

平成18年8月30日

強度変調による簡便な光時分割多重方式を用いて 160 Gbit/s 信号の 600 km 伝送に成功
—時間領域光フーリエ変換を用いて安定な超高速長距離伝送を実現—

中沢 正隆

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: 022-217-5522, Fax: 022-217-5523

<成果の概要>

東北大学電気通信研究所の中沢正隆教授・廣岡俊彦助手の研究グループは、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を用いることにより、600 kmにわたる 160 Gbit/s光時分割多重(OTDM^{*2}: Optical Time Division Multiplexing)信号の伝送に成功しました。これはOOK^{*3}(On-Off Keying)と呼ばれる最も簡便な強度変調方式では、伝送速度 160 Gbit/sで世界で初めて 600 kmの長距離伝送を実現したものです。

1 波長あたりの伝送速度が 100 Gbit/sを超える超高速光通信においては、信号光のパルス幅が 1~2 ピコ秒 (1 ピコ秒=10⁻¹²秒) 程度と短くなるため、光ファイバ中の波長分散や偏波分散などの波形歪みが伝送品質に大きな影響を及ぼします。そのため、偏波多重^{*4}やCS-RZ (Carrier-Suppressed Return-to-Zero), DPSK^{*5} (Differential Phase Shift Keying)と呼ばれる新しい変調方式を導入し、さらに誤り訂正符号(FEC: Forward Error Correction)を組み合わせることにより、伝送距離の延長やマージンの拡大が行なわれています。しかし従来から用いられてきた最も簡単な単一偏波・OOK変調方式では、これまでは約 400 km程度の伝送距離が限界でした。

我々はこれまでに、受光器の前に光フーリエ変換回路を設置し、歪んだ伝送パルスの時間波形を不変量である周波数スペクトルの包絡線に変換することにより、信号波形の歪みを一括して除去する新たな伝送方式を提案してきました。今回、本技術を 160 Gbit/s OTDM 伝送に適用することにより、伝送距離を 600 km まで延長することに成功しました。これは単一偏波・OOK 変調方式による 160 Gbit/s OTDM 伝送ではこれまでで最長の伝送距離です。

この成果は9月下旬にフランスで開催されるヨーロッパ光通信国際会議(ECOC2006)において発表を行なう予定です。

<研究の背景>

インターネットの進展とブロードバンド回線の急速な普及に伴い、基幹ネットワークのさらなる高速化に対する要求が高まっています。現在商用化されている基幹伝送系では、1波長あたり10 Gbit/sの信号を波長多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)し数百 Gbit/sの伝送容量を実現しています。また最近では1波長あたり40 Gbit/sのシステムが導入されようとしています。

次世代の超高速光通信システムとして現在1波長あたり160 Gbit/sの超高速光伝送技術の研究が世界中で盛んに行なわれています。1995年に中沢らによって光ソリトンを用いた160 Gbit/s-220 km伝送実験が初めて行なわれ、それ以来10年以上にわたり長距離化・高品質化に向けた検討が進められてきました。しかし、このような超高速光通信においては信号光のパルス幅が1~2ピコ秒程度と短くなるため、光ファイバ中の波長分散や偏波分散などによる波形歪みが伝送品質に大きな影響を及ぼします。その結果、従来から用いられている最も簡単な強度変調(OOK)方式では、光S/N比の劣化や隣り合うパルスの裾野の重なりによる相互作用の発生、さらにはビットパターンに依存した複雑な波形歪みが生じることにより、伝送距離が数百 kmに制限されていました。

<従来の技術>

160 Gbit/s伝送システムの長距離化の試みとして、2003年に沖電気によりCS-RZと呼ばれる変調方式を用いた640 kmの長距離伝送が報告されました。この方式では隣接するパルスの位相を反転させることにより、隣り合うパルスの裾野の重なりを抑え、パルス間の相互作用を抑圧しています。しかしCS-RZを160 Gbit/s信号に適用するには、温度や振動による光パルスの位相変化を抑えるために高精度な位相制御技術が必要となる問題点があります。また2005年にはルーセントおよびベルリン工科大学により4320 kmの長距離伝送実験が報告されています。この方法では偏波多重およびDPSK (Differential Phase Shift Keying)と呼ばれる光の位相を用いた変調方式を導入し、さらに誤り訂正符号(FEC: Forward Error Correction)を組み合わせることにより伝送品質の向上が図られています。しかしDPSKの変復調器は構成が複雑であり、さらにFECを用いるとコストが大幅に増大し、経済的なシステムの構築が難しいという問題がありました。

