

時間領域光フーリエ変換を用いた超短光パルスの無歪み光ファイバー伝送

中沢 正隆・廣岡 俊彦

Distortion-Free Optical Fiber Transmission of Ultrashort Optical Pulses Using Time-Domain Optical Fourier Transformation

Masataka NAKAZAWA and Toshihiko HIROOKA

With ultrahigh-speed optical transmission at rates faster than 40 Gbit/s, the signal pulse width is only a few ps. Therefore, the waveform distortion caused by dispersion and changes in the environment in the transmission fiber imposes a severe limitation on the transmission performance. We recently proposed a novel distortion-free transmission scheme that uses transform-limited pulses and time-domain optical Fourier transformation (OFT). We note that the spectral envelope of the signal pulse is preserved during propagation. By converting the unchanged spectrum into the time domain using OFT, we can completely reconstruct the undistorted input pulse waveform at the output terminal. In this paper, we describe the principle of distortion-free transmission using OFT, and present numerical results that we obtained when we used the proposed scheme to eliminate second- and third-order dispersion and jitter. Finally, we demonstrate that a 2.5 ps pulse can be successfully transmitted without distortion even in the presence of third-order dispersion.

Key words: high-speed optical transmission, optical Fourier transformation, optical phase modulation, transform-limited pulses, waveform distortion elimination

ADSL や FTTH といったブロードバンド回線が各家庭に普及するにつれて、基幹ネットワークの高速化に対する要求が高まっている。伝送速度が 40 Gbit/s 以上になると、伝送信号の光パルス幅は数ピコ秒と狭くなるため、光ファイバー中の波長分散や偏波分散による波形歪みが伝送特性を劣化させる大きな要因となる。また、伝送ファイバーの分散値は温度や環境の変化に伴い時間的に変動するため、適応等化という技術が必要とされている。これらの歪みを個別に補正する技術は、これまでに各種開発されてきたが、1 台の装置で波形歪みを一括して除去することは難しかった。

筆者らは、伝送信号のパルス波形に歪みが生じて、そのスペクトルの包絡線形状は保存されることを利用し、光のフーリエ変換を用いた波形無歪み伝送技術をいままでに提案している¹⁾。この方法は、単なるスペクトル成分ごと

の位相補償を行う技術ではなく、時間領域において光フーリエ変換を行う新たな伝送方法に関するものである。すなわち、伝送用信号としてはフーリエ変換限界 (TL: transform-limited) パルスを用い、伝送後も無歪みなスペクトルの包絡線を時間領域光フーリエ変換によって、時間軸上のパルス波形に変換することにより、伝送前の波形を出力端で歪みなく再生することができる。

関連する技術として、これまでに、「時間-レンズ」を用いた偏波モード分散 (PMD: polarization-mode dispersion) やジッターの補償などの波形処理が提案されている²⁻⁵⁾。時間レンズは、レンズ回折による空間から波数へのフーリエ変換作用とのアナロジーから、時間から周波数へのフーリエ変換として理解することができる⁶⁾。筆者らが提案した手法は、これらの関連技術を統一的に解釈し一般化したものである。すなわち、スペクトル形状の無歪み

東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1) E-mail: nakazawa@riec.tohoku.ac.jp

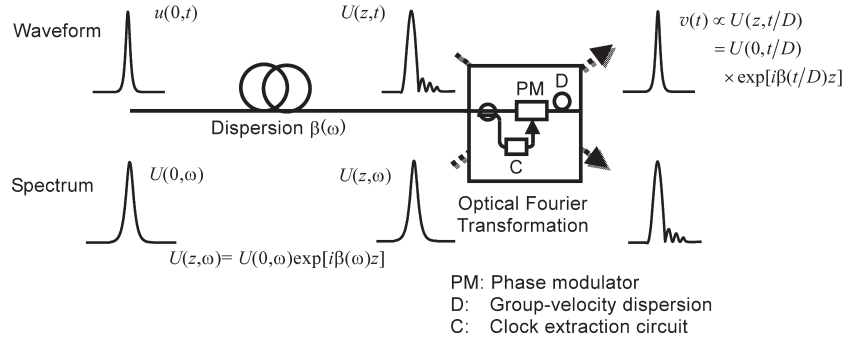


図1 時間領域光フーリエ変換による無歪みパルス伝送の原理。

性に着目し、時間と周波数を入れ替えることによって、パルス波形のあらゆる線形歪みが一括除去できることがポイントである。

本稿では、光フーリエ変換を用いた波形無歪み伝送の原理を解説し、本手法による二次および三次分散波形歪みの除去に関する解析結果について述べる。さらに、三次分散を有する伝送路において、2.5 ps のパルスの波形無歪み伝送実験を行った結果について述べ、本方法の有用性を示す。

