

1 チャンネルあたり 320 Gbit/s の超高速波長多重光伝送に世界で初めて成功
—10 分の 1 の波長数で長距離大容量光伝送を実現—

中沢 正隆、廣岡 俊彦

東北大学電気通信研究所 超高速光通信研究分野

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 Tel: 022-217-5525, Fax: 022-217-5524

<成果の概要>

東北大学電気通信研究所の中沢正隆教授（光通信工学）の研究グループは、時間領域光フーリエ変換^{*1}と呼ばれる波形歪み除去技術により、1チャンネルあたり 320 Gbit/s の光信号の波長多重(WDM^{*2}: Wavelength Division Multiplexing)伝送に世界で初めて成功しました。これは WDM において 1チャンネルあたり従来の 30 倍と、世界最高の伝送速度を達成したものです。

現在国内の基幹回線に用いられている WDM 伝送システムは、1チャンネルあたり 10~40 Gbit/s の光信号を 40~80 波長多重することにより、最大で 1.6 Tbit/s という通信容量を実現しています。これは電話回線に換算すると約 2,000 万回線に相当します。しかし、波長数の多いシステムは、ネットワークを構成した場合に、回線交換を行なうノードにおいて複雑な波長制御が必要となります。また波長多重度に応じた数の送受信装置が必要であるため、大きな消費電力を要するという問題があります。そのため、1波長あたりの伝送速度を出来るだけ高速化することにより、少ない波長多重数で大容量伝送を実現し、波長制御の簡素化ならびに低消費電力化を実現することが大変重要であります。

我々は、光時分割多重(OTDM^{*3}: Optical Time Division Multiplexing)という技術を用いて 1波長あたりの伝送速度を 320 Gbit/s まで高速化することにより、僅か 5 波で 1.6 Tbit/s の容量を実現し、525 km 伝送させることに成功しました。特に、我々が提案した時間領域光フーリエ変換という手法を DPSK^{*4} (Differential Phase Shift Keying : 差動位相変調)方式に適用することにより、320 Gbit/s という超高速光信号に対してもマージンの大きな高安定長距離伝送を実現している点の特徴です。これにより利用する波長数は 10 分の 1 以下で済み、また伝送速度は 30 倍に達します。

この成果は 9 月下旬にオーストリアで開催されるヨーロッパ光通信国際会議(ECOC2009)において発表を行なう予定です。

<背景>

ブロードバンド回線の急速な普及と多種多様なアプリケーションによる情報量の増大により、国内のインターネットを行きかうトラフィック量は 1 Tbit/s を超え、年率 40% の勢いで増加を続けています。光通信技術はこのようなグローバルな情報網を支えるインフラとしての役割を担っています。現在商用化されている基幹光伝送系では、図 1 の青い点で示すように、1 波長あたり 10 Gbit/s の信号を 80 チャンネル、もしくは 40 Gbit/s の信号を 40 チャンネル波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)することにより、0.8~1.6 Tbit/s の伝送容量を実現しています。今後さらなる帯域需要の拡大に対応するためには、図 1 の青い矢印で示すように波長多重数の増大による大容量化が一つのアプローチですが、波長多重数が増えると

- (1) ネットワークノードにおける波長ごとの経路制御（ルーティング）が複雑になる
- (2) 波長多重度に応じた数の送受信装置が必要であるため大きな消費電力を要する
- (3) 光ファイバ 1 本あたりに入射される光のパワーが著しく増大することによりファイバヒューズ（熱破壊）と呼ばれる現象が発生する

などの問題が生じます。

<従来の技術>

こうした状況を踏まえ、図 1 の緑の矢印で示すように、1 波長あたりの伝送速度を 100 Gbit/s 以上に高速化し、それにより同図の黄色い領域で示すような超高速大容量通信を実現するための研究が盛んに行なわれています。1 波長あたりの高速化によって、ネットワークにおける波長制御の簡素化ならびにシステムの電力消費量の低減が期待されます。これまでの 1 波長あたりの最大の伝送速度は 160 Gbit/s で、これを 8 波長多重することにより 1.28 Tbit/s の伝送が報告されています。

