

3-8 JGNII 光テストベッドを用いた OCDM 伝送の実証実験

3-8 OCDM Transmission Experiments on JGNII Test bed Optical Link

神尾享秀 和田尚也 久保田文人 沓沢聡子 湊 直樹 佐々木健介
小林秀幸 西木玲彦 牛窪 孝 上條 健

KAMIO Yukiyo, WADA Naoya, KUBOTA Fumito, KUTSUZAWA Satoko,
MINATO Naoki, SASAKI Kensuke, KOBAYASHI Shuko, NISHIKI Akihiko,
USHIKUBO Takashi, and KAMIJOH Takeshi

要旨

光ネットワークにおいて、都市間通信、アクセス系での伝送方式として、OCDM が注目されている。我々は、OCDM 伝送において、時間拡散／波長ホッピング方式についての検討を行っている。本稿では、時間拡散／波長ホッピング方式とそれを実現するデバイスについての解説と JGNII 光テストベッドを用いて、10 Gbps の伝送速度で 2 チャンネル多重伝送を行った実証実験の概要を述べる。

Optical code division multiplexing (OCDM) is a promising technology for photonic packet switching and the optical metro- and local-area-networks (MAN/LAN) system applications, due to its all-optical signal processing, flexible capacity, and highly secured transmission. We have proposed and developed, time-spread/wavelength-hopping systems utilizing fiber-Bragg-grating (FBG) filters. We report field trial of 200 km transmission on time-spread/wavelength-hopping OCDM was achieved using FBG en/decoders with 10Gbps x 2-ch signals on the JGNII network.

[キーワード]

OCDM, 光通信, フィールド実証, 光ネットワーク
OCDM, Optical communications, Field trial, Optical network

1 はじめに

光ネットワークでは、インターネットの飛躍的な発展により通信需要がひっ迫し、柔軟なネットワークの構築が急務となっている。特に、都市間、都市内(メトロ系)ネットワーク(MAN/LAN; the optical metro-and local-area-networks)には、高速で柔軟なネットワークが必要となる。

このようなネットワーク構築における多重方式の一つとして OCDM (Optical Code Division Multiplexing) がある。情報通信研究機構 (NICT) の前身である通信総合研究所 (CRL) においても、早くからその特質に着目し研究を行ってきた。また、近年、米国の DARPA (米国防総省プ

ロジェクト) 計画で開始されたこともあり、注目されている。

OCDM は、これまでに多くの研究がされ、原理実験などが行われてきた。しかし、チャンネル数の向上を目指すなど、理論研究、実験室での実験が多く、実際の回線での実績などの検討はほとんどされていなかった。

そこで、我々は 2004 年 7 月に、JGNII 敷設光ファイバテストベッド [1][2] を用いた、OCDM 伝送実験を行い、安定した伝送に成功した [3]。

本稿では、このような OCDM 方式の解説、最近行った FBG を用いた OCDM / 波長ホッピング方式の既設の光ファイバ回線を用いた実環境における実証実験の概要について、実験装置を中心

に紹介する。

2 OCDM とは

ネットワークを効率的に用いるため、多重化による帯域の有効が行われる。多重化方式としては、与えられた波長帯域を一定の波長間隔で分割して多数のチャンネルを割り当てる波長多重(WDM: Wave length Division Multiplexing)、同じ波長の光信号を時間で分割し多数のチャンネルに割り当てる光時分割多重(OTDM: Optical Time Division Multiplexing)、同じ時間に、同じ周波数帯域を占有し、符号(信号波形の系列)により区別する光符号分割多重(OCDM: Optical Code Division Multiplexing)が研究されている。

このなかで、OCDM は、(a) 可変伝送速度による高度なネットワーク、(b) 柔軟性の高いルーティング、(c) 符号化による秘匿性の確保、(d) 符号を用いた多重による帯域保証などの特長があり、柔軟で安全な光ネットワーク構築に有効である。

