

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：特別推進研究
 研究期間：2004～2008
 課題番号：16002008
 研究課題名（和文） 光フーリエ変換を用いた新しい超高速無歪み光伝送技術の確立
 研究課題名（英文） Establishment of novel ultrahigh-speed distortion-free optical transmission technology using time-domain optical Fourier transformation

研究代表者
 中沢 正隆 (NAKAZAWA MASATAKA)
 東北大学・電気通信研究所・教授
 研究者番号：80333889

研究成果の概要：

本研究では時間領域光フーリエ変換(OFT: Optical Fourier Transformation)という新たな無歪み高速光伝送技術を提案し、高速伝送で問題となっていた様々な波形歪みを一括して除去する技術を確認した。特筆すべき成果として、160 Gbit/s-1,000 km および 320 Gbit/s-525 km の長距離超高速伝送が挙げられる。これらは直線路における 160～320 Gbit/s 伝送実験としてはいずれも世界最長の伝送距離を実現したものであり、さらに WDM (波長分割多重) と組み合わせることにより 320 Gbit/s ベースの大容量伝送をも初めて実現した。またこれらと並行して、OFT の性能を向上させるために、パラボラ形状の光パルスと信号光との相互位相変調による理想的な光フーリエ変換を提案し、それを実験により実証した。具体的には、アレイ導波路回折格子を用いた波形整形回路によりパラボラ光パルスを発生させ、これを用いて歪みを受けた信号光パルスに全光フーリエ変換を施した結果、従来の正弦波変調型フーリエ変換では取りきれなかった波形歪みを除去することに成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	80,900,308	24,270,000	105,170,308
2005年度	99,400,232	29,820,000	129,220,232
2006年度	48,100,000	14,430,000	62,530,000
2007年度	68,700,000	20,610,000	89,310,000
2008年度	61,900,000	18,570,000	80,470,000
総計	359,000,540	107,700,000	466,700,540

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 通信・ネットワーク工学

キーワード：時間領域光フーリエ変換、高速光伝送、光時分割多重、超短光パルス、フーリエ変換限界パルス、DPSK、光多重分離、波長分割多重

1. 研究開始当初の背景

インターネットで扱われる情報が音声、静止画、動画と多彩になり、またブロードバンド回線が家庭にまで急速に普及するにつれて、快適なコミュニケーション環境を提供す

るユビキタスネットワークの実現が大変重要になってきている。超高速光通信技術はそのネットワークを支える中核技術である。今後、光通信の大容量化が加速され、幹線系の伝送速度が 40 Gbit/s 以上となると、光ファ

ファイバの波長分散や偏波分散などによる光信号の波形歪みが大きな問題となる。また将来予想される 160 Gbit/s 以上の高速伝送においては、信号パルスの時間幅が数ピコ秒以下と大変狭くなるため、今までは無視できていた高次の分散効果や温度・環境の変化に伴うファイバの分散値の時間変動が伝送特性に大きな影響を及ぼす。これらの歪みを個別に補償する技術がこれまでに色々開発されてきたが、一つの装置で一括してこれらの多様な波形歪みを除去することは困難であった。

2. 研究の目的

本研究は、超高速光伝送において光ファイバの波長分散や偏波分散などによって生ずる信号光パルスの波形歪み（パルス広がり、リップルの発生、ジッタ）を一括して除去する新たな光伝送の基盤技術の確立を目的とする。具体的には、時間領域光フーリエ変換という新しい方法により、光ファイバの伝搬特性に依存しないで情報を正確に伝送させる無歪み光伝送技術を実現する。本伝送技術では、これまで情報伝送に用いられることのなかった信号のスペクトル形状に情報を担わせることがポイントである。すなわち、伝送中に波形歪みが生じてもスペクトルの形状が一貫して変わらないことに着目し、この歪みのないスペクトルを光フーリエ変換という手法を使ってパルスの時間波形に変換することにより、伝送前の信号波形を完全に再生することができる。

3. 研究の方法

本研究ではまず無歪み伝送の原理およびその基本性能を実証するために、本技術に関する伝送実験システムを立ち上げ、伝送方式全体の基本検討を行なう。次に主要技術としてフーリエ変換限界パルス光源技術ならびに光フーリエ変換回路技術を確立し、伝送実験を通じて超高速伝送への有用性を実証する。さらに、伝送速度 160 Gbit/s 以上の超高速化を実現するために、光フーリエ変換を全光学的に実現する方法を確立し、波長多重(WDM)と組み合わせ 160 Gbit/s ベースの大容量無歪み伝送技術の実現を目指す。

4. 研究成果

4.1 当初の研究線表（予定）と得られた成果の全体像

本研究の当初の計画と得られた成果を表 1 に示す。本伝送技術の要となる①超高速フーリエ限界パルス発生・制御技術、および②時間領域光フーリエ変換技術の開発に取り組み、これらの技術を③に示すような超高速伝送実験に適用してきた。以下の節において

これらの成果について詳細に説明する。

表 1 当初の研究計画と得られた成果

項目	年度	H16	H17	H18	H19	H20
①超高速フーリエ限界パルス(TL)発生・制御技術	計画	40 GHzピコ秒 TLパルス光源の開発	TLパルスの高純度化	パラボラ光パルス発生に関する検討	パルス広がりによる160 Gbit/s伝送パルスの発生	160 Gbit/s WDM用多波長パルスの発生
	成果	40 GHzモード同期ファイバレーザの作製	モードホッピングの抑制	AWGを用いた40 GHzパラボラパルス発生の実現	FDMモード同期によるレーザ出力のサブピコ秒への短パルス化	SC光とAWGを用いた160-320 Gbit/s多波長パルスの発生
②時間領域光フーリエ変換技術	計画	40 Gbit/s伝送用光フーリエ変換回路(OFTC)の設計	40 Gbit/s伝送用OFTCの試作	パラボラ変調型全光フーリエ変換の理論検討	パラボラ変調型全光フーリエ変換の実現	WDM用光フーリエ変換の検討
	成果	OFTC/パラメータ(チャープ幅・分散)の最適化と基本性能の理論解析	試作完成、160 Gbit/s伝送への適用	BrightおよびDarkパラボラパルスを用いた全光フーリエ変換の理論解析	40 GHz全光フーリエ変換の実証	WDM伝送へのOFTCの適用と歪み除去効果の実証
③時間領域光フーリエ変換法による無歪み伝送実験	計画	40 Gbit/s伝送実験準備	40 Gbit/s伝送実験	160 Gbit/s伝送実験準備	160 Gbit/s伝送実験	160 Gbit/s WDM伝送実験
	成果	伝送実験の立ち上げ完了	160 Gbit/s-800 km OTDM-OOK 伝送	160 Gbit/s-1,000 km OTDM-DPSK 伝送	+160 Gbit/s フォールド伝送 +320 Gbit/s-525 km OTDM-DPSK 伝送	5x320 Gbit/s-525 km WDM-DPSK 伝送

4.2 研究成果の詳細説明

4.2.1 40 GHz フーリエ限界パルス発生技術（項目①、H16～H17年度）

本伝送技術の実現にあたっては、余分なスペクトル成分がない高純度なフーリエ限界パルスの発生技術が重要な役割を果たす。我々は 40 Gbit/s ベースの光時分割多重(OTDM: Optical Time Division

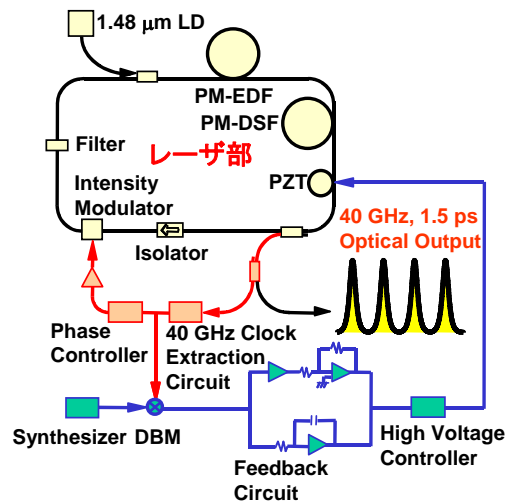
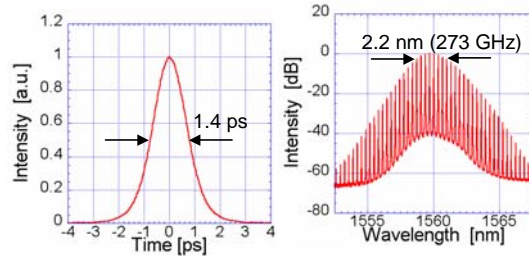
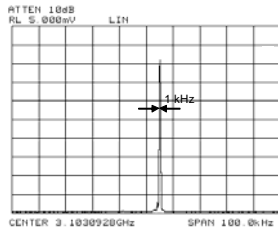


