

# 光波形合成による超高速光通信の信号波形最適化の検討

Optimization of signal waveforms for optical communication by optical waveform synthesis



柏木 謙 (Ken KASHIWAGI, Dr. Eng.)

東京農工大学 大学院工学研究院

先端電気電子部門 助教

(Assistant Professor, Division of Advanced Electrical and Electronics Engineering, Institute of Engineering, 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

受賞：平成 18 年度電子情報通信学会学術奨励賞 (2006 年度)

研究専門分野：光エレクトロニクス

**あらまし** 情報通信の大容量化の要求に伴って、光ファイバ通信網は発展し社会基盤となった。大容量の通信のためには光ファイバを伝搬する信号は非常に高速で広帯域となるため、ファイバ伝搬による波形劣化が顕著となる。そのため、通信に適した信号波形の利用が肝要である。どのような信号波形が適しているかを解明するには、様々な形状の波形を実験的に生成できる光波形の生成技術が必要である。本研究では、光波形合成技術を用いて光ファイバ伝送に適した信号波形を実験的に検討した。光ファイバ中での波形歪みは、波長分散と非線形効果であり、特に補償ができない非線形効果の取り扱いが難しい。本稿では、非線形効果を抑圧して分散補償する手法と、同効果を積極的に利用して分散を打ち消す手法の両方を紹介する。

## 1. はじめに

動画配信を初めとする大容量コンテンツの発達や VoIP (Voice over Internet Protocol) などの IP 上に多様な通信データが導入されることにより、ネットワーク上のデータは急速に増大している。このような通信量の増大に従って、光ファイバ中を伝搬する光信号は次第に広帯域化が進んでいる。広帯域な信号の伝搬による波形歪みは顕著なものとなり、信号品質は大きく劣化する。そのため、この品質保持に適した信号波形の解明と利用が必要である。

高速な電気信号発生技術や光変調器の高度化に伴い、複雑な波形を持つ広帯域な光信号が発生可能となったが、その精密性と柔軟性には限界がある。実験的にファイバ内を伝搬する光波形の変化・歪みを測定するには、精密かつ柔軟に光波形を合成できる技術が適している。光変調器を利用する方法が比較的柔軟な光波形の生成が可能であるが、高速な光波形の生成には変調信号や光変調器に広い帯域が必要で、使用するデバイスに対する要求が高い。これに対して、筆者らは周波数軸上での光スペクトルの変調に基づく光波形合成やその応用について研究してきており [1][2][3]、この手法では各デバイスに対する要求は高くない。本稿では、その技術を用いてファイバ伝搬に適する信号波形を実験的に検討した結果を報告する。

## 2. 光波形合成の原理

時間軸上の光波形と周波数軸上の光スペクトルは、フーリエ変換で一对一の対応関係にある。(この時、光波形と光スペクトルは共に電界で考慮する必要がある。) 裏を返せば、所望の光波形を生成するためには、その波形のフーリエ変換である光スペクトルを生成すればよい。周波数軸上で光スペクトルに対して任意の変調を行えば、任意形状の光波形を生成することができることになる。

図 1 に、周波数軸上で変調する光波形合成の原理を示す。まず、事前に所望のパルスの形状とその繰り返し周波数から、そのフーリエ変換である光スペクトルを計算する。周波数軸上で等間隔の多波長成分を持つような光スペクトルは、一般に「光コム」と呼ばれ、ここでは合成する光波形の種となる光源として利用す

# 光波形合成による超高速光通信の信号波形最適化の検討

Optimization of signal waveforms for optical communication by optical waveform synthesis