2.1 OCDM の原理

OCDM は、携帯電話の方式として商用化された符号分割多元接続(CDMA)方式と同じ考えで、同じ周波数・空間で符号により直交性を確保する多重化方式である。複数のチャンネルの変調信号は、符号器により光符号で符号化され、同じファイバを通して伝送される。通常は、光の有る無しでビットの1、0を伝送するのに対して、OCDMでは、1のかわりに、すなわち、光の有るときは一つのビットではなく、割り当てられた符号(ビット間隔を符号長で割った、チップという単位で構成される)が送られる。受信側で、受信信号光を光相関器に入れると、送った符号と一致する場合には信号が出るが、異なった符号(他のユーザ又は他のチャンネル)の場合には信号は出ない。これは、相関操作により同じ符号の場合は積算されるのに対し、異なった符号ではランダムな値となるためである。

この原理により、符号が互いに独立とみなせるように設計すると、同時に、同じ波長帯域で多くのチャンネルの信号が多重されても、上記のように符号により分離することができ、独立なチャンネルを柔軟に確保できる。

ユーザ間の同期をとらないで多重化することも可能で、アクセス系のネットワークへの適用も期待されている。

2.2 OCDM の検討状況

CRLにおいては、OCDMの可能性について、早い時期から検討し、多重数の増加、伝送効率の向上、周波数ホッピング方式、符号器にPLC回路を用いた伝送実験などの研究を行ってきた[4]。

また、光ネットワークにおけるあて先ラベル検出への応用の研究も行っている[5]。

拡散方式としては、時間拡散方式が盛んに研究されている。一方、波長も加え、時間軸と波長軸の2次元の符号を用いる時間/波長拡散方式の検討も行われている[6]~[10]。

3 FBG を用いた時間拡散/波長ホッピング OCDM

FBGを用いた符号器は、簡単な構成で、低損失、高S/Nなどを実現でき、小型化、低コストが可能なことから実用化の点で注目されている。

3.1 時間拡散/波長ホッピング方式

OCDM符号として、時間軸で拡散するものが多く研究されているが、波長を加えた2次元に拡散する、時間拡散/波長ホッピング方式が検討されている。

ここでは、プライム符号の系列を時間拡散と波長ホッピングに適用した、プライム-ホッピング符号を用いる。

Prime-number ; $p=5$ の符号は、符号長が p^2 であり、図1のように五つの波長の光パルスが時間的に分散される。このような符号化及び復号には、次節で述べるFBG(Fiber Bragg Grating)を

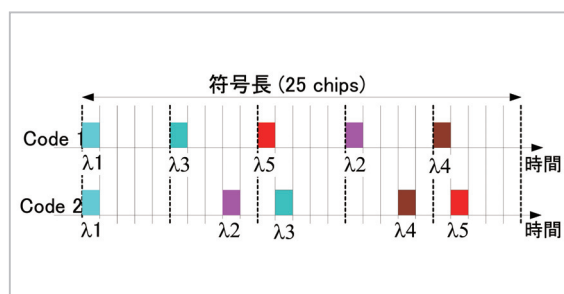


図1 波長ホッピングの符号例

用いるのが適している。

3.2 FBGの原理

FBGは、図2のように、光ファイバ内の光信号を通す部分(コア)にブラッグ格子を形成した物であり、特定波長(ブラッグ波長 λ_B)のみを反射し、それ以外の波長の光信号は透過させる反射型の光フィルターである。ブラッグ格子はコアの屈折率を一定間隔で高めることで形成される。このブラッグ格子で反射されるブラッグ波長 λ_B は以下のように表される。

