信号が得られる。そして、(0,0,0,0,0,0,0,0) から(1,1,1,1,1,1,1,1)まで、各光パケット生成に必要な

制御電圧が一旦わかってしまえば、制御電圧の切り替えで、リアルタイムに光パケットの切り替えができるようになる。図4に、得られた 100Gbps 8 bit パケットの1例とその実時間切り替えを示す。0信号の一部



光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer

に起伏が見られるが、これは、光サンプリングオシロスコープの測定分解能に起因するものであることが確認できている。光信号の切り替え再現性は非常に良く、日数をあけて同一の実験を行った場合も、同様の結果が得られた。

4. 短光パルスの光ファイバ伝搬特性評価

開発した光パルスシンセサイザを使えば、約 400 GHz に渡る広帯域な光スペクトルを自由に整形し、様々なパルス波形を生成できる。そこで、光パルスシンセサイザを利用して、様々な波形をもつパルスの生成を試み、光ファイバの伝搬特性を調べた⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。光ソリトンの伝搬特性の評価は、従来から様々なレーザを用いて行われている。しかし、1 台のレーザで発生できる短光パルスの形状は限られている。また、10 GHz 以上の高繰返しパルスの評価は、ほとんどない。これに対し、光パルスシンセサイザを利用すれば、系統的

に短光パルスのパルス幅やピークパワー等を思い通りに変化させ、伝搬特性の評価ができる。もちろん、10 GHz 以上の高繰返しパルスの整形も問題なく行える。

図 5 に、光ファイバへの入射光として、光パルスシンセサイザで整形した光パルスの光ファイバ (2 km) 伝搬前後の波形 (自己相関波形) を示す。生成した光パルスは、数学的には sech^2 型と呼ばれる波形となっている。ピークパワーが 6.9 W のときには、パルス波形が広がっていないことがわかる。 sech^2 波形の短光パルスで、パルス幅とピークパワーを変化させ、伝搬後の波形が変化しない場合のデータを図 6 にプロットした。グラフ中の実線は、ソリトン伝搬条件の理論値で、実験結果が理論と良い一致を見ていることがわかる。

このように、光パルスシンセサイザを使えば、様々な波形の光の伝搬についてこれまで理論で予想されていたことを実際に実験で実証可能になる。その意味で、光パルスシンセサイザへの期待は非常に大きい。