る。このような利用方法の光コムを本稿では「種コム」と呼ぶこととする。種コムはパルス列の繰り返し周波数と等しい周波数間隔を持っているが、その強度・位相スペクトルは調整されていないため、この波形は所望のパルスとは異なる。次に、この光を回折格子に通すことで、周波数軸上のスペクトルを空間軸上に展開する。そして、多数の強度変調器と位相変調器を利用して、各周波数成分の強度と位相を独立に変調して、目的の光スペクトル（を空間的に展開した状態）に調整する。その後、空間的に展開されているスペクトルを回折格子により合波し、所望の時間波形を得る。このように、静的な変調を行うだけで光波形が合成できるため、個々のデバイスに高い性能は要求されない。それに対して、周波数軸上で並列化しているため、より複雑な波形（広帯域な波形）の合成には、より多くの変調器の並列化が必要となる。

図1では、簡単のために光の強度波形について説明しているが、光電界の波形とスペクトルがフーリエ変換の関係にあるため、光波形の位相の時間変化についても任意形状に合成することができる。手順は上記と同様の方法で可能である。

光波形合成は、最初に空間的な回折格子を用いる手

法が開発され[4][5]、平面光波回路の作製技術の発展に伴って平面導波路型のデバイスが開発された[6][7][8]。筆者らは、この平面導波路型のデバイスを光パルスシンセサイザと呼び、光波形合成とその応用に関する研究を進めてきた[9][10]。光パルスシンセサイザは、平面導波路型の回折格子であるアレイ導波路格子（Arrayed Waveguide Grating : AWG）とその各出力導波路に強度・位相変調器を備えており、上記の光波形合成を行うための全ての要素が一つの平面光波回路素子に集積されている。実際に光波形合成を行う手順としては、レーザからの連続光を位相変調を行い、種コムを生成する。光パルスシンセサイザは、種コムの各周波数成分を異なる導波路へ分岐し、各成分に対して独立に強度と位相を変調する。変調後の光は、基板端面に備えられているミラーにより反射され、AWGで合波されて出力される。強度変調には、出力光のスペクトルを実際に光スペクトラムアナライザを用いて測定し、そのスペクトルが目標のものとなるように強度変調器を調整する。位相のスペクトルは、直接測定することが困難なので、出力光の波形を測定して、目標波形になるように位相変調器に対して遺伝的アルゴリズムに基づいたフィードバック制御を利用した。