図 1 40 GHz モード同期ファイバレーザの構成とその外観

Multiplexing) 伝送への適用を念頭に、40 GHz パルスレーザを作製し、そのパルス発振特性の詳細な測定と解析を行なった。この高速パルスの発生はモード同期ファイバレーザで実現しており、ファイバレーザの共振器長を50 mまで短くした状態でスーパーモード雑音（高調波モード同期に伴うパルスの振幅雑音）を抑制することにより、パルス幅1.5 psのフーリエ限界パルスを安定に発生させることに成功している。本レーザの構成および出力特性をそれぞれ図1、図2に示す。しかし、本レーザではわずかな温度変化に伴い発振周波数の変動（モードホップ）が生じることがわかった。特に、光フーリエ変換をDPSK伝送に適用する場合には、発振周波数の変動を抑制し位相の高安定化を図ることが重要であり、モードホップの抑制が大きな課題になる。そこで、レーザ共振器内に狭帯域ファブリ・ペローエタロンを挿入し、且つ共振器長を5 m程度まで大幅に短くすることにより、モードホップを完全に抑制することに成功した。さらにエタロン素子の温度とレーザ共振器長を同時制御することにより、発振周波数を1 GHz以上連続掃引することに成功した。



(a) 自己相関波形 (b) 光スペクトル



(c) ヘテロダイン検波信号のスペクトル

図2 40 GHz モード同期ファイバレーザの出力特性

4.2.2 時間領域光フーリエ変換回路の試作との基本性能の実証(項目②、H16~H17年度)

高速で動作する光位相変調器と短尺な光ファイバ（群速度分散）を組み合わせ、40 Gbit/s 伝送用の光フーリエ変換回路(OFTC: Optical Fourier Transform Circuit)のプロトタイプを試作した。OFTCの簡略化した構成を図3に、完成した試作装置の外観(H 222 mm×W 425 mm×D 500 mm)を図4に示す。OFTCは光位相変調器、分散性媒質、変調器ドライ

バ用 RF アンプ、クロック抽出回路で構成されており、光位相変調器には LN (LiNbO₃) と呼ばれる光学材料のポッケルス効果を用いている。本プロトタイプでは特に、信号光パルスに大きな周波数チャープを印加するために光位相変調器の変調の高効率化(低 V_{π} 化)ならびに光挿入損失の低減を図ったことが特徴である。さらに温度制御を施すことにより、高性能かつ安定な長期動作を実現している。

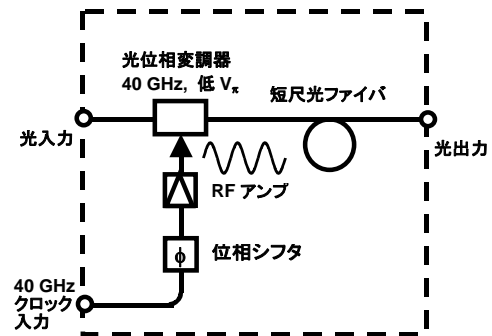


図3 40 Gbit/s 用 OFTC の簡略構成



図4 試作した OFTC の外観

次に本伝送技術の基本性能を実証するために、作製した OFTC を用いて 160 Gbit/s OTDM 伝送用パルスの伝送品質の改善効果を詳細に測定した。具体的には、伝送ファイバの二次分散および三次分散の大きさを時間的に変化させながら、OFTCにより波形歪みを除去し、160 Gbit/s の伝送速度で 120 km 伝送後の光信号の符号誤り率を測定した。その測定結果を図5に示す。光フーリエ変換を用いない場合には二次分散、三次分散の増加に伴い誤り率が著しく劣化したが、光フーリエ変換を用いた場合はエラーフロアやパワーペナルティが抑制され、伝送前とほぼ等しい誤り率を実現することができた。このことは、本手法により二次分散($< 1.7 \text{ ps/nm}$)および三次分散($< 1.7 \text{ ps/nm}^2$)の時間変動を同時に除去(適応等化)することに初めて成功したことを意味している。

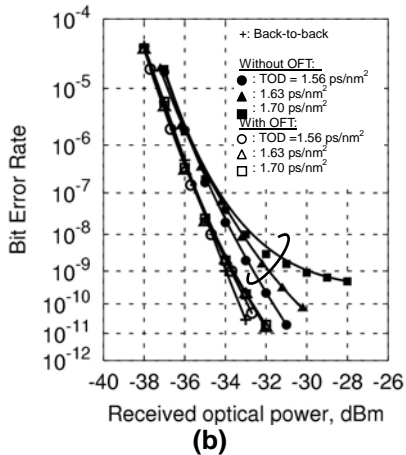
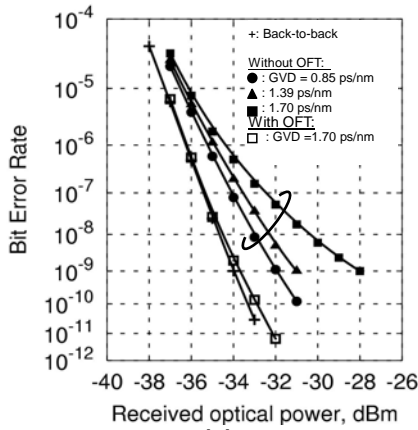


図5 OFT法を用いた二次分散(a)および三次分散(b)の適応等化

4.2.3 時間領域光フーリエ変換を用いた超高速OTDM伝送実験(項目③、H16~H20年度)

作製したピコ秒パルス光源および光フーリエ変換装置を実際に160 Gbit/s超高速・長距離伝送実験に適用し、詳細な性能評価を行なった。H17年度は光パルスの有る・無しに情報を乗せるOOK(On-Off Keying)方式に、H18年度には隣接する光パルスの位相差に情報を乗せるDPSK(Differential Phase Shift Keying)と呼ばれる最新の変調方式に時間領域光フーリエ変換法を適用することにより、伝送性能の向上を実現した。またH19年度にはOFT法による波形歪み除去効果を実環境下で実証するために、JGNII光テストベッドを用いて160 Gbit/s現場伝送実験を行なった。この方式は伝送速度を高速化する程有効な方法であることが判ってきたため、H20年度は伝送速度を320 Gbit/sに高速化し、さらにWDMと組み合わせて大容量・長距離伝送を実現した。これらの伝送実験の詳細を以下(1)~(5)に述べる。

(1) 160 Gbit/s-600 km OOK伝送(H17年度)

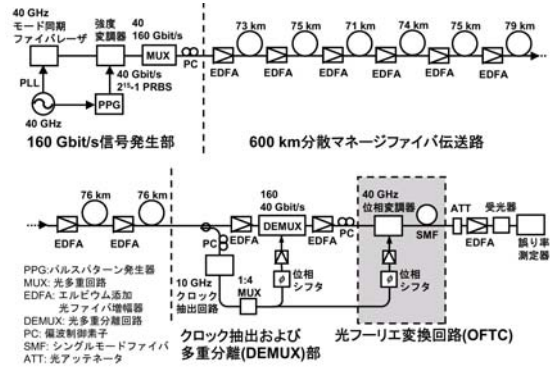


図6 160 Gbit/s-600 km OOK-OFT伝送実験系

160 Gbit/s-600 km OOK伝送実験系を図6に示す。パルス光源には上記4.2.1で述べた40 GHzモード同期ファイバレーザを用いている。LN変調器を用いて40 GHz光パルスをデータ変調し、光のMUX回路を用いて160 Gbit/sに多重化することでOTDM伝送信号を発生させている。伝送路には分散マネージされた光ファイバを用い、分散および分散スロープを低減化している。その結果、伝送路の平均分散は 4×10^{-4} ps/nm/km、平均分散スロープは 3×10^{-3} ps/nm²/kmであり、また多中継伝送のために約75 kmの間隔でEDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)を挿入している。受信側では伝送後の信号から抽出したクロック信号を用いてEA変調器により160 Gbit/s信号を40 Gbit/sに多重分離し、OFTCに入力した。OFTC入力前においては、図7(a)の上を示すように、伝送後の時間波形は残留分散によりパルス幅が2.8 psに広がり、また三次分散によるリップルが生じている。しかし、その信号を試作したOFTCに通過させると、図7(a)の下に示すようにパルス幅は1.9 psに戻り、リップルも低減されアイ開口が良くなっていることが判る。このように、OFT法はシステムの高性能化に極めて有効であることが判る。符号誤り率の測定結果を図7(b)に示す。524 km伝送後では、OFTCを用いない場合にエラーフロアが見られるが、OFTCを用いて歪みを除去することによりフロアが消失している。600 km伝送後ではOFTC後にもフロアが残留するが、誤り率 10^{-9} におけるパワーペナルティが2 dB改善され、エラーフリー伝送が実現できている。