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

ここで、 n はコアの屈折率、 Λ は格子間隔である。

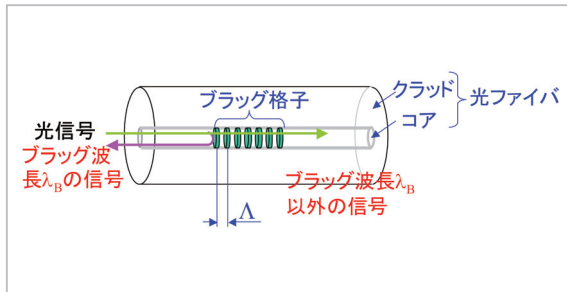


図2 FBGの構造

図3に符号/復号の原理図を示す。このような構成にすると、光の波長により反射位置が異なるため、波長により到達時間が異なる。符号器に波長多重パルスを入力すると、符号器を構成する光源波長に対応する波長のFBG配置位置により、伝播遅延による時間差が各光源波長の光パルス間に生じ、光パルス列が生成される。すなわち、波長方向と時間方向の2次元に拡散することができる。

符号器により生成された光パルス列の波長並びと、光パルス間の時間間隔が符号となっており、

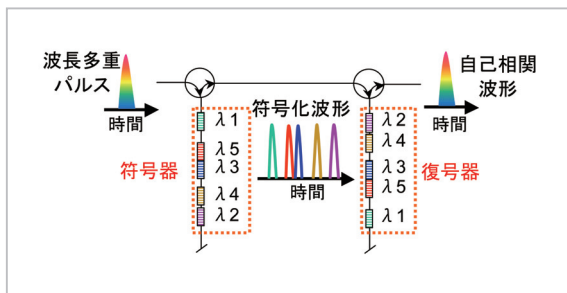


図3 FBG型OCDM符号器の動作の様子

この状態で伝送される。

符号器と同一符号の復号器では、符号器で発生した光パルス間の時間差が補正され、元の光多重パルス(自己相関波形)が得られる。このような復号は、符号器と同じFBGに逆方向に受信光を入射することにより実現できる。符号器と復号器の符号が一致しない場合は、更に時間的拡散され、自己相関波形を得ることはできない。

3.3 FBG型OCDM符号器の特徴

FBGは、パッシブデバイスであるので、符号化/復号化に電気処理を必要としないという特徴がある。このため、光電気変換がないので、

- ・部品点数削減、簡素な構成
- ・消費電力低減
- ・高速処理、電気の帯域制限を受けない

というメリットがある。

また、ファイバ型デバイスであることから

- ・低損失(ファイバ結合のため)
- ・偏波依存性が少ない

というメリットもある。

3.4 データ伝送速度拡張方式

FBG符号器においては、デバイスの構成によって信号伝送速度が制限され、高度な符号器作成技術が必要である。文献[9]では、データ伝送速度拡張方式を用いることにより、同じ符号器で4倍の伝送速度を実現している。具体的には、符号器の拡散時間は400 psとしており、データ伝送速度は2.5 Gbpsに相当する。しかし、符号化により時間拡散された符号化光信号を時間的にずらして重ねることで、10 Gbpsのデータ伝送速度にも適用できる。これは入力パルスの間隔により伝送速度を変更することもできる。

図4の(b)は、最大拡散時間400 psの符号器に(a)の2.5 Gbpsのデータ信号を入力した場合の出力パルスを示している。このように、一つのデータパルスが、時間と波長(色)に拡散される。

図5は、10 Gbpsのデータ信号パルスを上記と同じ符号器に入射した場合の出力パルスを示している。同図より、同一タイミングでも、同一波長パルスは重ならないことが分かる。