一方、我々はこれまで、超短光パルスの OTDM 方式による 320 Gbit/s の超高速光伝送技術の研究に取り組んできました。このような超高速伝送では、信号パルス幅が約 1 ピコ秒 (1×10^{-12} 秒) と大変狭くなるため、光ファイバの高次の分散効果や温度・環境の変化に伴う分散値の時間変動が伝送特性に大きな影響を及ぼします。我々はこれらの歪みを除去するために時間領域光フーリエ変換法と呼ばれる方法を提案し、超高速大容量化を目指してきました。

<今回の成果>

今回、この 320 Gbit/s OTDM 信号の 5 波 WDM により、500 km の長距離超高速大容量光伝送に世界で初めて成功しました。その伝送系を図 2 に示します。本伝送技術の実現にあたってのポイントは以下の通りです。

(1) 1 チャンネルあたり 320 Gbit/s の WDM 信号の発生

本伝送に用いる 5 波長分の超短光パルスを得るために、1 台のパルス光源からスーパーコンテニュームと呼ばれる帯域の広い光スペクトルを生成し、それをアレイ導波路回折格子と呼ばれる光フィルタで 5 つの波長にスライスすることにより、多波長超短光パルスを発生しています。図 3 にはその WDM 信号のスペクトルを示しています。エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA: Erbium-Doped Fiber Amplifier)の C バンドと呼ばれる利得帯域(1530~1565 nm)の中で、800 GHz

(6.4 nm)の間隔で5波の信号が多重化されています。さらに、40 Gbit/s の信号を 320 Gbit/s まで OTDM 多重化することにより、 $320 \text{ Gbit/s} \times 5 = 1.6 \text{ Tbit/s}$ の容量を実現しています。

受信側における WDM 信号の多重分離^{*5}には対称マツハツェンダ(SMZ: Symmetric Mach-Zehnder)と呼ばれる超高速半導体全光スイッチを用いています。

(2) 時間領域光フーリエ変換による波形歪みの低減

超高速光伝送においては、光ファイバの高次の分散効果やタイミングジッタ、ならびに分散の僅かな変化によって伝送品質が劣化します。特に 320 Gbit/s という高速伝送においては、ファイバ中の偏波分散^{*6}(PMD: Polarization Mode Dispersion)ならびにその時間変動が伝送性能を大きく劣化させます。我々は、これらの波形歪みを受信端において一括除去する新光伝送方式“時間領域光フーリエ変換法”を提案してきました。この方法により歪みの時間変動を大幅に抑えることができるため、安定な超高速伝送が可能となります。

今回の伝送実験では、光フーリエ変換法が WDM にも適用できることを明らかにしました。図 4(a)は伝送後の WDM 信号から 1 波長抽出した 320 Gbit/s の OTDM 信号を 40 Gbit/s に多重分離した信号の波形を示しています。パルスの裾野に歪みが見られ、また立ち上がりも太くなっており、パルスの到着時間が揺らいでいることがわかります。一方図 4(b)は光フーリエ変換回路を通した後の波形を示しています。パルス幅が狭くなるとともに、パルスの裾野にあった歪みが抑制され、さらにパルスの到着時間の揺らぎも低減されています。

(3) 320 Gbit/s × 5 波(1.6 Tbit/s)-525 km 超高速大容量伝送の実現

(1), (2)で述べた伝送方式により 320 Gbit/s × 5 波(1.6 Tbit/s)信号を 525 km にわたって誤りなく伝送させることに成功しました。図 5 に符号誤り率の測定結果を示します。光フーリエ変換法により伝送品質の向上を実現しました。全ての WDM・OTDM チャネルに対して符号誤り率を測定した結果、誤り訂正技術(FEC: Forward Error Correction)を用いないで全チャネルで 10^{-9} 以下の誤り率を達成することに成功しました。500 km は東京-大阪間に相当する伝送距離であり、この成果はこのような超高速光信号が長距離基幹伝送網を高いマージンで伝送できることを示しています。