1. 無歪み光パルス伝送の原理

時間領域光フーリエ変換を用いた無歪みパルス伝送の原理を、図1に沿って説明する。ここではまず、伝送用ファイバーにおいて信号のスペクトルの包絡線形状が不変であることを示すために、任意の分散をもつファイバーにおける光パルスの伝搬方程式を解析する。光ファイバー中のパルス $u(z, t)$ の線形伝搬は、伝搬定数を $\beta(\omega)$ とすると、次の方程式で記述される⁷⁾。

$$(-i) \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = \sum_{n=1}^{\infty} i^n D_n \frac{\partial^n}{\partial t^n} u(z, t) \quad (1)$$

$$\beta(\omega) = \beta_0 + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \omega^n \quad (2)$$

ここで、 $u(z, t)$ はパルスの電界包絡線の複素振幅を表し、 $\beta(\omega)$ は搬送波周波数のまわりでテイラー展開されている。 $D_n = \beta_n / n!$ であり、 β_n は n 次の分散を表す。式(1)をフーリエ変換すると

$$(-i) \frac{\partial U}{\partial z} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \omega^n U \quad (3)$$

となる。ただし

$$U(z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(z, t) \exp(i\omega t) dt \quad (4)$$

である。式(3)を積分すると

$$U(z, \omega) = U(0, \omega) \exp[i\phi(\omega)], \quad \phi(\omega) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \omega^n z \quad (5)$$

を得る。すなわち、伝送路の線形効果によってパルスが時間的に複雑な波形歪みを受けても、スペクトル形状は位相変化 $\exp[i\phi(\omega)]$ を除いて完全に保存される。したがって、もし出力パルスのスペクトルの包絡線形状 $U(0, \omega)$ を“時間軸上”に再生することが可能であれば、 $U(0, \omega)$ は入力波形であるので歪みのない伝送ができることになる。ここで、入力パルスとして TL パルスを用いると、 $U(0, \omega)$ から時間波形 $u(0, t)$ そのものを完全に再現することができることになる。いくら位相変化 $\exp[i\phi(\omega)]$ が複雑に変化しても、光検出器では包絡線のみを検出するので、問題にはならない。これにより、伝送用ファイバーの分散 $\beta(\omega)$ に一切依存しない波形無歪み伝送を実現することができる。

2. 時間領域光フーリエ変換

伝送用ファイバー中で線形歪みを受けた時間波形から、その周波数スペクトルを時間軸上に再生させる光フーリエ変換回路 (OFTC: optical Fourier transform circuit) は、図1に示すように、光位相変調器 (PM) と二次分散媒質 (D) によって容易に実現することができる。時間波形 $u(z, t)$ 、スペクトル $U(z, \omega)$ を有する光パルスを OFTC に入力したとき、その出力パルスの時間波形 $v(t)$ は以下のようにして求められる。

$u(z, t)$ はまず、位相変調器 (チャープ率 K) によって線形にチャープされる。

$$u_{\text{chirp}}(t) = u(z, t) \exp(iKt^2/2) \quad (6)$$

次に、 $u_{\text{chirp}}(t)$ は分散値 k'' 、長さ L (分散量 $D = k''L$) をもつ二次分散媒質を伝搬する。このとき、出力 $v(t)$ は $u_{\text{chirp}}(t)$ を用いて、

$$v(t) = \sqrt{\frac{i}{2\pi D}} \int_{-\infty}^{\infty} u_{\text{chirp}}(t') \exp\left(-\frac{i}{2D}(t-t')^2\right) dt' \quad (7)$$