単一偏波による通常のOOK伝送では伝送可能な距離は今まで約400 kmに制限されていたが、今回600 kmまで延長することに初めて成功した。このように光フーリエ変換により超高速・長距離OTDM伝送が可能であることを実証し、本伝送技術の有効性を明らかにした。

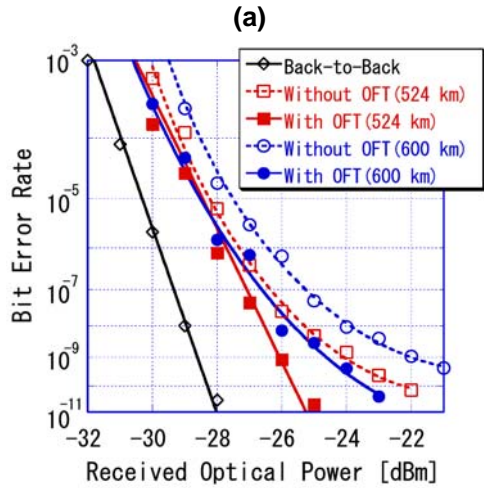
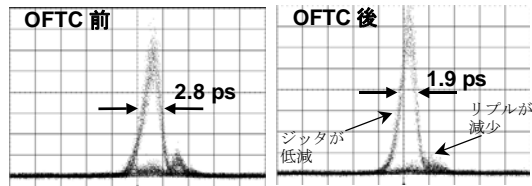


図7 524 km 伝送後 40 Gbit/s に多重分離した信号波形 (a) および符号誤り率測定結果 (b)

(2) 160 Gbit/s-1,000 km DPSK伝送 (H18 年度)

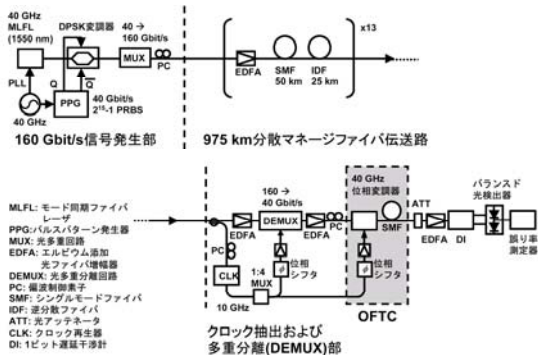


図8 160 Gbit/s-1,000 km DPSK-OFT 伝送実験系

DPSK 伝送方式は平衡検波を採用できるため受信感度を 3 dB 向上できる特徴がある。即ち、低い伝送パワーでも S/N が確保できるため非線形光学効果を低減できる。このため近年特に 40 Gbit/s 以上の超高速伝送において伝送距離の延長ならびにシステムマージンの拡大に有効な技術として盛んに研究されている。我々は DPSK 伝送にも OFT 技術が利用できることを見抜き、DPSK 伝送の OFT による高度化を図った。その結果、160 Gbit/s OTDM 伝送に DPSK を適用することで距離を 1,000 km に拡大することに世界で初めて成功した。その 160 Gbit/s-1,000 km DPSK-OFT

伝送実験系を図 8 に示す。OOK-OFT 伝送実験と同様、光源として 40 GHz モード同期ファイバレーザを用い、二電極 LN 変調器を駆動電圧 $2V_{\pi}$ でプッシュプル動作させることにより DPSK 変調を行なっている。この DPSK 信号を 160 Gbit/s に OTDM 多重化後、975 km の分散マネージ伝送路に入射させた。出力端では、160→40 Gbit/s への多重分離後に OFTC を挿入し、光フーリエ変換した後に 1 ビット遅延干渉 (Delay Interferometer: DI) により強度変調信号に復調した。復調後の信号をバランス PD で受光して、符号誤り率を測定した。

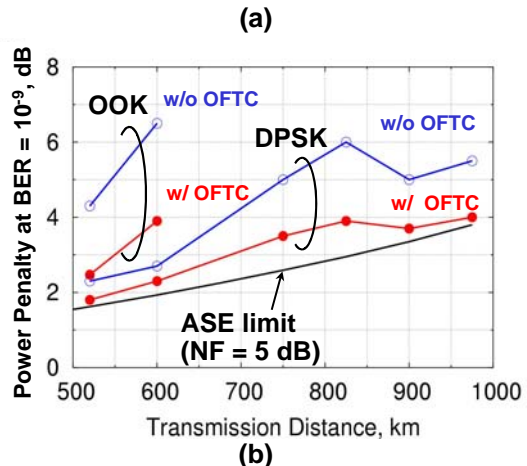
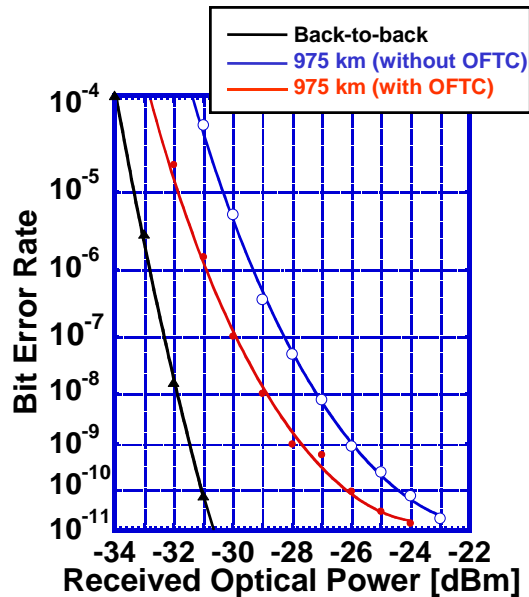


図9 160 Gbit/s-975 km 伝送結果。(a) 符号誤り率特性、(b) 伝送距離とパワーペナルティの関係

975 km 伝送後の符号誤り率の測定結果を図 9 (a) に示す。975 km 伝送後にはエラーフロアが見られるものの、 10^{-10} 以下の安定な誤り率特性が得られ、直線路では世界最長となる 160 Gbit/s 伝送に成功した。図 9 (b) に伝送距離とパワーペナルティ (誤り率 10^{-9}) の関係を示す。OOK 伝送では 600 km 伝送時に既に

6.5 dB のパワーペナルティがあり OFT 適用後も 4 dB までしか改善できなかった。それに対して、DPSK 伝送では 975 km においてもペナルティは 5.5 dB であり、さらに OFT を適用すると 4.0 dB に改善された。これは伝送路中に挿入した EDFA (Noise Figure = 5 dB) による ASE 雑音で制限される理論限界にほぼ一致しており、このように OFT は DPSK 伝送における波形歪み除去にも大変有効であることが判る。

(3) 160 Gbit/s-200 km DPSKフィールド伝送 (H19 年度)