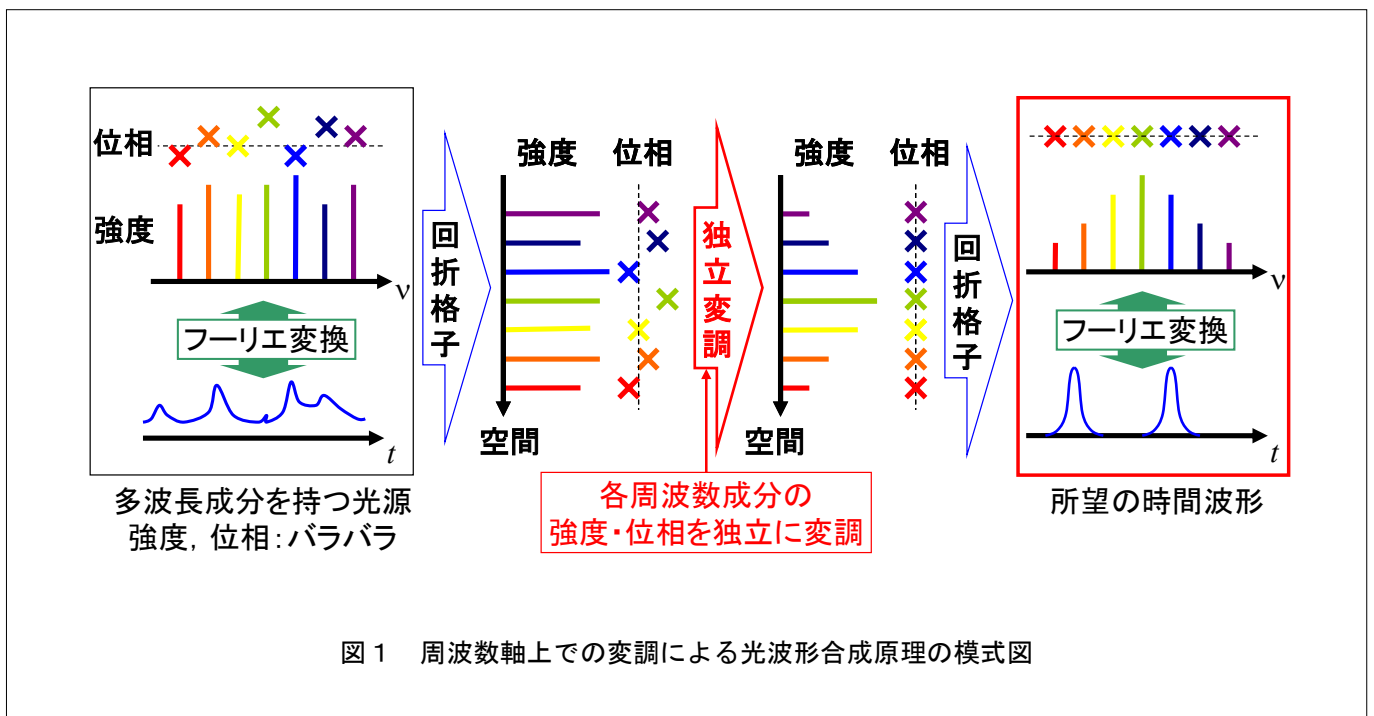


図1 周波数軸上での変調による光波形合成原理の模式図

# 光波形合成による超高速光通信の信号波形最適化の検討

Optimization of signal waveforms for optical communication by optical waveform synthesis

### 3. 位相パルスの生成と伝搬特性解析

光ファイバ中の光信号の伝搬では、分散と非線形効果の両方を考慮する必要がある。分散の効果は線形的な効果であるため、ファイバの分散を補償することは原理的に可能である。それに対して、非線形効果は補償できないため、非線形効果の抑圧が信号品質の維持に重要である。非線形効果は光信号の時間的な強度変化に主に起因するため、時間的に強度が一定の信号を用いて抑制できる。そこで、時間的に強度が一定で位相のみが変化する位相パルスを生成し、そのファイバ伝搬特性を解析した。そして、高い強度でのファイバ伝搬後に分散補償を行い、非線形効果の抑圧について検討した。また、以下では強度が時間的にパルス状に変化する波形を「強度パルス」と呼ぶこととする。

ファイバ伝搬特性の解析には、生成した位相パルスを様々な強度で長さ 1.3 km の単一モードファイバ (Single Mode Fiber : SMF) に入射し、その伝搬後の波形と光スペクトルを測定した。パルス形状はガウシアン型、パルス幅 10 ps、位相変調振幅は  $\pi/2$  とした。そして、分散補償の効果を確認するため、1.3 km の SMF 伝搬に続いて、長さ 200 m の分散補償ファイバ (Dispersion Compensation Fiber : DCF) を通過させた後の波形についても測定した。

生成した位相パルスを遅延干渉した強度波形を図 2 に示す。位相波形は位相振幅が  $\pi/2$  でパルス幅が 10 ps の目標波形とよく一致しており、強度波形は一定になっていることが分かる。時間的な位相変化を強度に変換するために遅延干渉計を利用した結果、測定波形には反転したパルスも現れている。このようにして、生成した位相パルスを平均パワーを 20 dBm に増幅し、SMF に伝搬させた波形と DCF で分散補償した位相波形を図 3 に示す。1.3 km の SMF 後には波長が歪んで 16.0 ps にまで広がっていたパルス幅も、DCF での分散補償の後では 10.1 ps に圧縮されてパルス形状が復元された。このことから、位相パルスは非線形効果の抑圧に効果があることがわかった。また、位相パルスのファイバ伝搬後のスペクトルは、平均パワーを 20 dBm まで増幅したとしても、非線形効果による光スペクトルの拡大は見られなかったことから、位相パルスの非線形性の抑圧効果が確認できた。