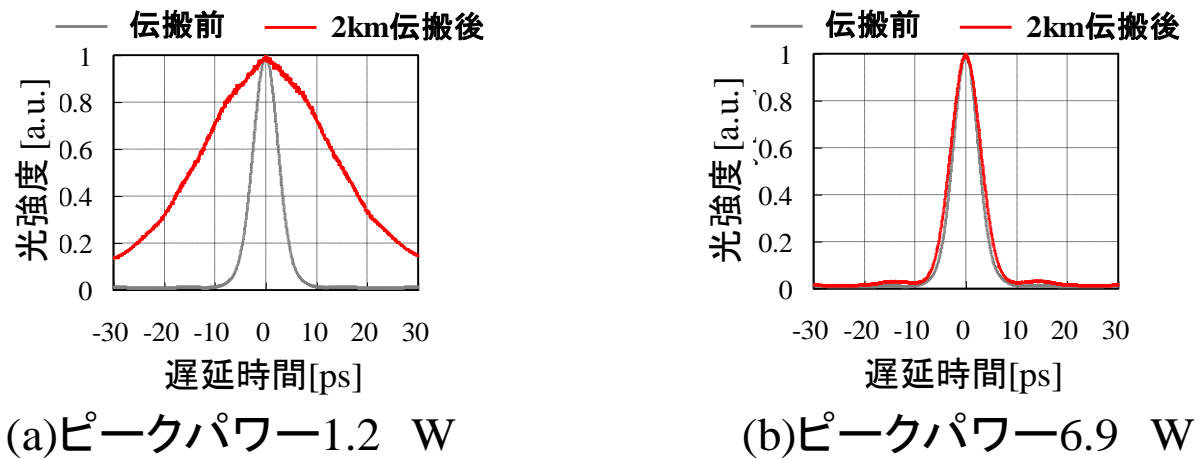


図 5 sech^2 型短光パルスのファイバ伝搬前後の波形

光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer

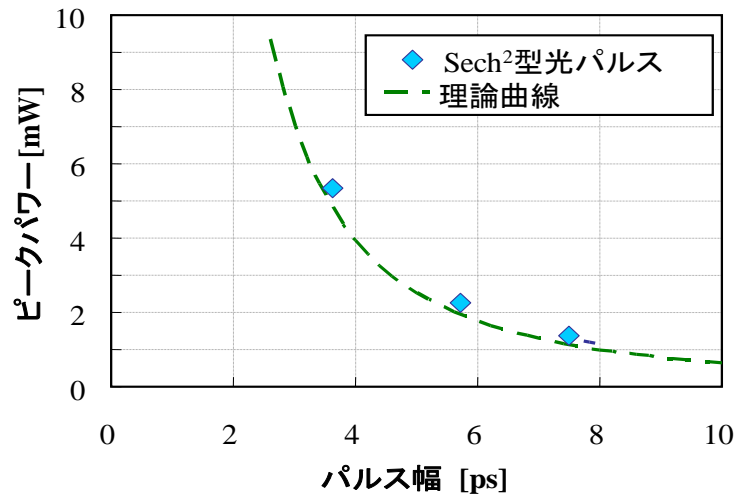


図6 波形を維持して伝搬する短光パルスのパルス幅とピークパワーの関係

5. おわりに

時空間変換光信号処理を原理とする光パルスシンセサイザと、それをを用いた高速光信号パケットの自動生成、ならびに光ソリトンを始めとする様々な光パルスの光ファイバ伝搬特性評価への応用を紹介した。光パルスシンセサイザは、もともとは光通信への応用を念頭に置いて開発した。しかし、今や、その応用範囲は、光情報処理、光計測、光信号制御など、非常に多岐にわたり、ここで紹介した以外にも様々な研究が筆者らによって進められている⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁷⁾。本稿では、できるだけ多くの読者に、光を自在に操る光パルスシンセサイザが拓く魅力的な世界への案内を試みた。この分野への関心を持って戴けたなら、幸いである。

参考文献

- (1) Y. T. Mazurenko, "Interference of spectrally dispersed light," *Opt. Spectrosc.*, **Vol. 56**, p.357, (1984).
- (2) A. M. Weiner, "Femtosecond optical pulse shaping and processing," *Prog. Quant. Electr.*, **Vol. 19**, pp. 161-235, (1995).
- (3) H. Takahashi, S. Suzuki, and I. Nishi, "Wavelength multiplexer based on SiO₂-Ta₂O₅ arrayed-waveguide grating," *IEEE J. of Lightwave Technol.*, **Vol. 12**, No. 6, pp. 989-995, (1994).
- (4) T. Kurokawa, H. Tsuda, K. Okamoto, K. Naganuma, H. Takenouchi, Y. Inoue, M. Ishii, "Time-space-conversion optical signal processing using arrayed-waveguide grating," *Electron. Lett.*, **33** (22), pp. 1890-1891, (1997).
- (5) K. Mandai, D. Miyamoto, T. Suzuki, H. Tsuda, A. Aizawa, and T. Kurokawa, "Repetition rate and center wavelength-tunable optical pulse generation using an optical comb generator and a high resolution arrayed-waveguide grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **18** (5), pp. 679-681, (2006).
- (6) R. Kobe, S. Takeda, T. Shioda, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Generation of 100-Gbps optical packets with 8-bit RZ pulse patterns using an optical pulse synthesizer," *Proc. CLEO/PR*, WD3-4, Seoul, Korea, August 29, (2007).

光パルスシンセサイザによる高速光信号パケット生成と短光パルスの伝搬評価

Generation of high-speed optical signal packets and evaluation of short optical pulse transmission by optical pulse synthesizer

- (7) Y. Tanaka, R. Kobe, S. Takeda, T. Shioda, H. Tsuda, and T. Kurokawa, "100-Gbps optical packets with 8-bit RZ pulse patterns generated by an optical pulse synthesizer," *Proc. ECOC 2007*, Tue 4-3-3, Berlin, Germany, Sept. 18, (2007).
- (8) Y. Tanaka and T. Kurokawa, "Automatic short-pulse reshaping for high-speed optical communication systems," (Invited) *Proc. APOC 2007 (International Conference on Asia-Pacific Optical Communications)*, Paper 6781-107, Mon. Nov. 5, (2007).
- (9) H. Tsuda, Y. Tanaka, T. Shioda, and T. Kurokawa, "Analog and digital optical pulse synthesizers using arrayed-waveguide gratings for high-speed optical signal processing," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, **Vol. 26, No. 6**, pp. 670-677, (2008).
- (10) Y. Tanaka, R. Kobe, T. Shioda, H. Tsuda and T. Kurokawa, "Generation of 100-Gb/s packets having 8-Bit return-to-zero patterns using an optical pulse synthesizer with a lookup table" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **Vol. 21, No. 1**, pp. 39-41, (2009).
- (11) K. Kashiwagi, Y. Kodama, R. Kobe, and T. Shioda, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of optical short pulses generated by optical pulse synthesizer," *Journal of Applied Physics* **Vol. 48**, September, (2009). 09LF02, (4 pages).
- (12) Y. Kodama, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of optical solitons generated by optical pulse synthesizer," *Proc. CLEO/PR* *Proc. CLEO/PR*, WH3-4, Shanghai, China, Sept. 2, (2009).
- (13) H. Ishizu, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of parabolic pulses generated by optical pulse synthesizer," *Proc. 15th Microoptics conference (MOC'09)*, pp. 262-263, (2009).
- (14) W. Qiao, K. Mozawa, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Generation of phase only pulses using optical pulse synthesizer," *Appl. Phys. Exp.*, **Vol. 4, No. 9**, pp. 092703-1-3, (2011).
- (15) W. Qiao, K. Mozawa, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of phase only pulse and its dispersion compensation in high power regime," *IEICE Electronics Express*, **Vol. 9, No. 5**, pp. 410-415, Mar. 10, (2012).
- (16) S. Choi, N. Tamura, K. Kashiwagi, T. Shioda, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Supercontinuum comb generation using optical pulse synthesizer and highly nonlinear dispersion-shifted fiber," *Japanese Journal of Applied Physics* **48**, (2009). 09LF01, (6 pages).
- (17) T. Shioda, T. Mori, T. Sugimoto, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "High-resolution spectroscopy based on optical phase modulator and optical frequency comb," *Optics Communications*, **Vol. 282, No. 14**, pp. 2909-2912, (2009).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。