と畳み込み積分の形で表される。ここで、分散量を $D = 1/K$ に設定すると、式 (7) は

$$v(t) = \sqrt{\frac{i}{2\pi D}} \exp(-iKt^2/2) \int_{-\infty}^{\infty} u(z, t') \exp(it't'/D) dt' \\ = \sqrt{\frac{i}{2\pi D}} \exp(-iKt^2/2) U(z, t/D) \quad (8)$$

と簡単な形になる。式 (8) の積分は $u(z, t')$ のフーリエ変換をしていることに注目したい。そして、分散媒質を通過後のパルス波形 $v(t)$ は光フーリエ変換前のスペクトル $U(z, \omega)$ に比例していることがわかる。このとき、周波数 ω と時間 t は

$$\omega = t/D \quad (9)$$

で関係づけられており、 D が時間 (t)-周波数 (ω) 変換尺度に相当している。さらに、スペクトル形状が伝送路において不変であるという性質から、 $v(t)$ は式 (4) および (8) より

$$v(t) = \sqrt{\frac{i}{2\pi D}} U(0, t/D) \exp(-iKt^2/2 + i\phi(t/D)) \quad (10)$$

と表される。したがって、入力スペクトル $U(0, \omega)$ の形状が OFTC の出力において時間軸上で完全に再生できることになる。

例として、入力パルスがガウス型の TL 波形 $u(0, t) = A \exp(-t^2/2T_0^2)$ である場合の無歪み伝送を考えよう。このスペクトルは $U(0, \omega) = \sqrt{2\pi T_0^2} A \exp(-T_0^2 \omega^2/2)$ であり、フーリエ変換によって周波数と時間を入れ替えても波形の関数形が変わらないことを用いる。ここで時間-周波数変換尺度を $|D| = T_0^2$ に選ぶと、式 (10) は

$$v(t) = \sqrt{\frac{i}{\text{sgn}(k'')}} A \exp(-t^2/2T_0^2) \\ \times \exp(-iKt^2/2 + i\phi(t/T_0^2)) \quad (11)$$

となる。したがって、二乗検波を行う光検出器の出力 $I(t) = |v(t)|^2$ は

$$I(t) = A^2 \exp(-t^2/T_0^2) \quad (12)$$

となり、 $|u(0, t)|^2$ に完全に一致する。すなわち、時間-周波数変換尺度を $|D| = T_0^2$ と選ぶことにより、出力端で伝送前の波形が完全に再生される。 $|D| > T_0^2$ の場合には、同じ形の波形であるがパルス幅は広がり、 $|D| < T_0^2$ の場合にはパルス圧縮伝送が可能となる。

理想的な光フーリエ変換を行うためには、式 (6) に示すように、二次関数 (パラボラ) で表現される位相変調を

パルスに印加する必要がある。時間に対して線形に異なった周波数を与え、分散性媒質の群遅延によって波形歪みを除去している。しかし、通常の LN 位相変調器は正弦波のクロック信号で駆動しているため、広い時間領域でパラボラ位相変調を実現することは困難である。LN 変調器の変調周波数を ω_m 、印加電圧を V_0 、半波長電圧を V_π とすると、正弦波による位相変調関数は $\Delta\phi(t) = M \cos(\omega_m t)$ 、 $M = \pi V_0 / V_\pi$ と表される。 $\Delta\phi(t)$ を $t=0$ のまわりにテイラー展開すると、

$$\Delta\phi(t) \sim M \left(1 - \frac{\omega_m^2}{2} t^2\right) \quad (13)$$

を得る。したがって、理想的なパラボラ変調は、正弦波のピークの近傍においてのみ実現されることがわかる。ここで、LN 変調器の正弦波変調によって $t=0$ の近傍で得られるチャープの大きさは、 $K = -M\omega_m^2$ で与えられる。パルス波形としてガウス型を用いると、光フーリエ変換に必要なチャープ率は

$$|K| = 1/|D| = 1/T_0^2 \quad (14)$$

となる。すなわち、パルス幅 T_0 の短いパルスに対しては、その二乗に逆比例して大きなチャープ率が必要となることに注意する。これは、狭いパルス内に十分な周波数変調を与えるためにはチャープ率を大きくしなければならないことを意味している。