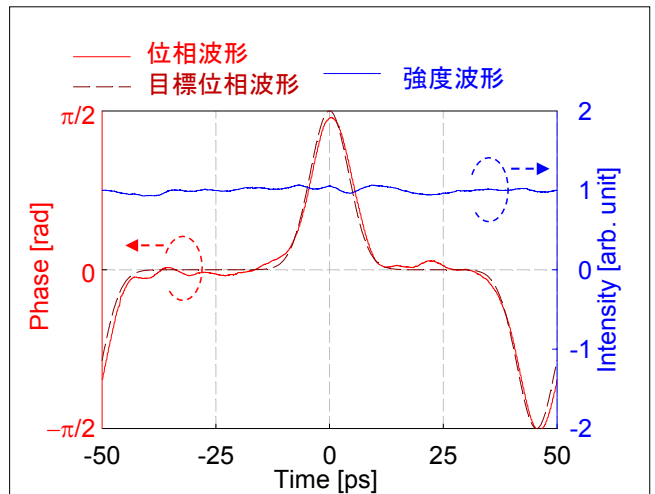


図 2 生成した位相パルスの位相と強度波形

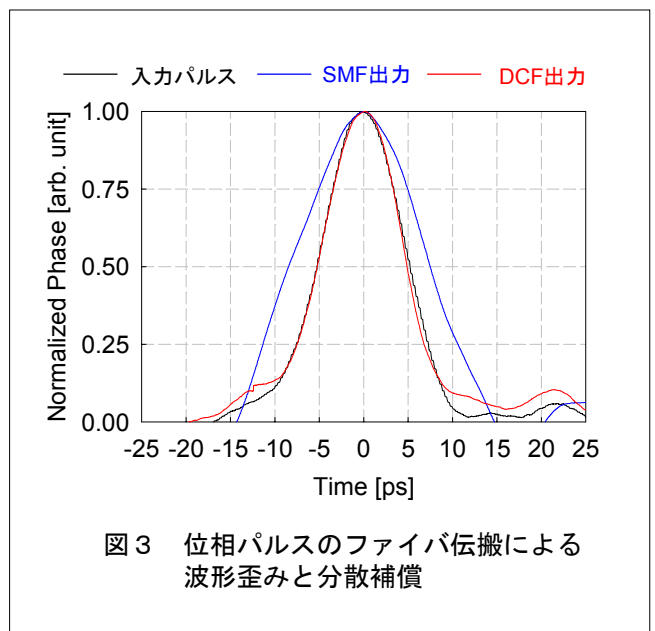


図 3 位相パルスのファイバ伝搬による波形歪みと分散補償

### 4. ダークソリトンの正常分散ファイバ中での無歪み伝搬

前節では、非線形効果を抑えて光波形の歪みを防いだが、本節では、積極的に非線形効果を活用することで波長分散に起因する光パルスの波形歪みを抑える手法について検討した。伝送に用いられる光ファイバが異常分散を持つ場合に、ある形状と強度でパルス波形の無歪み伝搬が可能であり、そのようなパルスはソリトンと呼ばれる。それに対して、正常分散を持つファ

# 光波形合成による超高速光通信の信号波形最適化の検討

Optimization of signal waveforms for optical communication by optical waveform synthesis

イバ中で無歪み伝搬が可能なパルスのことをダークソリトンと呼び、時間的にある一定の背景強度中の窪みとして現れる。また、その窪みの中心で位相が $\pi$ 変化することも特徴である。その特殊な形状から生成が非常に困難であるため、実験的な検討が極めて少ない。本節では、光波形合成により生成したダークソリトンの正常分散ファイバ中の伝搬特性について紹介する。