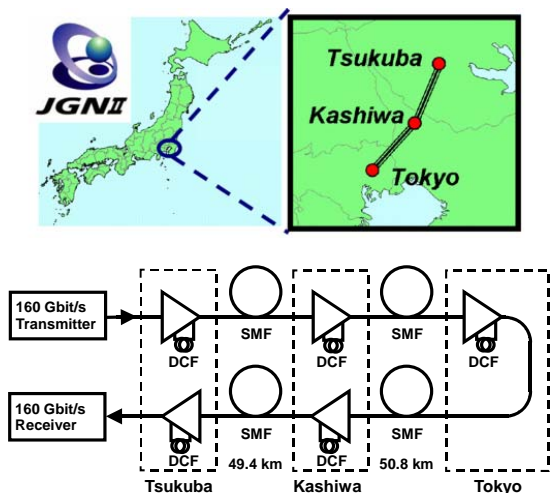


図 10 JGNII 光テストベッドの構成

次に、OFT 法による波形歪み除去効果を実環境下で実証するために、JGNII 光テストベッドを用いて 160 Gbit/s 現場伝送実験を行なった。JGNII テストベッド伝送路の構成を図 10 に示す。つくば、柏、大手町の 3 つの局に光中継器が設置されており、本実験ではつくば局から光信号を入力し大手町局で折り返して再びつくば局で受信する往復 200 km の構成を用いた。つくば-柏、柏-大手町はそれぞれ約 50 km のスパン長である。各スパンは通常のシングルモードファイバで構成されており、各中継局におかれた分散補償ファイバで各スパンの分散を補償している。200 km 伝送路全体の残留分散は 1 ps/nm 以下に補償しており、残留分散スロープの大きさは -0.19 ps/nm^2 であった。また伝送路全体の DGD (Differential Group Delay) は 1.8 ps であった。各中継局に設置されている光ファイバ増幅器 (EDFA) は 3 段構成であり、各段の間には可変光減衰器 (VOA: Variable Optical Attenuator) を挿入し各 EDFA の出力パワーを可変にしている。本実験では各スパンへの入力パワーを 5.5 dBm に設定した。

伝送実験の符号誤り率の測定結果を図 11 に示す。フィールド伝送では実験室とは異なりファイバ周辺における環境変動の影響に

より大きな偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) が生じ、これが伝送特性の大きな劣化要因となると考えられる。中継器構成を変える前 (VOA 挿入時) は、同図の破線で示すように、OFT を用いない場合には 10^{-9} におけるパワーペナルティは 4.8 dB、OFT を用いた場合でも 2.5 dB であった。OFT により高次 PMD およびその時間的な変動は補償できているが、ペナルティの大きさは十分小さいとはいえない。一方中継器構成を変えて PMD を低減した状態 (VOA 除去、EDFA 1 段) で誤り率を測定したところ、同図の実線で示すように、OFT を用いることによりペナルティを 1.5 dB まで小さくすることができた。

以上の結果より、OFT により高次 PMD およびその時間的な変動を補償することにより 1.5 dB の低いペナルティで 200 km のエラーフリー伝送に成功し、実環境下において OFT 法が大変有効であることを明らかにした。

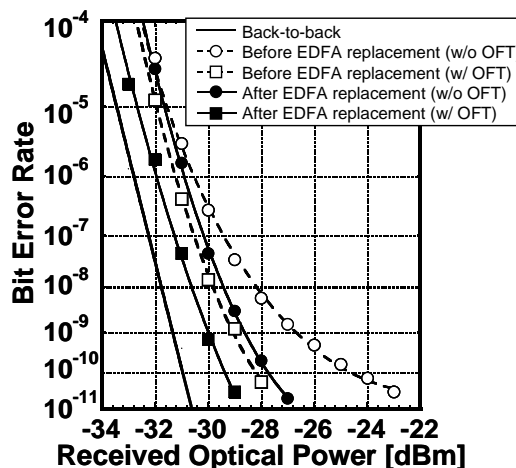


図 11 160 Gbit/s-200 km 誤り率測定結果

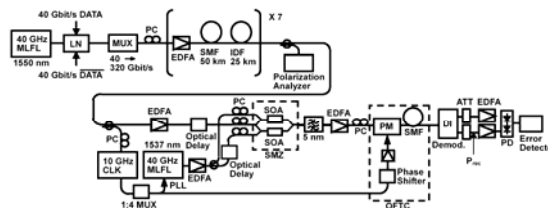


図 12 320 Gbit/s-525 km DPSK-OFT 伝送実験系

(4) 320 Gbit/s-525 km DPSK伝送 (H19 年度)

以上のように OFT 法は伝送速度を高速化すればする程有効な方法であることが判ってきた。そこで本伝送技術をさらに高速の 320 Gbit/s OTDM 伝送に適用し、長距離伝送を試みた。この実験は本特別推進研究の線表では想定しなかった高度なものである。その伝送

実験系を図 12 に示す。パルス光源には 40 GHz の FM モード同期ファイバレーザ（波長 1550 nm、パルス幅 0.8 ps）を用い、40 Gbit/s で DPSK 変調した後、単一偏波で 320 Gbit/s に OTDM 多重化を行なっている。さらに伝送中の偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) の影響を最小にするために、偏波コントローラにより入射偏波状態を伝送路の主偏波状態 (PSP: Principal State of Polarization) に一致させ、525 km の分散マネージ伝送路に入射させている。PMD とは光信号の偏波の方向によって群速度やパルス広がりが起こる現象であり、高速伝送になるほどその影響が大きい。受光部ではまずクロック信号を抽出した後、そのクロックで PLL 動作する 40 GHz モード同期ファイバレーザ（波長 1537 nm、パルス幅 1.6 ps）を制御光パルス光源として対称マッハ・ツェンダ (SMZ: Symmetric Mach-Zehnder) 光スイッチにより 40 Gbit/s に多重分離している。光フーリエ変換回路により歪みを除去した後、1 ビット遅延干渉計により強度信号に変換した信号を平衡検波し、符号誤り率を測定している。

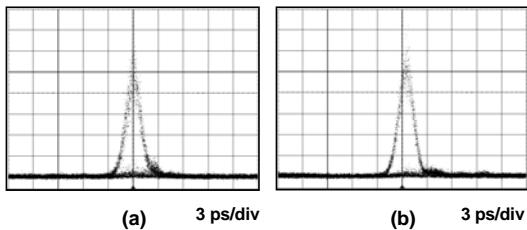


図 13 525 km 伝送後 40 Gbit/s に多重分離した信号波形 (DPSK から OOK への変換後)。(a) OFT 無し、(b) OFT 有り

525 km 伝送後 40 Gbit/s に多重分離した DPSK 信号に対し、強度信号に変換後の波形を光サンプリングオシロスコープで観測した結果を図 13 に示す。OFT を用いない場合は図 13(a) に示すようにタイミングジッタ（波形の線の幅が太い）とピーク付近に強度揺らぎが見られ、これらの歪みは時間とともに変動が見られる。この歪みは 2 次の PMD ならびに PMD の時間変動が原因であると考えられるが、このとき誤り率特性も図 14(a) に示すように時間とともにばらつきが生じ、 10^{-9} 以下の誤り率が得られない場合もあった。一方 OFT を用いた場合には図 13(b) に示すようにジッタや強度揺らぎは低減され、歪みの時間変動も大幅に抑えることが出来ている。その結果、図 14(b) に示すように時間に対して安定な誤り率特性が得られ、全てのチャンネルで誤り率 10^{-9} 以下の伝送に成功している。この様に OFT 法は超高速伝送に極めて有効な方法であることが判る。

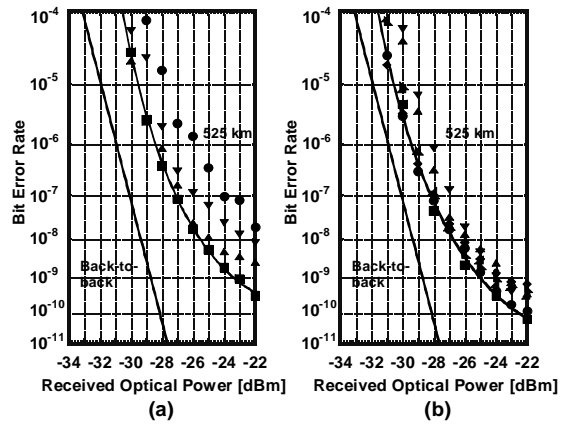


図 14 320 Gbit/s-525 km 符号誤り率特性 (a) OFT 無し、(b) OFT 有り

(5) 5x320 Gbit/s-525 km WDM-DPSK 伝送 (H20 年度)