3. 二次および三次分散によって生じる波形歪みの除去

本技術の有効性を確かめるために、二次分散および三次分散を有する光ファイバー中の伝搬波形、およびそれを光フーリエ変換した後の信号波形を計算機により解析した。信号光には、半値全幅 $T_{\text{FWHM}} = 2$ ps ($T_0 = T_{\text{FWHM}}/1.665 = 1.2$ ps) のガウス型パルスを用いた。このとき、光フーリエ変換に必要なチャープ率および分散量はそれぞれ $K = -1/T_0^2 = -0.694$ ps⁻²、 $D = -T_0^2 = -1.44$ ps² である。二次分散媒質として SMF ($k'' = -20$ ps²/km) を用いるとすると、必要な長さは $L = 72$ m である。

まず、二次分散 $D = 17$ ps/nm/km をもつファイバーにおいて、パルスを 300 m 伝搬させた後の信号光の波形歪み、ならびにそれを光フーリエ変換によって補正した結果を図 2 に示す。ここでは、ファイバーの損失ならびに高次分散はないものとしている。(a-1) は 300 m 伝搬後の波形歪みを示している。細い実線は伝送前の、太い実線は伝送後のパルス波形である。(a-2) は 300 m 伝搬後のスペクトルを示しており、伝搬後もその形状は無歪みであることがわかる。(b-1), (b-2) は、変調周波数 40 GHz で理想的な

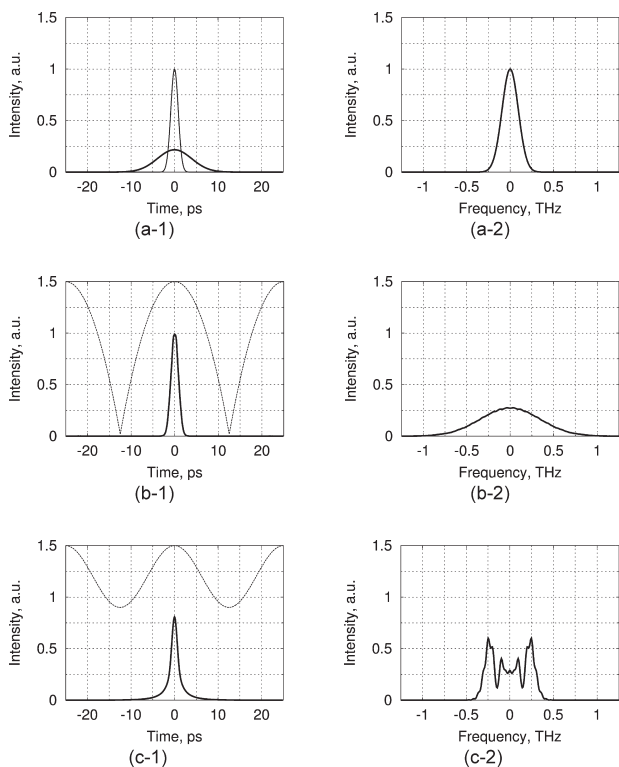


図2 二次分散による波形歪み除去の解析結果。(a-1)の太い実線は伝送ファイバー ($D=17$ ps/nm²/km) を 300 m 伝搬後の時間波形, 細い実線は伝送前の波形である。(a-2)はそのスペクトルである。(b-1), (b-2) はパラボラの位相変調を用いて光フーリエ変換を行った後の時間波形とそのスペクトルである。(c-1), (c-2) は正弦波位相変調を用いたときの光フーリエ変換後の時間波形およびスペクトルである。(b-1), (c-1) 中の破線は光フーリエ変換に用いた位相変調関数を示している。