これらの成果は、9 月下旬にオーストリアで開催される国際会議 European Conference on Optical Communication (ECOC2009)において発表を行なう予定です。

<用語解説>

(*1) 時間領域光フーリエ変換法

超高速光伝送において、信号パルスに発生する線形波形歪みを受信端において一括除去する無歪み伝送方式である。この方法では、伝送パルスの周波数スペクトルの包絡線形状が伝送後も変化しないことを利用して、その無歪みなスペクトル形状を時間軸上のパルス波形にフーリエ変換することにより、歪みの無い信号を再生することができる。このスペクトル形状を時間軸上のパルス波形へ変換するのに用いられるのが光フーリエ変換回路である。この方法は伝送速度を高速化するほど有効であり、我々はこれまでに本手法を用いて単一波長で 160 Gbit/s-1,000 km の伝送に成功している。

(*2) WDM (Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重)

波長の異なる光信号を合波して 1 本のファイバを伝送させることにより、光ファイバの伝送容量を数十倍以上に拡大する技術である。波長の異なる複数の光信号であっても 1 台の EDFA で中継伝送できるため、経済的なシステムを構築することができる。新たに光ファイバを敷設することなく回線を大容量化する技術として、今日のグローバルな情報通信網の実現に大きく貢献している。

(*3) OTDM (Optical Time Division Multiplexing : 光時分割多重)

パルス幅の短いパルス列を光の領域で時間多重する技術であり、電子回路の動作限界を超えた伝送速度を実現することができる。電子回路の処理速度は現状では 40 Gbit/s が限界であるため、320 Gbit/s の伝送を実現するには、40 Gbit/s の信号を光領域で 8 倍に時間多重する OTDM 技術が用いられる。

(*4) DPSK (Differential Phase Shift Keying : 差動位相変調)

従来のように光パルスの有る(1)・無し(0)で情報を送る OOK (On-Off Keying)とは異なり、光パルスは総べて 1111...と連続であるがそのパルス間の光位相差を 0 と π で変調して情報を送る方式である。OOK に比べて受信感度を 2 倍向上できるなどの特徴を有する。

(*5) 多重分離

WDM あるいは OTDM により多重化された信号から 1 チャンネルを抽出する技術である。WDM の多重分離には、アレイ導波路回折格子などの光フィルタを用いて各チャンネルに分波する。OTDM の多重分離には超高速で動作する光スイッチが用いられる。今回の実験では、半導体光増幅器をマッハツェンダ干渉計の両方のアームに集積した SMZ と呼ばれる半導体全光スイッチを用いている。本デバイスは、2 台の半導体光増幅器において異なるタイミングで信号光に位相変化を誘起することにより、低速な位相緩和をキャンセルしながら高速応答を実現している。

(*6) 偏波分散(PMD: Polarization-Mode Dispersion)

光ファイバのコア形状が僅かに非対称であることに起因して二つの直交偏波モード成分間に伝搬時間差が生じる現象である。PMD は温度や応力など伝送路の環境変化によって時間的に変動す

るとともに、ファイバ長手方向の分布に伴う統計的性質を有することから、その補償は一般に困難である。高速伝送においてはさらに PMD の波長依存性（高次 PMD と呼ばれ、直交偏波モード成分間の群速度分散の差などが生じる）が大きな障害となる。