<今回の技術のポイント>

(1) 時間領域光フーリエ変換回路

160 Gbit/s OTDM伝送においては従来は無視できていた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。そこで今回の伝送実験では、波形歪みを受けた信号パルスの時間波形からその周波数スペクトルを時間軸上に再生するための光フーリエ変換回路を作製し、これを用いて信号波形歪みの除去を行ないました。作製した光フーリエ変換回路を図1に示します。本装置は光位相変調器、変調器ドライブ用アンプ、ならびに数十~数百 m程度の短尺の光ファイバを用いて構成されています。今回作製した装置においては、特に光位相変調器の低損失化・高位相変調度化を図り、さらに温度制御を施すことにより、高性能かつ安定なフーリエ変換動作を実現しました。

(2) 時間領域光フーリエ変換による波形歪みの除去

今回の伝送実験では、従来のように信号パルスに生じた波形歪みを時間軸上で補償しようとする代わりに、あらゆる線形歪みが信号パルスの時間波形に発生してもその周波数スペクトルの包絡線は完全に保存されるという性質を用いて波形歪みの除去を行なう点がポイントです。その原理を図2に示します。光ファイバ伝送後の光信号の無歪みスペクトルを(1)の光フーリエ変換回路を用いて時間軸上のパルス波形に変換することで、あらゆる線形歪みに対して入力信号パルスの時間波形を出力側で完全に再現することができます。図3(a)は160 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。パルスの裾野にリップル(さざ波)状の歪みが見られ、またパルスの到着時間も揺らいでいます。一方図3(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。パルスの幅が2.8 psから1.9 psに細くなるとともに、パルスの裾野にあった歪みが抑制され、またパルスの到着時間の揺らぎも低減されています。

(3) 単一偏波・OOK変調による長距離超高速光伝送の実現

(1), (2)で述べた伝送方式により160 Gbit/s OTDM信号を600 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4にその実験系を、図5に符号誤り率の測定結果を示します。図3(a)に見られた歪みを除去することにより、伝送品質の向上を実現しました。その結果、単一偏波・OOK変調ではこれまでで最長の伝送距離となる600 kmの伝送に世界で初めて成功しました。600 kmは東京-大阪間の回線長に相当し、国内の基幹ネットワークへの適用が可能な伝送距離です。

これらの成果は、9月下旬にフランスで開催される国際会議 European Conference on Optical Communication (ECOC2006)において発表を行なう予定です。なお本研究は文部科学省科学研究費補助金「特別推進研究」(16002008)の援助を受けて行なわれました。

<今後の予定>

今後は時間領域光フーリエ変換とDPSKを組み合わせることにより、伝送距離の拡大を図る予定です。

<用語解説>

(*1) 時間領域光フーリエ変換

信号パルスの周波数スペクトルの包絡線形状を時間軸上のパルス波形として再生する手法であり、光位相変調器と群速度分散をもつ短尺の光ファイバによって実現することができる。具体的には、光パルスをまず光位相変調器に入力し、時間について二次関数で変調する。これによりパルス波形の各時間位置において、時間に比例した大きさの周波数シフトを受ける。その周波数シフトを受けたパルスは群速度分散をもつ光ファイバに入力される。このとき群速度分散によって周波数成分に応じて異なる時間遅延(パルス内群遅延)が光パルスの時間波形に与えられる。これにより光パルスの各周波数成分が時間軸上の異なった位置に分離される。そこで、位相変調の大きさに対して群速度分散の大きさを適当に選ぶことにより、群速度分散ファイバの出力で光フーリエ変換前の光パルスのスペクトル形状に比例した波形が時間軸上に生成される。

(*2) OTDM (Optical Time Division Multiplexing)

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 40Gbit/s が限界であるため、160 Gbit/s の伝送を実現するには、40 Gbit/s の信号を光領域で 4 倍に時間多重する OTDM 技術が用いられる。

(*3) OOK (On-Off Keying)