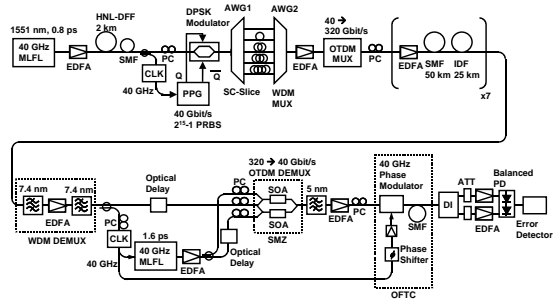


図 15 5x320 Gbit/s-525 km WDM-DPSK 伝送実験系

当初の予定では 5 年目に 160 Gbit/s の WDM 伝送により OFT 法の WDM 適用の有効性を実証する予定であったが、320 Gbit/s 伝送も可能であることが判ったので、一段階上の伝送速度で WDM 実験を行なった。その結果、本研究では 320 Gbit/s OTDM 信号の WDM による大容量長距離伝送を世界に先駆けて実現した。図 15 に 320 Gbit/s×5 波 (1.6 Tbit/s)-525 km の WDM 伝送実験系を示す。送信部においては、まず 40 GHz モード同期ファイバレーザ（中心波長 1551 nm、パルス幅 0.8 ps）から高非線形分散フラットファイバ（分散値 -0.2 ps/nm/km、長さ 2 km）を用いて SC 光を発生させ、SMF によりチャープを補償し 40 Gbit/s で DPSK 変調を行った後、AWG 1 を用いて 5 波長 (1535.8~1561.4 nm) にスライスする。チャンネル間隔は 800 GHz、パルス幅は 0.95 ps である。これらを AWG 2 で合波した後、単一偏波で 320 Gbit/s に OTDM 多重化を行い、525 km 伝送路に入射している。75 km おきに EDFA を挿入しており、各 EDFA から伝送路への入射パワーは各スパンの損失に応じて 16~18 dBm に設定した。受信部においては、まず光フィルタを用いて WDM チャンネルを選択した後、SMZ 光スイッチを用いて 320→40 Gbit/s への OTDM 多重分離を行い、光フーリエ変換回路に

入力している。この DPSK 信号を 1 ビット遅延干渉計(DI: Delay Interferometer)により強度信号に復調しバランスド PD (平衡光検出器) で受光、平衡検波を行い符号誤り率を測定した。

全 WDM チャンネルに対する誤り率測定結果を図 16 に示す。また誤り率 10^{-9} を得るための受光感度を全ての OTDM/WDM チャンネルに対して測定した結果を図 17 に示す。伝送後のパワーペナルティは OFT を用いない場合 3.3~4.2dB であった。一方 OFT を適用した場合は 1.3~2.1 dB に抑えられており、OFT 法が WDM 伝送においても大変有効であることを明らかにした。

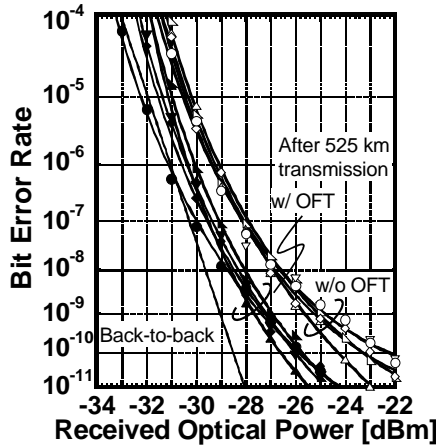


図16 5x320 Gbit/s-525 km 誤り率特性

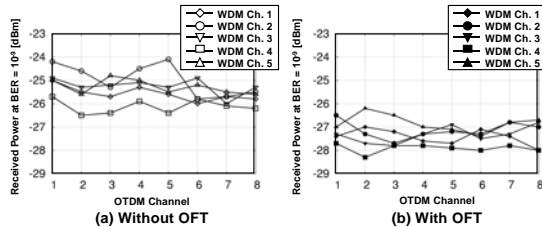


図17 各OTDM/WDM チャンネルで誤り率 10^{-9} となる受光感度

4.2.4 パラボラ光パルスを用いた全光フーリエ変換 (項目②、H18~H19 年度)

光フーリエ変換による波形歪み除去の有効時間領域を広げるためには、正弦波クロックによる位相変調を擬似的なパラボラとみなすのではなく、完全なパラボラ位相変調の実現が不可欠である。そこで、理想的なパラボラの形状を有する光パルスと信号光の相互位相変調とを用いた時間領域全光フーリエ変換法を新たに提案し、その基本性能を実証した。この方法は、光フーリエ変換技術の適用範囲を拡大するだけでなく、光フーリエ変換を電気回路による処理を介さずに全光学的に実現できるという点で、超高速・低消費電力 OFTC を実現できる特徴がある。

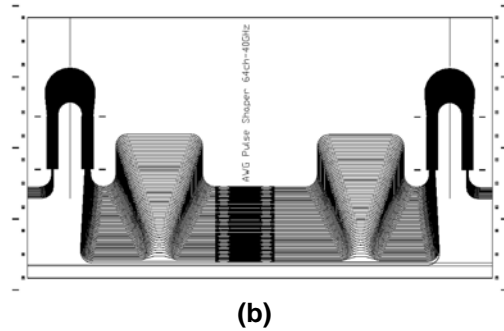
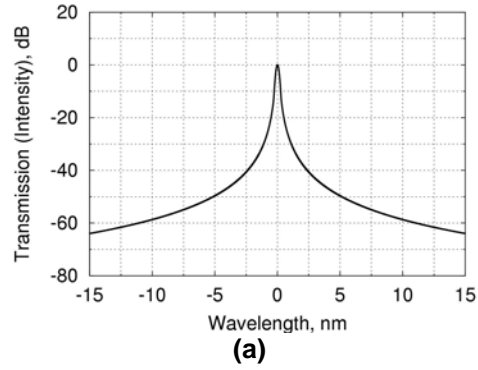


図18 パラボラパルス発生用光フィルタの透過特性(a)およびAWGのマスク図面(b)

パラボラ光パルスは本伝送技術の高性能化に向けて重要な役割を果たすのであるが、その発生技術は今までに研究されてきた例が殆どなかった。そこで我々は、アレイ導波路回折格子(AWG: Arrayed Waveguide Grating)を用いて光スペクトルの振幅と位相を独立に制御しパルス波形をパラボラ形状に整形する方法を提案した。この方法では、パラボラパルスがもつ周波数スペクトルの振幅・位相特性を多層膜光フィルタ(プレフィルタリング)および振幅・位相制御用の AWG により設計した。その光フィルタの透過特性および AWG のマスク図面をそれぞれ図 18(a), (b) に示す。またこのようにして得られた繰り返し周波数 40 GHz で Bright (上に凸) お

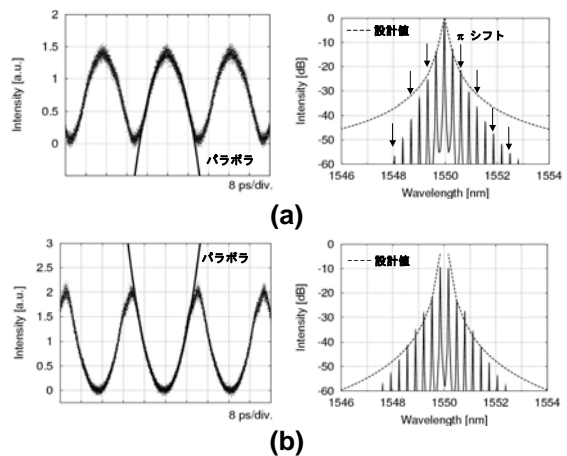


図19 Brightパラボラパルス(a)およびDarkパラボラパルス(b)の時間波形および光スペクトル

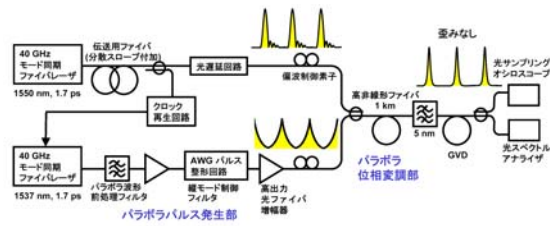


図20 パラボラパルスを用いた全光フーリエ変換回路の構成

よびDark (下に凸) のパラボラ光パルスを発生させた実験結果をそれぞれ図 19(a), (b) に示す。左はパルス波形、右は光スペクトルを示している。チャンネル間隔 40 GHz、チャンネル数 64 の AWG により各縦モードを分波し、それぞれの振幅および位相をヒーターへの電流を調整することにより、パラボラ光パルス出力を得ている。