- ・ 波長制御における複雑性
- ・ 光パワーの増大

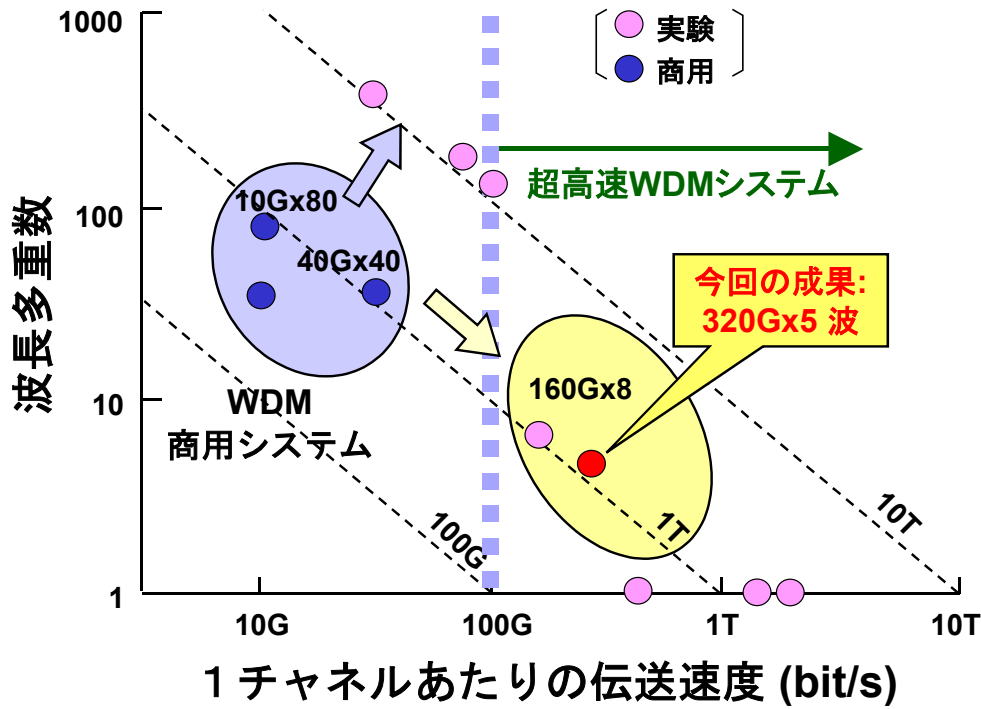


図1 WDM 伝送システムにおける超高速化の重要性

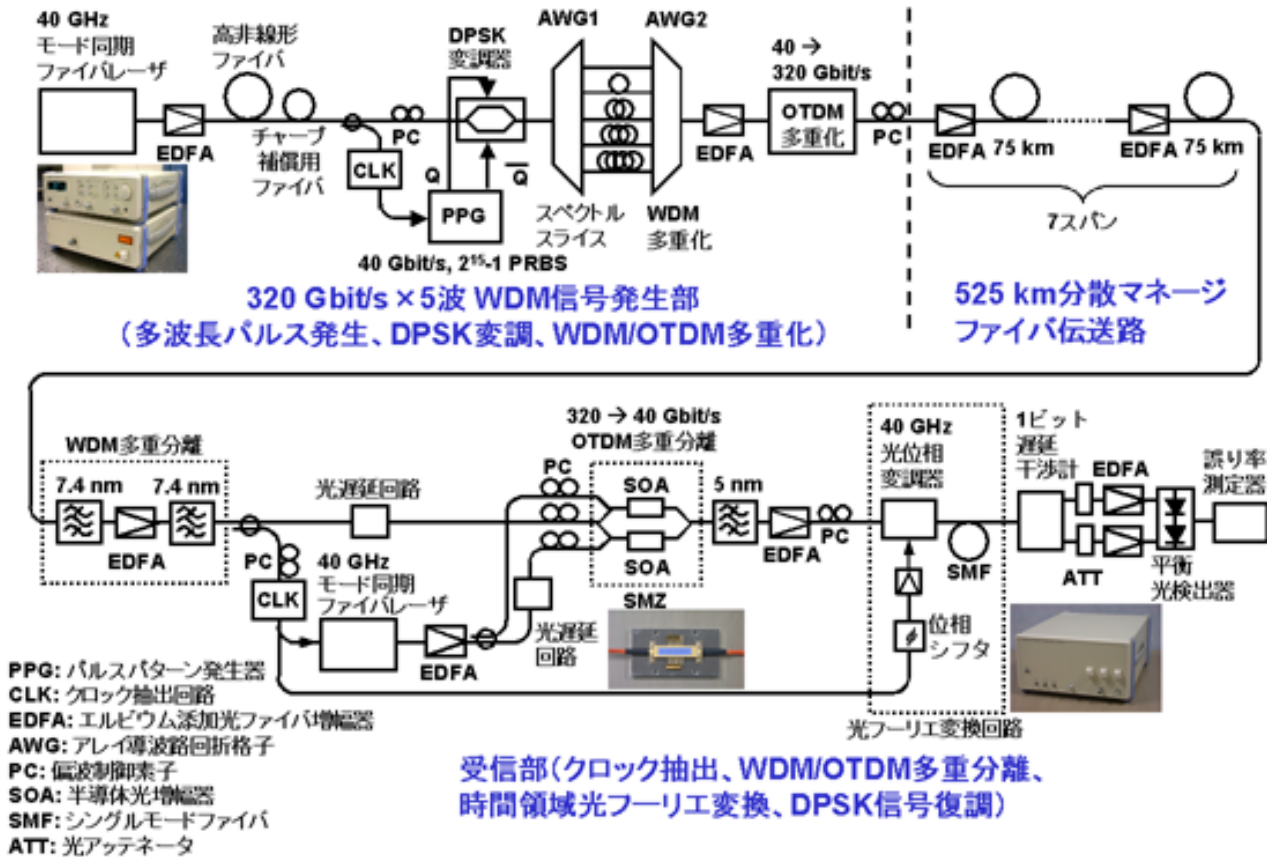