パラボラの位相変調 $\Delta\phi(t) = Kt^2/2$ を用いて光フーリエ変換を行った後の, 時間波形とそのスペクトルである。(c-1), (c-2) は, 正弦波位相変調 (変調度 $M = -K/\omega_m^2$) を用いたときの, 変換後の時間波形およびスペクトルである。また, (b-1), (c-1) 中の破線は, 光フーリエ変換に用いた位相変調関数を示している。同図 (b-1) から, 位相変調特性がパラボラの場合は, もとの波形が完全に再生されていることがわかる。一方, 同図 (c-1) にみられるように, 正弦波位相変調の場合は, 再生された波形の裾には歪みが残っている。これは, 位相変調がパラボラで近似できない領域にある波形歪みは完全に除去できず, 変換後も残留しているためである。したがって, 波形を完全に再生するには, 位相変調特性を広い時間領域にわたっていかにパラボラに近い形で実現するかが重要であることがわかる。ただし, 隣接するタイムスロットにまで波形歪みが及んでしまうと, パラボラ位相変調を用いても歪みは完全に除去されない。なお, 伝送信号の時間歪みは, 光フーリエ変換によって周波数領域の歪みに変換されるため, (b-2), (c-2)

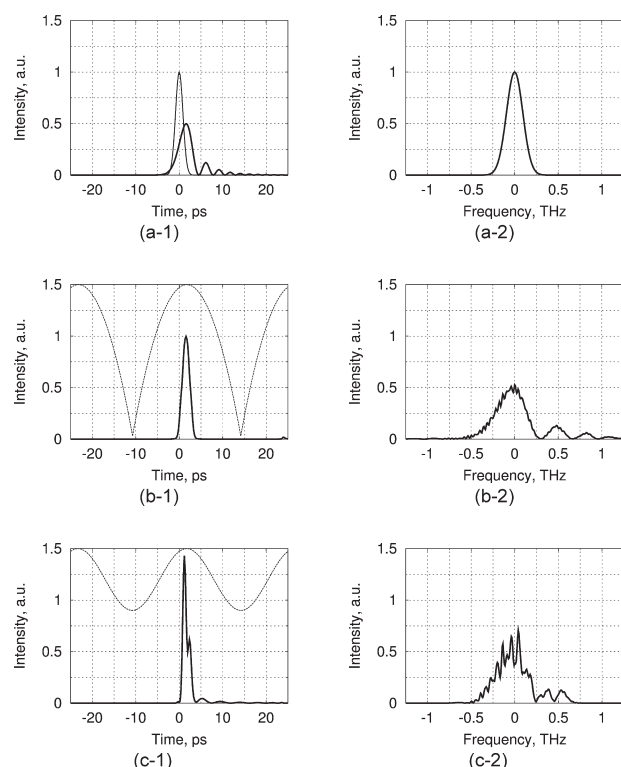


図3 三次分散による波形歪み除去の解析結果。(a-1)の太い実線は伝送ファイバー ($D_3=0.07$ ps/nm³/km) を 120 km 伝搬後の時間波形, 細い実線は伝送前の波形である。(a-2)はそのスペクトルである。(b-1), (b-2) はパラボラの位相変調を用いて光フーリエ変換を行った後の時間波形とそのスペクトルである。(c-1), (c-2) は正弦波位相変調を用いたときの光フーリエ変換後の時間波形およびスペクトルである。(b-1), (c-1) 中の破線は光フーリエ変換に用いた位相変調関数を示している。

ではスペクトルに広がりが生じていることがわかる。

次に, 分散を $D=0$ ps/nm²/km とし, 三次分散 (分散スロープ $D_3=0.07$ ps/nm³/km) をもつ光ファイバーを 120 km 伝搬後の信号パルスの波形歪み, ならびにそれを光フーリエ変換によって無歪み化した結果を図3に示す。同図 (a), (b), (c) はそれぞれ, 120 km 伝搬後, パラボラ位相変調を用いて光フーリエ変換した後, そして正弦波位相変調を用いて光フーリエ変換した後の時間波形およびスペクトルである。同図 (a-1) の太い実線が三次分散に特有の非対称な歪み (リップル) を示しており, 細い実線が入力波形である。このリップルとパルス広がり, は (b-1) に示す理想的なフーリエ変換の場合には完全に除去されていることがわかる。また, リプルをもった時間波形が (b-2) のスペクトル領域に変換されていることもよくわかる。一方, (c-1) に示す不完全なフーリエ変換の場合には, 裾にリップルが残留し, さらに変換後のスペクトル (c-2) も大きく歪んでいる。以上のように, 二次分散, 三次分散が存在しても, 本手法により無歪み伝送が実現できることがわかる。