2 値の情報信号を光パルスのオン（振幅 1）とオフ（振幅 0）に変調する方式である。強度変調器を用いて容易に実現することができる。

(*4) 偏波多重

隣り合うパルスの偏波方向を直交させることにより、パルス間の相互作用を抑制する手法である。偏波がお互いに直交しているので、パルスの裾野がビットスロットから外にはみ出ても隣のパルスとは重ならないため、同じ伝送速度でも幅の太いパルスを用いることができるという特徴がある。

(*5) DPSK (Differential Phase Shift Keying)

OOK とは異なり、パルスの振幅は全て 1 のまま固定しておき、2 値の情報信号を隣り合うパルスの位相差（例えば「1」なら同位相、「0」なら逆位相）に変調する方式である。出力側では隣り合うパルスを干渉させることにより位相変調信号を強度変調信号に変換した後、平衡検波回路により受信する。OOK 方式よりも受信感度を向上できるという特徴がある。



図1 作製した光フーリエ変換回路の外観

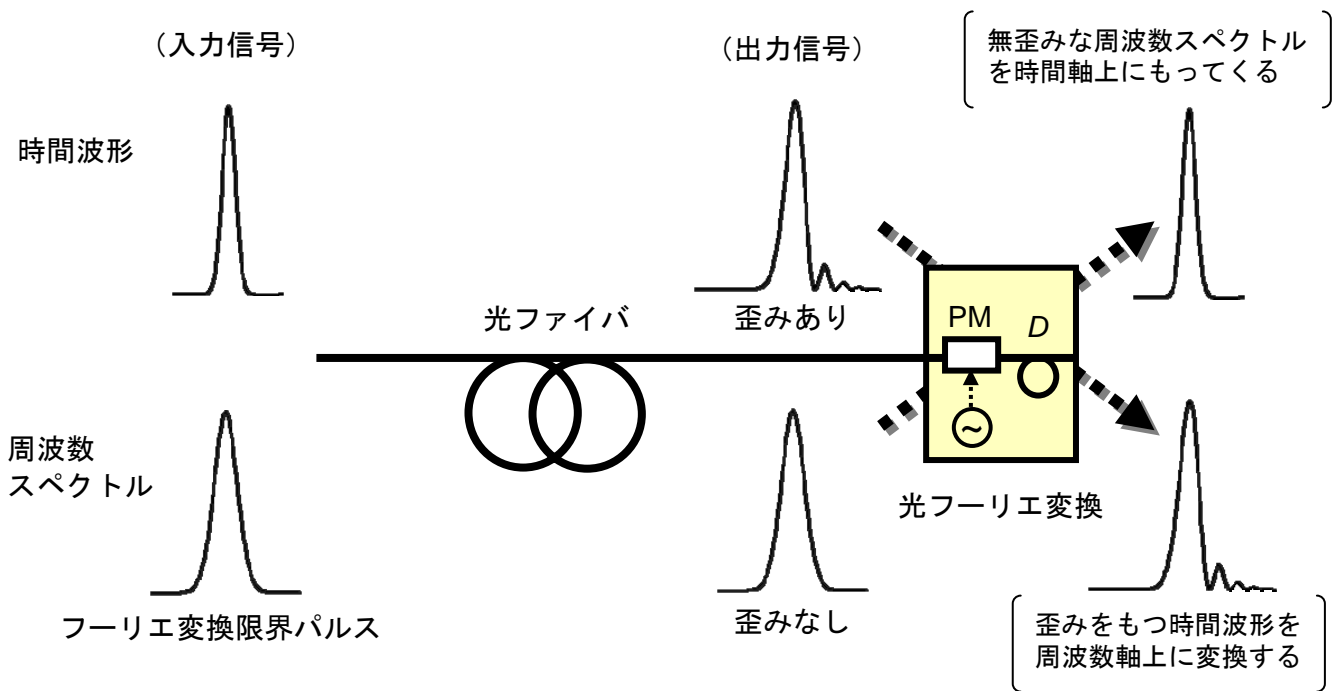


図2 時間領域光フーリエ変換を用いた波形歪み除去の原理