図2 320 Gbit/s × 5波-525 km WDM 伝送実験系

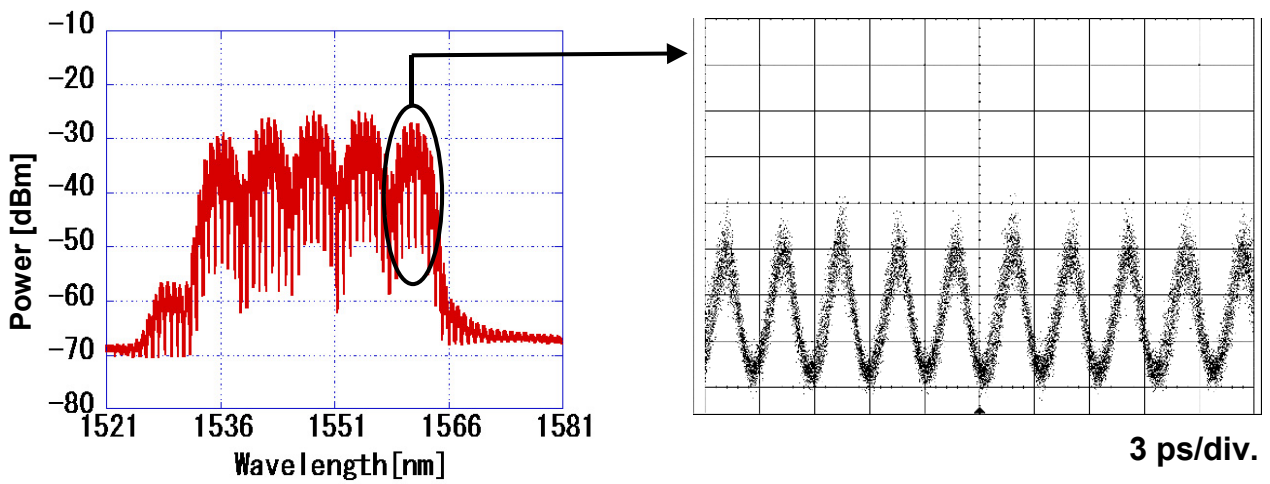


図3 320 Gbit/s × 5 波 WDM 信号のスペクトル (左) と 1 波長を抽出したときのパルス波形 (右)