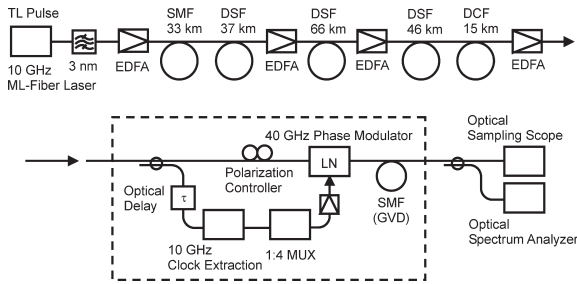


図4 時間領域光フーリエ変換による10 GHz-2.5 ps光パルスの無歪み伝送実験。伝送路は二次分散=0 ps/nm/km, 三次分散=0.057 ps/nm²/kmに設定した全長197 kmの分散マネージファイバーである。下部の破線内に光フーリエ変換回路を示すが、大きなチャープ率を得るために10 GHzを40 GHzにMUXし、その信号で10 GHzの光フーリエ変換を行っている。

4. ジッターの除去

光フーリエ変換を用いると、ジッターの除去も可能である。文献3), 4)では時間-レンズによるジッター除去が報告されているが、これは筆者らの解釈によれば、OFTCによる波形歪み除去の一例とみなすことができる。すなわち、ジッターは式(2)の β_1 の項で表される一次の線形効果であり、ジッターを表すランダムな群遅延は

$$u(z, t) = u(0, t - \tau) \quad (15)$$

で与えられる。したがって、式(8)のフーリエ変換は

$$\begin{aligned} U(z, \omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} u(0, t' - \tau) \exp(i\omega t') dt' \\ &= U(0, \omega) \exp(i\omega\tau) \end{aligned} \quad (16)$$

となる。すなわち、ジッターは、周波数軸上ではランダムな位相変化を与えるにすぎない。したがって、この場合もやはりスペクトルの包絡線は保存されており、OFTCでジッターを除去することができる。この方法は、物理的には、位相変調により時間に比例して異なった周波数をパルスに与え、分散によりその周波数の大きさに応じた群遅延を与えることによって、パルスをジッターの大きさに関係なく中心に引き戻していると理解することができる。

5. 光フーリエ変換による10 GHz, 2.5 ps光パルス列の無歪み伝送実験

LN位相変調器と二次分散ファイバー(SMF)を用いて簡易型のOFTCを構成し、三次分散を有する伝送路においてピコ秒パルスの無歪み伝送実験を行った。実験系の構成を図4に示す。モード同期ファイバーレーザーにより10 GHz-2.5 psのTLガウス型パルスを発生させ、長さ197 kmの伝送路に入射した。二次分散はゼロ、三次分散は0.057 ps/nm²/kmであった。伝送後の光パルス信号を

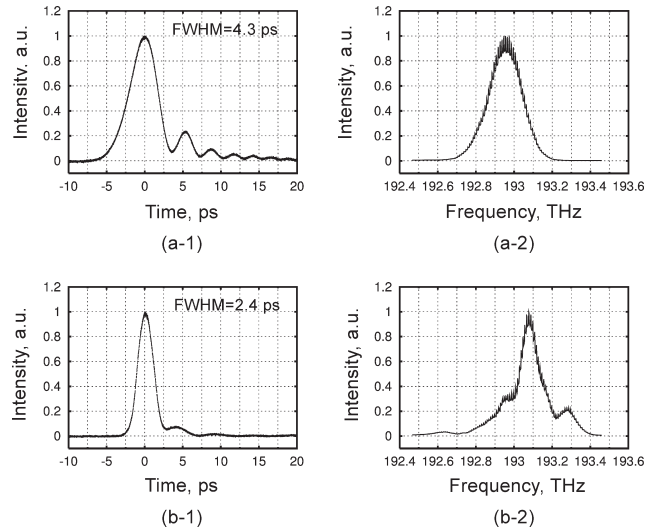


図5 無歪みパルス伝送実験結果。(a-1), (a-2)は197 km伝送後のパルスの時間波形およびその周波数スペクトルを、(b-1), (b-2)は光フーリエ変換後の時間波形およびその周波数スペクトルをそれぞれ示している。