このようにして発生させたパラボラパルスを用いて全光フーリエ変換の実験を行った。その全光フーリエ変換回路の構成を図 20 に示す。分散スロープによって歪みを受けた信号光パルスと AWG を用いて発生させた Dark パラボラパルスを合波し、長さ 1 km の高非線形ファイバに入射して相互位相変調により信号光にパラボラ位相変調を印加した。その後短尺ファイバにより群速度分散を与え光フーリエ変換を完了させた。そしてフーリエ変換後の信号を光サンプリングスコープと光スペクトルアナライザで観測した。その結果を図 21 に示す。分散スロープにより裾野にリプルが生じた信号パルス (図 21(a)) を図 21(b) に示すパラボラパルスを用いて光フーリエ変換させた結果、図 21(c) に示すように、リプルはほぼ完全に除去され、

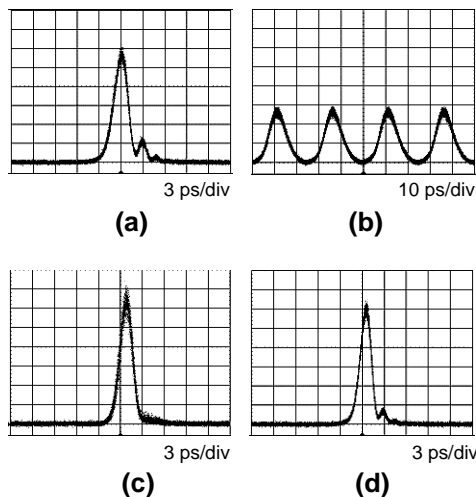


図21 全光フーリエ変換実験結果。(a) 分散スロープによる歪みを受けた信号パルス、(b) Darkパラボラ光パルス、(c) 光フーリエ変換後の信号パルス、(d) 従来の正弦波変調法による光フーリエ変換後の信号パルス

パルス幅も狭くなっていることがわかる。一方、図 21(d) に示すように、従来の正弦波位相変調による光フーリエ変換では、裾野にリプルが残留しており、歪みが完全に除去できていない。この結果から、パラボラ位相変調により歪み除去効果が向上できていることがわかる。今後高非線形ファイバにおける四光波混合の影響を除去するよう、高非線形ファイバの分散特性ならびに制御光・信号光の波長を最適化し、光フーリエ変換後の SN 比を改善することが課題である。

4.2.5 まとめ

本研究では時間領域光フーリエ変換法を用いた新たな無歪み光伝送技術を確認し、この技術により 160~320 Gbit/s OTDM 信号の 500~1,000 km の長距離超高速伝送、ならびに 320 Gbit/s OTDM 信号の大容量 WDM 伝送を世界に先駆けて実現した。さらに、超高速光パラボラパルスの発生とそれを用いたパラボラ変調型の理想的な全光フーリエ変換に成功した。これらの成果は、時間領域光フーリエ変換法が超高速光伝送の長距離化とシステムマージンの拡大に極めて有効であることを明らかにしたもので、超高速光通信の実用化に大きく貢献するものである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 23 件)

- [1] M. Okazaki, P. Guan, T. Hirooka, M. Nakazawa, and T. Miyazaki, "160-Gb/s 200-km field transmission experiment with large PMD using a time-domain optical Fourier transformation technique," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 24, pp. 2192-2194, December (2008). 査読有
- [2] M. Nakazawa, K. Kasai, and M. Yoshida, " C_2H_2 absolutely optical frequency-stabilized and 40 GHz repetition-rate-stabilized, regeneratively mode-locked picosecond erbium fiber laser at 1.53 μm ," Opt. Lett., vol. 33, no. 22, pp. 2641-2643, November (2008). 査読有
- [3] T. Hirooka, M. Okazaki, P. Guan, and M. Nakazawa, "320-Gb/s single-polarization DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 20, no. 22, pp. 1872-1874, November (2008). 査読有
- [4] T. Hirooka and M. Nakazawa,

- “All-optical 40-GHz time-domain Fourier transformation using XPM with a dark parabolic pulse,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 22, pp. 1869–1871, November (2008). 査読有
- [5] T. Hirooka, K. Osawa, M. Okazaki, M. Nakazawa, and H. Murai, “Stimulated Brillouin scattering in ultrahigh-speed in-phase RZ and CS-RZ OTDM transmission,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 20, pp. 1694–1696, October (2008). 査読有
- [6] T. Hirooka, M. Okazaki, and M. Nakazawa, “A straight-line 160-Gb/s DPSK transmission over 1000 km with time-domain optical Fourier transformation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 13, pp. 1094–1096, July (2008). 査読有
- [7] T. Hirooka, M. Nakazawa, and K. Okamoto, “Bright and dark 40 GHz parabolic pulse generation using a picosecond optical pulse train and an arrayed waveguide grating,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 1102–1104, May (2008). 査読有
- [8] M. Nakazawa and M. Yoshida, “Scheme for independently stabilizing the repetition rate and optical frequency of a laser using a regenerative mode-locking technique,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 10, pp. 1059–1061, May (2008). 査読有
- [9] M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, “Mode-hop-free, optical frequency tunable 40 GHz mode-locked fiber laser,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 43, no. 8, pp. 704–708, August (2007). 査読有
- [10] M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, “Ultra-stable regeneratively mode-locked laser as an opto-electronic microwave oscillator and its application to optical metrology,” *IEICE Trans. Electron.*, Invited paper, vol. E90-C, no. 2, pp. 443–449, February (2007). 査読有
- [11] T. Hirooka, K. Hagiuda, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa, “160 Gb/s–600 km OTDM transmission using time-domain optical Fourier transformation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 24, pp. 2647–2649, December (2006). 査読有
- [12] 中沢正隆, 廣岡俊彦, “超短光パルスを用いた高速光伝送技術の現状と将来展望,” *電子情報通信学会論文誌 (招待論文)*, vol. J89-B, no. 11, pp. 2067–2081, November (2006). 査読有
- [13] T. Hirooka, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa, “Comparison of 40 GHz optical demultiplexers using SMZ switch and EA modulator in 160 Gbit/s–500 km OTDM transmission,” *IEICE Electronics Express*, vol. 3, no. 17, pp. 397–403, September (2006). 査読有
- [14] T. Hirooka and M. Nakazawa, “Optical adaptive equalization of high-speed signals using time-domain optical Fourier transformation,” Invited paper, *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 7, pp. 2530–2540, July (2006). 査読有
- [15] M. Nakazawa and T. Hirooka, “ABCD matrix formalism of time-domain optical Fourier transformation for distortion-free pulse transmission,” *IEICE Electron. Express*, vol. 3, no. 4, pp. 74–79, February (2006). 査読有
- [16] M. Nakazawa and T. Hirooka, “Distortion-free optical transmission using time-domain optical Fourier transformation and transform-limited optical pulses,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 22, no. 9, pp. 1842–1855, September (2005). 査読有
- [17] 廣岡俊彦, 中沢正隆, 二見史生, 渡辺茂樹, “時間領域光フーリエ変換を用いた超高速無歪み光パルス伝送,” *電子情報通信学会論文誌*, vol. J88-B, no. 8, pp. 1402–1410, August (2005). 査読有
- [18] K. Hagiuda, T. Hirooka, M. Nakazawa, S. Arahira, and Y. Ogawa, “40-GHz, 100-fs stimulated-Brillouin-scattering-free pulse generation by combining a mode-locked laser diode and a dispersion-decreasing fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 6, pp. 670–672, March (2005). 査読有
- [19] T. Hirooka, S. Ono, K. Hagiuda, and M. Nakazawa, “Stimulated Brillouin scattering in dispersion-decreasing fiber with ultrahigh-speed femtosecond soliton pulse compression,” *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 4, pp. 364–366, Feb. (2005). 査