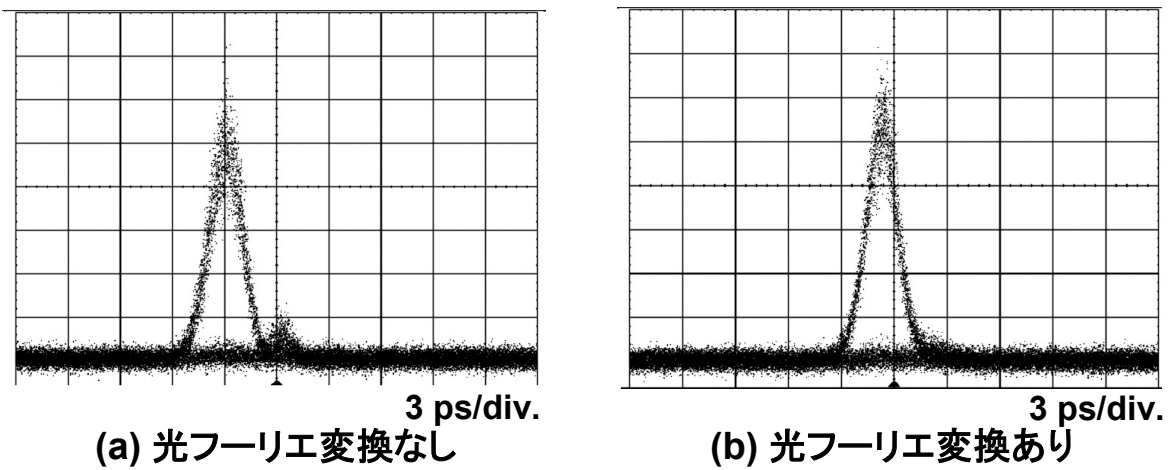


図4 伝送後のパルス波形の歪みを時間領域光フーリエ変換によって除去した結果。(a)光フーリエ変換前のパルス波形、(b)光フーリエ変換後のパルス波形

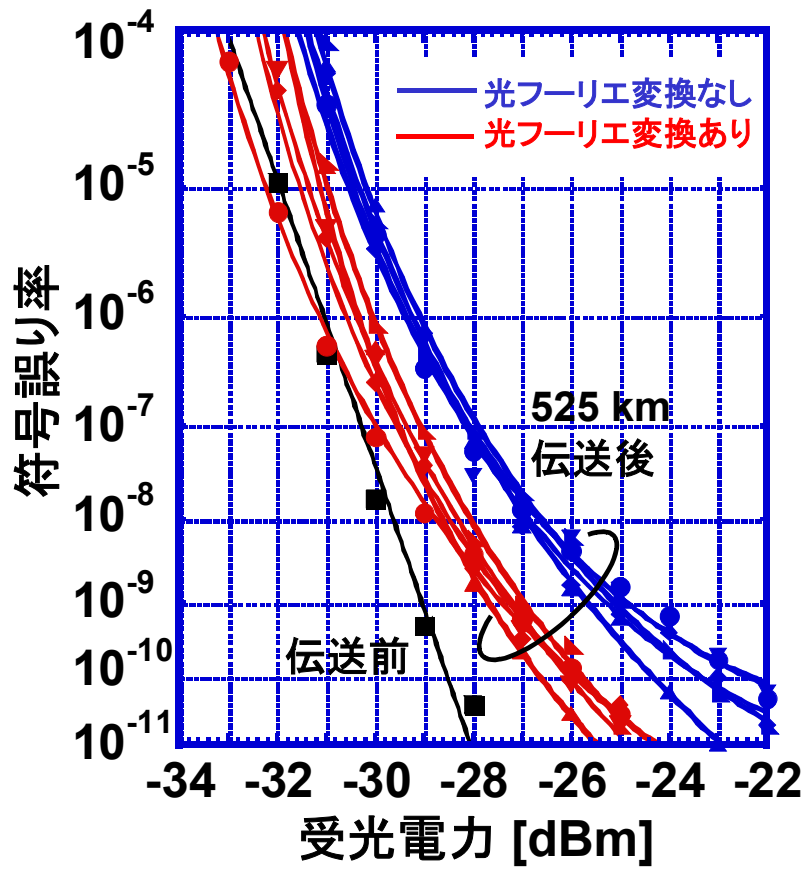


図5 符号誤り率測定結果