OFTCに入力し、10 GHzのクロック信号を40 GHzに通倍して40 GHzの正弦波位相変調($K = -0.28 \text{ ps}^{-2}$)を印加した後、分散量 $D = 1/K = -3.57 \text{ ps}^2$ のSMFに入射し、光フーリエ変換を行った。ここで、変調器の繰り返しを40 GHzに通倍したのは、チャープ率を大きくとるためである。

図5(a-1), (a-2)に、197 km伝送後の信号波形およびスペクトルをそれぞれ示す。時間波形(a-1)にはリプルがみられ、パルス幅が4.3 psまで広がっている。スペクトル(a-2)はガウス波形であり、細かい線スペクトルは10 GHzの繰り返しを表す縦モードである。次に、OFTCの出力における信号波形およびスペクトルを図5(b-1), (b-2)にそれぞれ示す。パルス幅は2.4 psと入力にほぼ等しい大きさに戻り、リプルがほとんど抑制された波形が得られている。同図(b-1)で時間波形の裾にわずかな振動が残留しているが、これは3章で述べたように、OFTCにおいて位相変調がパラボラではなく正弦波で近似されているためである。また、光フーリエ変換によって時間と周波数が入れ替わった結果、同図(b-2)のスペクトルにリプルが生じていることもわかる。今回の実験では、フーリエ変換にパラボラ変調のかわりに正弦波変調を用いたため、理想的なフーリエ変換が行われていない。このため一部にわずかな波形歪みが残留したが、簡便な正弦波変調でも、波形歪みをとるには大変有効な方法であることがわかる。

本稿では、光ファイバー伝送における分散、ジッター、PMDなどによるあらゆる線形歪みを、時間領域光フーリ

エ変換を用いて一括して除去する新しい試みについて述べた。従来の伝送方式とは異なり、情報信号として、伝送パルスの時間波形よりむしろそのスペクトル形状に着目している点がポイントである。この手法は、光ファイバーの分散特性が時間的に変動しても伝送信号のスペクトル形状は不変であるため、適応等化を実現することも可能である⁸⁾。その一方で、本手法の性能を向上させるには理想的なパラボラ位相変調技術が不可欠であり、この方面での技術発展が待たれる。本技術は、1台の光フーリエ変換回路によってさまざまな信号波形歪みを一括除去できるため、従来のように多数の高価な個別補償技術を必要としない。このため、実用的・経済的な光通信システムを構築できるものと期待される。

文 献

- 1) M. Nakazawa, T. Hirooka, F. Futami and S. Watanabe: "Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 1059-1061.
- 2) M. Romagnoli, P. Franco, R. Corsini, A. Schiffrini and M. Midrio: "Time-domain Fourier optics for polarization-mode dispersion," *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1197-1199.
- 3) L. F. Mollenauer and C. Xu: "Time-lens timing-jitter compensator in ultra-long haul DWDM dispersion managed soliton transmissions," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2002)*, CPDB1-1 (Long Beach, USA, 2002).
- 4) L. A. Jiang, M. E. Grein, H. A. Haus, E. P. Ippen and H. Yokoyama: "Timing jitter eater for optical pulse trains," *Opt. Lett.*, **28** (2003) 78-80.
- 5) T. Sakano, K. Uchiyama, I. Shake, T. Morioka and K. Hagimoto: "Large-dispersion-tolerance optical signal transmission system based on temporal imaging," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 583-585.
- 6) B. H. Kolner: "Space-time duality and the theory of temporal imaging," *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (1994) 1951-1963.
- 7) G. P. Agrawal: *Nonlinear Fiber Optics*, 3rd edition (Academic Press, San Diego, 2001).
- 8) T. Hirooka, M. Nakazawa, F. Futami and S. Watanabe: "A new adaptive equalization scheme for 160-Gb/s transmitted signals using time-domain optical Fourier transformation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 2371-2373.

(2004年10月28日受理)