その波形が特殊であることから、通常ではダークソリトンを生成することは困難であるが、光パルスシンセサイザを用いて生成した。生成したパルスの幅は 8 ps 及び 10 ps とした。光波形合成では光波形が周期的となるので、ダークソリトンが周期に 1 つの場合には位相が $\pi$ 変化しているの、周期の端で位相が不連続となり生成できない。しかし、周期に 2 つ生成して合計  $2\pi$  位相を変化させることでこの問題を解決した。このようにして生成したダークソリトンを異なる入力パワーで長さ 1 km の正常分散ファイバに伝搬させ、その出力波形を観測することで伝搬特性を測定した。

パルス幅 10 ps のダークソリトンのファイバ出力端での波形を、図 4 に入力波形と共に示す。青破線で描かれた入力波形は、入力ピーク強度 16.8 dBm の赤線では出力端でも一致している。それに対して、強度が低い 8.2 dBm の黒線の場合には幅が広く、強度が高い 24.0 dBm の緑線の場合には幅が細くなっていることが分かる。

ファイバ出力端でのパルス幅の入力ピーク強度依存性を図 5 に示す。波形の無歪み伝搬が起こるパルス幅 10 ps の入力ピーク強度 16.8 dBm は、理論から計算される値と良く一致する。パルス幅 8 ps の場合にも同様にピーク強度 18.5 dBm で一致する。

次に、ダークパルスの特徴である $\pi$ の位相変化も維持されるかを確認した。直接的に $\pi$ の位相変化は測定することは難しいので、遅延干渉計を用いて位相変化を強度変化に変換して干渉波形を測定した。得られた波形は、計算される理想的な干渉波形と合致し、強度波形だけではなく位相波形の無歪み伝搬も確認した。これらのことから、ダ