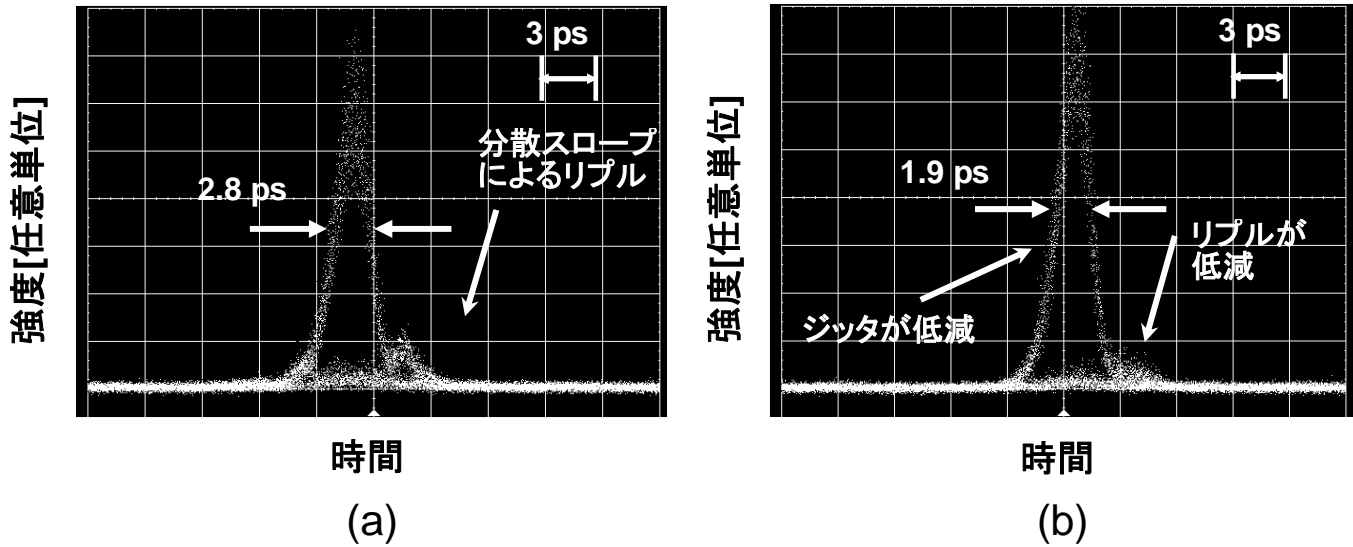


図3 伝送後のパルス波形の歪みを時間領域光フーリエ変換によって除去した結果。(a)光フーリエ変換前のパルス波形、(b)光フーリエ変換後のパルス波形

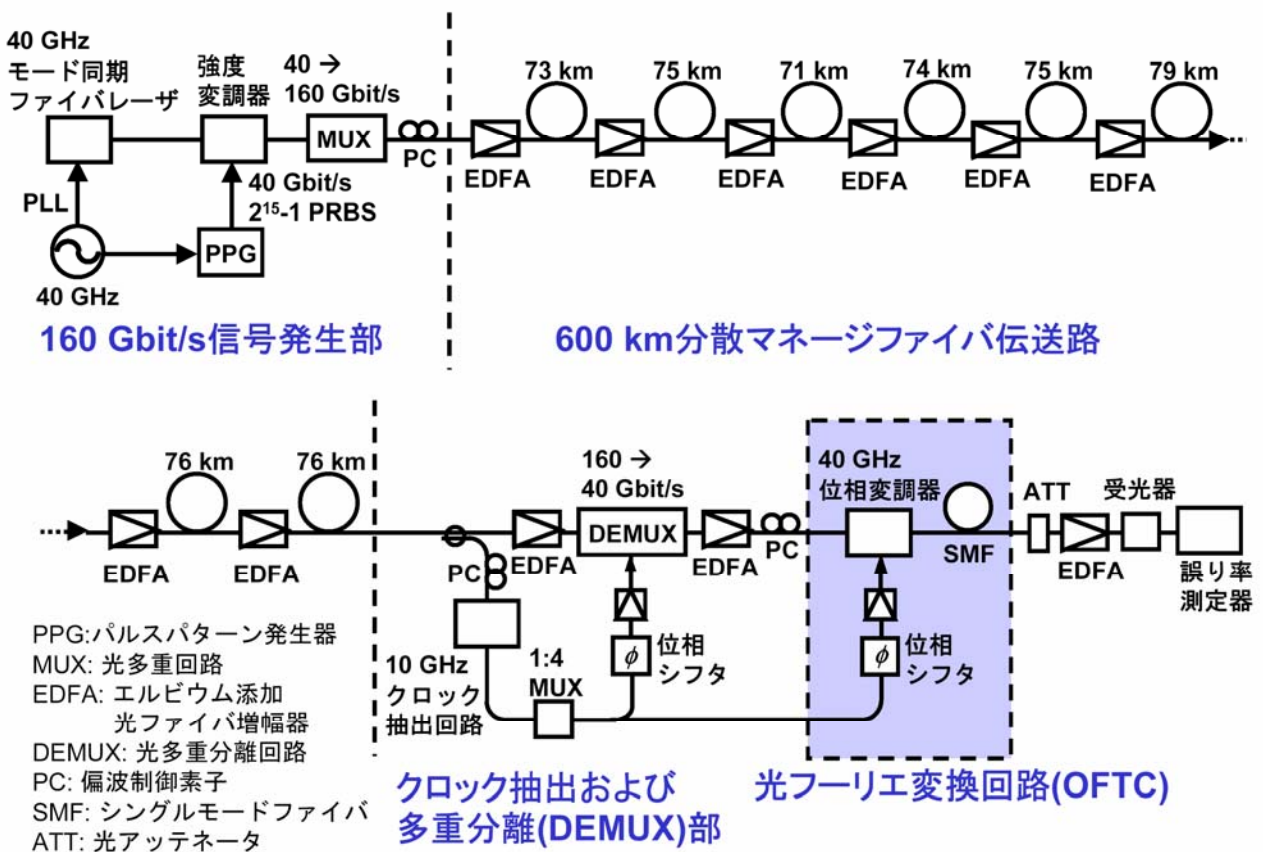


図4 160 Gbit/s-600 km OTDM 伝送実験系

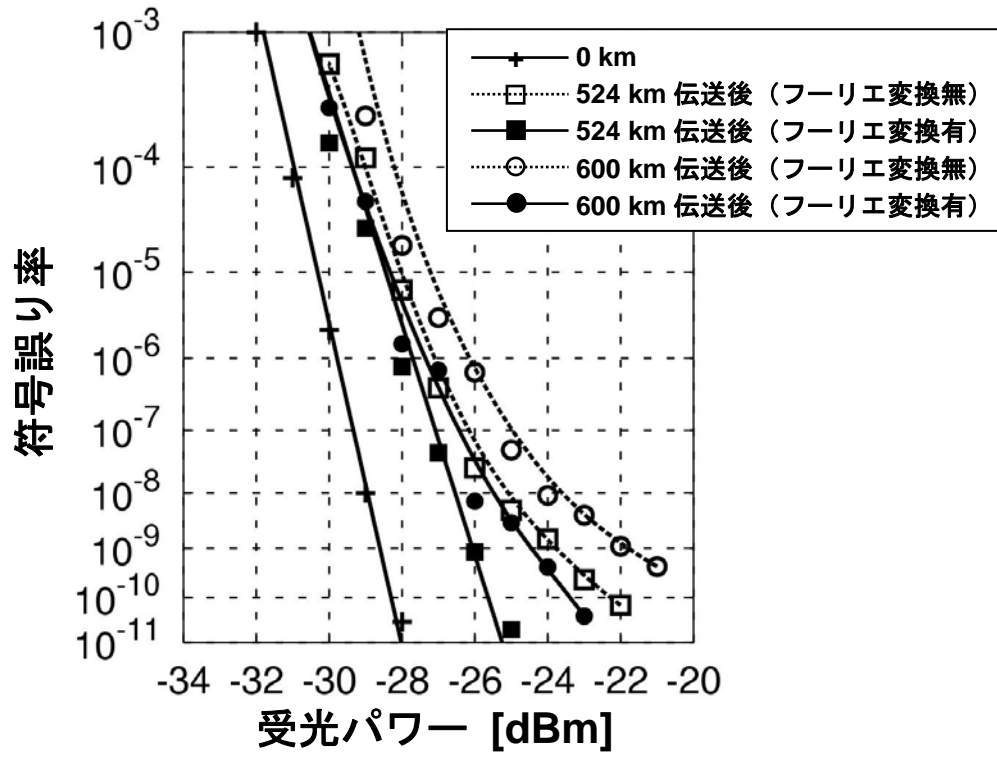


図5 符号誤り率測定結果