読有

- [20] 中沢正隆, 廣岡俊彦, “時間領域光フーリエ変換による無歪み光ファイバー伝送,” 光学, vol. 34, no. 1, pp. 26-31, January (2005). 査読有
- [21] 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 Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 10, pp. 2371-2373, October (2004). 査読有
- [22] M. Yoshida, T. Yaguchi, S. Harada, and M. Nakazawa, “A 40 GHz regeneratively and harmonically mode-locked erbium-doped fiber laser and its longitudinal-mode characteristics,” IEICE Trans. Electron., vol. E87-C, no. 7, pp. 1166-1172, July (2004). 査読有
- [23] M. Nakazawa, T. Hirooka, F. Futami, and S. Watanabe, “Ideal distortion-free transmission using optical Fourier transformation and Fourier transform-limited optical pulses,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 16, no. 4, pp. 1059-1061, April (2004). 査読有
- [学会発表] (計 51 件)
- [1] M. Nakazawa, M. Yoshida, and K. Kasai, “ C_2H_2 Absolutely Optical Frequency-Stabilized and 40 GHz Repetition-Rate-Stabilized, Regeneratively Mode-Locked Picosecond Erbium Fiber Laser at 1.53 μm ,” Conference on Lasers and Electro Optics (CLEO 2009), May 31-June 5, 2009, Baltimore, USA.
- [2] 吉田真人, 葛西恵介, 中沢正隆, “光周波数および繰り返し周波数を同時安定化した 40 GHz 再生モード同期パルスレーザー,” 2009 年春季第 56 回応用物理学関係連合講演会, March 30-April 2, 2009, つくば.
- [3] 関鵬宇, 岡崎勝伝, 平野敏行, 廣岡俊彦, 中沢正隆, “時間領域光フーリエ変換を利用した 160 Gbit/s \times 8 波-525 km WDM 伝送,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, March 17-20, 2009, 松山.
- [4] 岡崎勝伝, 関鵬宇, 平野敏行, 廣岡俊彦, 中沢正隆, 中村滋, “超高速半導体 SMZ スイッチによる全光 640 Gbit/s OTDM 信号の多重分離,” 電子情報通信学会 2009 年総合大会, March 17-20, 2009, 松山.
- [5] M. Nakazawa and M. Yoshida, “New scheme for independently stabilizing the repetition rate and optical frequency of a laser using a regenerative mode-locking technique,” OSA Annual Meeting, Laser Science (LS2008), October 19-23, 2008, Rochester, USA.
- [6] M. Okazaki, P. Guan, T. Hirooka, M. Nakazawa, and T. Miyazaki, “160 Gbit/s-200 km field transmission experiment using a time-domain optical Fourier transformation technique with a large PMD,” European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), September 21-25, 2008, Brussels, Belgium.
- [7] T. Hirooka, M. Okazaki, P. Guan, and M. Nakazawa, “320 Gbit/s single-polarization DPSK transmission over 525 km using time-domain optical Fourier transformation,” European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), September 21-25, 2008, Brussels, Belgium.
- [8] 岡崎勝伝, 関鵬宇, 廣岡俊彦, 中沢正隆, 宮崎哲弥, “時間領域光フーリエ変換により PMD を抑制した 160 Gbit/s-200 km 現場伝送実験,” 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, September 16-19, 2008, 川崎.
- [9] 廣岡俊彦, 岡崎勝伝, 関鵬宇, 中沢正隆, “時間領域光フーリエ変換法を用いた単一偏波 320 Gbit/s-525 km DPSK 伝送,” 電子情報通信学会 2008 年ソサイエティ大会, September 16-19, 2008, 川崎.
- [10] 中沢正隆, 吉田真人, “高調波再生モード同期パルスレーザーにおける繰り返し周波数と光周波数の独立制御,” 応用物理学学会 2008 年秋季第 69 回学術講演会, September 2-5, 2008, 名古屋.
- [11] 廣岡俊彦, 中沢正隆, “光パラボラパルスとの相互位相変調を用いた 40 GHz 全光時間領域フーリエ変換,” 電子情報通信学会 2008 年総合大会, March 18-21, 2008, 北九州.
- [12] T. Hirooka and M. Nakazawa, “All-optical 40 GHz time-domain Fourier transformation using XPM with a dark parabolic pulse,” Optical Fiber Communication Conference (OFC2008), February 24-28, 2008, San Diego, USA.
- [13] T. Hirooka, M. Nakazawa, and K. Okamoto, “40 GHz bright and dark

- parabolic pulse generation using a picosecond optical pulse source and a 64-channel AWG,” Optical Fiber Communication Conference (OFC2008), February 24–28, 2008, San Diego, USA.
- [14] M. Nakazawa, “Advanced optical fiber device technology for ultrahigh-speed transmission,” 5th Workshop on Fibers and Optical Passive Components (WFOPC2007), Plenary Talk, December 5–7, 2007, Taipei, Taiwan.
- [15] T. Hirooka, K. Osawa, M. Okazaki, M. Nakazawa, and H. Murai, “Observation of stimulated Brillouin scattering in ultrahigh-speed in-phase and carrier-suppressed RZ OTDM transmission,” European Conference on Optical Communication (ECOC2007), September 20–24, 2007, Berlin, Germany.
- [16] T. Hirooka, M. Okazaki, K. Osawa, and M. Nakazawa, “160 Gbit/s–900 km DPSK transmission with time-domain optical Fourier transformation,” European Conference on Optical Communication (ECOC2007), September 20–24, 2007, Berlin, Germany.
- [17] 岡崎勝伝, 大澤耕, 廣岡俊彦, 中沢正隆, “時間領域光フーリエ変換法による160 Gbit/s–1000 km DPSK直線路伝送,” 電子情報通信学会 2007年ソサイエティ大会, September 10–14, 2007, 鳥取.
- [18] 廣岡俊彦, 大澤耕, 岡崎勝伝, 中沢正隆, 村井仁 “超高速RZおよびCS-RZ光伝送における誘導ブリルアン散乱の観測,” 電子情報通信学会 2007年ソサイエティ大会, September 10–14, 2007, 鳥取.
- [19] 岡崎勝伝, 大澤耕, 廣岡俊彦, 中沢正隆, “160 Gbit/s–900 km straight-line DPSK transmission with time-domain optical Fourier transformation,” 平成19年度電気関係学会東北支部連合大会, August 23–24, 2007, 弘前.
- [20] M. Nakazawa, “New frontiers in optical communication: ultrahigh-speed transmission and coherent transmission,” The 3rd International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies, Invited paper, August 20–21, 2007, Boston, USA.
- [21] M. Nakazawa and T. Hirooka, “Terabit OTDM transmission—Key challenges,” IEEE/LEOS Summer Topicals 2007, Invited paper, July 23–25, 2007, Long Beach, USA.
- [22] K. Osawa, M. Okazaki, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “Low power-penalty 160 Gbit/s DPSK transmission over 600 km,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2007), July 9–13, 2007, Yokohama, Japan.
- [23] T. Hirooka and M. Nakazawa, “Ultrahigh-speed signal transmission / processing technologies,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2007), Invited paper, July 9–13, 2007, Yokohama, Japan.
- [24] M. Nakazawa, “Advanced optical fiber and fiber device technologies for ultrahigh-speed optical transmission,” Optoelectronics and Communications Conference (OECC2007), Tutotiral, July 9–13, 2007, Yokohama, Japan.
- [25] M. Nakazawa, “Next generation ultrafast telecommunications technologies,” CLEO Europe 2007, Invited paper, June 17–22, 2007, Munich, Germany.
- [26] M. Yoshida, K. Kasai, and M. Nakazawa, “A mode-hop-free, frequency-tunable 40 GHz mode-locked fiber laser,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), March 25–29, 2007, Anaheim, USA.
- [27] 吉田真人, 葛西恵介, 中沢正隆, “光周波数掃引が可能な40 GHzピコ秒モード同期ファイバレーザの性能向上,” 電子情報通信学会 2007年総合大会, March 20–23, 2007, 名古屋.
- [28] 廣岡俊彦, 大澤耕, 岡崎勝伝, 中沢正隆, “160 Gbit/s DPSK伝送方式における時間領域光フーリエ変換の効果,” 電子情報通信学会 2007年総合大会, March 20–23, 2007, 名古屋.
- [29] 大澤耕, 廣岡俊彦, 岡崎勝伝, 中沢正隆, “DPSK方式による低パワーペナルティ160 Gbit/s–600 km伝送,” 電子情報通信学会 2007年総合大会, March 20–23, 2007, 名古屋.
- [30] T. Hirooka, T. Kumakura, K. Osawa, and M. Nakazawa, “Comparison of 40 GHz optical demultiplexers using SMZ switch and EA modulator in 160 Gbit/s–500 km OTDM transmission,” European Optical Society (EOS) Annual Meeting 2006, October 16–19, 2006, Paris, France.
- [31] T. Hirooka, K. Hagiuda, T. Kumakura,