ークソリトンは正常分散ファイバ中で理論通りにソリトン伝搬を示し、正常分散ファイバ中でのソリトン通信に適した波形であることを実験的に示した。

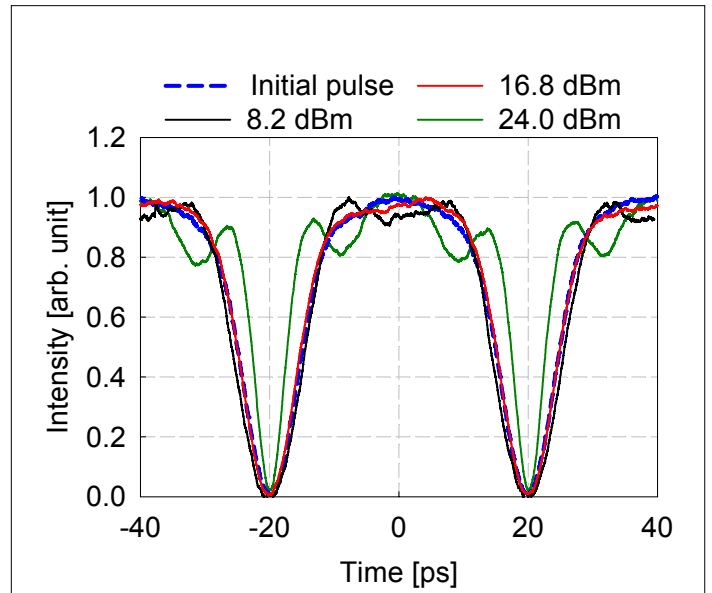


図 4 ファイバ出力端でのダークソリトン波形の入力ピーク強度依存性

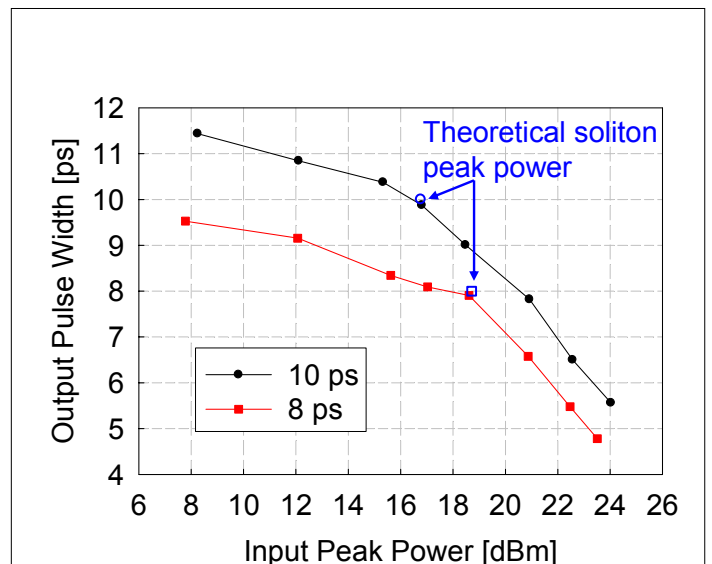


図 5 ファイバ出力端でのパルス幅の入力ピーク強度依存性

# 光波形合成による超高速光通信の信号波形最適化の検討

Optimization of signal waveforms for optical communication by optical waveform synthesis

## 5. まとめ

本課題では、光波形合成の技術を用いて、光ファイバ伝搬中の光信号歪みを抑圧する手法を検討した。光の位相のみが変化する光波形は、非線形効果を抑圧することが可能で、分散による波形歪みは補償できることを実験的に確認した。続いて、通常生成が困難であるダークソリトンを精密に生成し、そのソリトン伝搬特性を実験的に測定した。その結果、得られたソリトン伝搬強度は理論上の値とよく一致し、また、位相波形も歪み無く伝搬可能であることが分かった。光波形のファイバ内の伝搬特性を実験的に検討した本課題の結果は、光パルスとファイバという密接に関係する技術の基盤となる結果を示した。このような特殊な光波形の生成は、光通信の信号のみならず、光計測やファイバ中の非線形効果の利用にも応用範囲が広がっている。

## 参考文献

- [1] 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," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 9, p. 09LF01, Sep. 2009.
- [2] K. Kashiwagi, Y. Kodama, R. Kobe, T. Shioda, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of optical short pulses generated by optical pulse synthesizer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 9, p. 09LF02, Sep. 2009.
- [3] K. Kashiwagi, H. Ishizu, and T. Kurokawa, "Fiber transmission characteristics of parabolic pulses generated by optical pulse synthesizer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 9R, p. 092501, 2011.
- [4] A. M. Weiner, J. P. Heritage, and E. M. Kirschner, "High-resolution femtosecond pulse shaping," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 5, no. 8, p. 1563, Aug. 1988.
- [5] A. M. Weiner, D. E. Leaird, J. S. Patel, and J. R. Wullert, "Programmable femtosecond pulse shaping by use of a multielement liquid-crystal phase modulator," *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 6, p. 326, Mar. 1990.
- [6] K. Mandai, D. Miyamoto, T. Suzuki, H. Tsuda, K. 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 Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 5, pp. 679-681, Mar. 2006.
- [7] D. Miyamoto, K. Mandai, T. Kurokawa, S. Takeda, T. Shioda, and H. Tsuda, "Waveform-controllable optical pulse generation using an optical pulse synthesizer," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 18, no. 5, pp. 721-723, Mar. 2006.
- [8] 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," *J. Light. Technol.*, vol. 26, no. 6, pp. 670-677, 2008.
- [9] K. Kashiwagi, H. Ishizu, Y. Kodama, and T. Kurokawa, "Background suppression in synthesized pulse waveform by feedback control optimization for flatly broadened supercontinuum generation," *Opt. Express*, vol. 21, no. 3, p. 3001, Jan. 2013.
- [10] K. Kashiwagi, K. Mozawa, Y. Tanaka, and T. Kurokawa, "Dark soliton synthesis using an optical pulse synthesizer and transmission through a normal-dispersion optical fiber," *Opt. Express*, vol. 21, no. 25, pp. 30886-30894, Dec. 2013.

この研究は、平成23年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成24～26年度に実施されたものです。