- K. Osawa, and M. Nakazawa, "160 Gbit/s-600 km OTDM transmission using time-domain optical Fourier transformation," European Conference on Optical Communication (ECOC 2006), September 24-28, 2006, Cannes, France.
- [32] 廣岡俊彦, 大澤耕, 中沢正隆, 岡本勝就, "超短パルス光源と64チャンネルAWGを用いた40 GHz BrightおよびDarkパラボラ光パルスの発生," 電子情報通信学会 2006年ソサイエティ大会, September 19-22, 2006, 金沢.
- [33] 吉田真人, 葛西恵介, 中沢正隆, "光周波数掃引が可能な40 GHzピコ秒モード同期ファイバレーザ," 電子情報通信学会 2006年ソサイエティ大会, September 19-22, 2006, 金沢.
- [34] 大澤耕, 熊倉崇, 廣岡俊彦, 中沢正隆, "160 Gbit/s OTDM伝送におけるSMZおよびEA型40 GHz光DEMUXデバイスの性能比較," 電子情報通信学会 2006年ソサイエティ大会, September 19-22, 2006, 金沢.
- [35] 萩生田研一, 熊倉崇, 大澤耕, 廣岡俊彦, 中沢正隆, "時間領域光フーリエ変換を用いた160 Gbit/s-524 km OTDM伝送," 電子情報通信学会 2006年総合大会, March 24-27, 2006, 東京.
- [36] 中沢正隆, 廣岡俊彦, "時間領域光フーリエ変換を用いた超高速無歪み光伝送" (招待講演) 電子情報通信学会 2006年総合大会, March 24-27, 2006, 東京.
- [37] T. Hirooka and M. Nakazawa, "Derivation of analytical expression for third-order dispersion elimination using time-domain optical Fourier transformation," European Conference on Optical Communication (ECOC 2005), September 25-29, 2005, Glasgow, Scotland.
- [38] 廣岡俊彦, 中沢正隆, "時間領域光フーリエ変換法による三次分散歪みの除去に関する解析," 電子情報通信学会 2005年ソサイエティ大会, September 20-23, 2005, 札幌.
- [39] 中沢正隆, 廣岡俊彦, "時間領域光フーリエ変換を用いた波形無歪み伝送のABCD行列による表現," 電子情報通信学会 2005年ソサイエティ大会, September 20-23, 2005, 札幌.
- [40] M. Nakazawa, "Future of ultrahigh-speed optical communication," 2nd International Symposium on Ultrafast Photonic Technologies, Invited paper, August 3-5, 2005, St. Andrews, Scotland.
- [41] T. Hirooka and M. Nakazawa, "Ultrahigh-speed distortion-free transmission using all-optical time-domain Fourier transformation," International Conference on Quantum Electronics and the Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (IQEC/CLEO-PR 2005), Invited paper, July 11-15, 2005, Tokyo, Japan.
- [42] 原田真治, 葛西恵介, 中沢正隆, "GHz帯モード同期ファイバレーザにおける縦モード周波数ホッピングの測定と考察," 電子情報通信学会 2005年総合大会, March 21-24, 2005, 大阪.
- [43] 中沢正隆, 廣岡俊彦, "時間領域光フーリエ変換法による各種波形歪みの除去に関する理論的検討," 電子情報通信学会 2005年総合大会, March 21-24, 2005, 大阪.
- [44] 廣岡俊彦, 中沢正隆, "全光時間領域フーリエ変換による超高速無歪みパルス伝送法の提案," 電子情報通信学会 2005年総合大会, March 21-24, 2005, 大阪.
- [45] 萩生田研一, 廣岡俊彦, 中沢正隆, 荒平慎, 小川洋 "モード同期半導体レーザによる誘導ブリルアン散乱のない100 fs-40 GHzソリトンパルス圧縮," 電子情報通信学会 2004年ソサイエティ大会, September 21-24, 2004, 徳島.
- [46] 廣岡俊彦, 中沢正隆, 二見史生, 渡辺茂樹, "時間領域光フーリエ変換を用いた160 Gbit/s光伝送信号の適応等化," 電子情報通信学会 2004年ソサイエティ大会, September 21-24, 2004, 徳島.
- [47] K. Hagiuda, T. Hirooka, S. Ono, M. Yoshida, M. Nakazawa, S. Arahira, and Y. Ogawa "Generation of a 40-GHz, 100-fs pulse train from a mode-locked laser diode using DDF soliton compression," European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), September 5-9, 2004, Stockholm, Sweden.
- [48] T. Hirooka, M. Nakazawa, F. Futami, and S. Watanabe, "New adaptive equalization scheme for 160 Gb/s transmitted signal using time-domain optical Fourier transformation," European Conference on Optical Communication (ECOC 2004), September 5-9, 2004, Stockholm, Sweden.
- [49] 廣岡俊彦, 小野晋平, 萩生田研一, 中沢正隆, "超高速光パルス列のDDFソリトン圧縮における誘導ブリルアン散乱

の入力パワー依存性,” 2004 年秋季第 65 回応用物理学会学術講演会, 2004 年 9 月 1-4 日, 仙台.

- [50] T. Hirooka, S. Ono, K. Hagiuda, and M. Nakazawa, “Stimulated Brillouin scattering in ultrahigh-speed femtosecond soliton compression with a dispersion-decreasing fiber,” International Conference on Ultrafast Phenomena (UP 2004), July 25-30, 2004, Niigata, Japan.
- [51] M. Yoshida, T. Yaguchi, S. Harada, and M. Nakazawa, “Optimization of a 40 GHz regeneratively and harmonically mode-locked fiber laser under PLL operation and its longitudinal mode characteristics,” Ultrafast Phenomena (UP 2004), July 25-30, 2004, Niigata, Japan.

[図書] (計 4 件)

- [1] H. G. Weber and M. Nakazawa, Ultrahigh-Speed Optical Transmission Technology, Springer (2007).
- [2] 中沢正隆, “フェムト秒レーザーの超高速光通信への応用 (分担執筆),” フェムト秒テクノロジー, 平尾一之, 邱建栄 (編), 東京化学同人 (2006), pp. 221-233.
- [3] 中沢正隆, “超高速光伝送技術,” 光科学の最前線 (分担執筆), JILS, 2005
- [4] M. Nakazawa, “Erbium-doped fiber amplifier,” in Encyclopedic Handbook of Integrated Optics, K. Iga and Y. Kokubun, Eds., Marcel Dekker Inc, 2005.

[産業財産権]

○取得状況 (計 3 件)

- [1] 名称: OTDM/WDM 伝送方法及び装置
発明者: 中沢正隆, 廣岡俊彦
権利者: 科学技術振興機構
種類: 特許公報
番号: 4252740
取得年月日: 2009 年 1 月 30 日
国内外の別: 国内
- [2] 名称: Optical pulse compressor and optical function generator, optical pulse compression method and optical function generating method
発明者: M. Nakazawa and T. Hirooka
権利者: JST
種類: US Patent
番号: 7428096
取得年月日: 2008 年 9 月 23 日

国内外の別: 国外

- [3] 名称: Optical Fourier transform device and method
発明者: M. Nakazawa and T. Hirooka
権利者: JST
種類: US Patent
番号: 7352504
取得年月日: 2008 年 4 月 1 日
国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp>

報道関連情報

日本経済新聞 2006 年 9 月 29 日、日刊工業新聞 2006 年 9 月 18 日、河北新報 2006 年 9 月 4 日

320 Gbit/s×5 波-525 km WDM 伝送に関して
報道発表予定

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中沢 正隆 (NAKAZAWA MASATAKA)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 80333889

(2) 研究分担者

廣岡 俊彦 (HIROOKA TOSHIHIKO)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 40344733

吉田 真人 (YOSHIDA MASATO)
東北大学・電気通信研究所・助教
研究者番号: 10333890