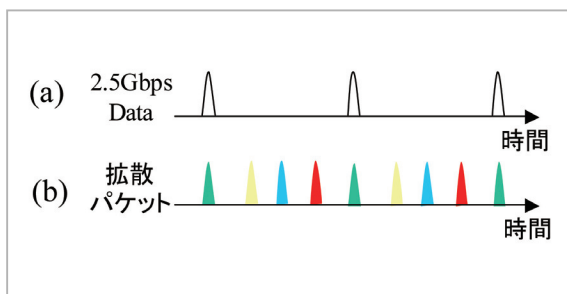


図4 入力パルスと出力の関係

(a) 基本パルス (b) 拡散出力

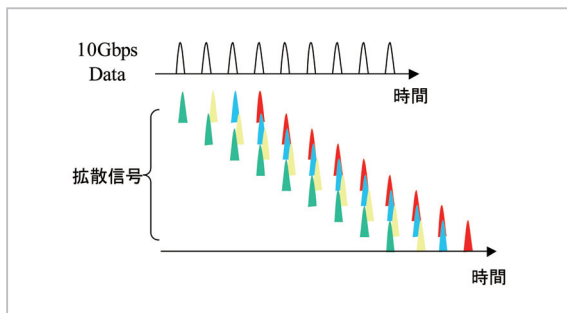


図5 10Gbps データパルスを入力した場合の様子

4 実証実験のセットアップ

これまでに記述してきた OCDM 伝送の実回線での実証のために、JGNII における敷設光回線を用いた実証実験を行った。今回は、異なる符号器の信号を加え、10 Gb/s の伝送速度で 2 チャンネル多重までの実験を行った。

本節では、回線の概要と実験装置について述べる。

4.1 実証実験環境

JGNII 回線の関東地区の光テストベッド回線を用いた [1] [2] [11]。図 6 に示すように、大手町局、柏局、筑波局をつなぐ約 100 km の回線において、折り返し実験を行った。このため、伝送距離は 200 km となり、都市内伝送を想定した距離となっている。

4.2 実験装置

伝送路の累積分散は、分散補償ファイバにより、1 ps 以内に調整されている。

図 7 に実験系を示す。

送信側では、波長の異なった五つの DFB レー

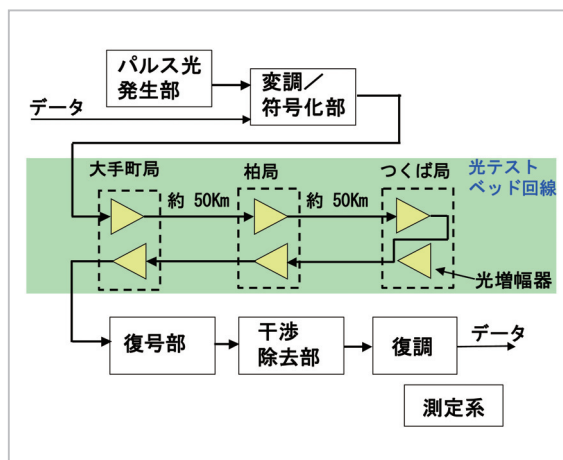


図6 実証実験の系統図

ザからの出力を合波し、EA 変調器により、10 GHz のパルス光を生成した。用いた波長は、1556.8 nm から 1560.1 nm の 0.8 nm の波長間隔である。このパルス光を変調したものと、それを遅延した信号により、2 チャンネルの変調信号を生成した。この二つの信号を異なる符号器により符号化を行い、伝送路に送出する。

受信側では、FBG 復号器により、希望チャンネルの復号を行い、EA 変調器を用いた時間ゲートにより、多重化を行った場合の非希望チャンネルからの干渉の抑圧を行う。その後 3R 光レシーバにより、送信データを復調する。また、クロック再生は、復号された信号を用いている。

大手町局での実験装置外観を図 8 に示す。今回はパラメータの変更など実証実験に迅速に対応するため、収納を行っていないが、図 9 のように実装することができる。

4.3 FBG の設計・試作

キーデバイスとして、符号器、復号器の FBG (Fiber Bragg Grating) がある。図 10 に、今回用いた符・復号器の外観図を示す。また、仕様を表 1 に示す。FBG は受動素子であり、可動・制御部がないので、取扱いが容易という特徴がある。また、FBG から反射されるパルスのひずみを低減するため、アポタイズ技術を用いている [12]。さらに、温度補償はパッシブな方式 [13] を用いているので、ペルチェ素子と温度コントローラを用いた制御を必要とせず、簡素な構成となっている。

本符号器ではフィールドにおける光源の波長変

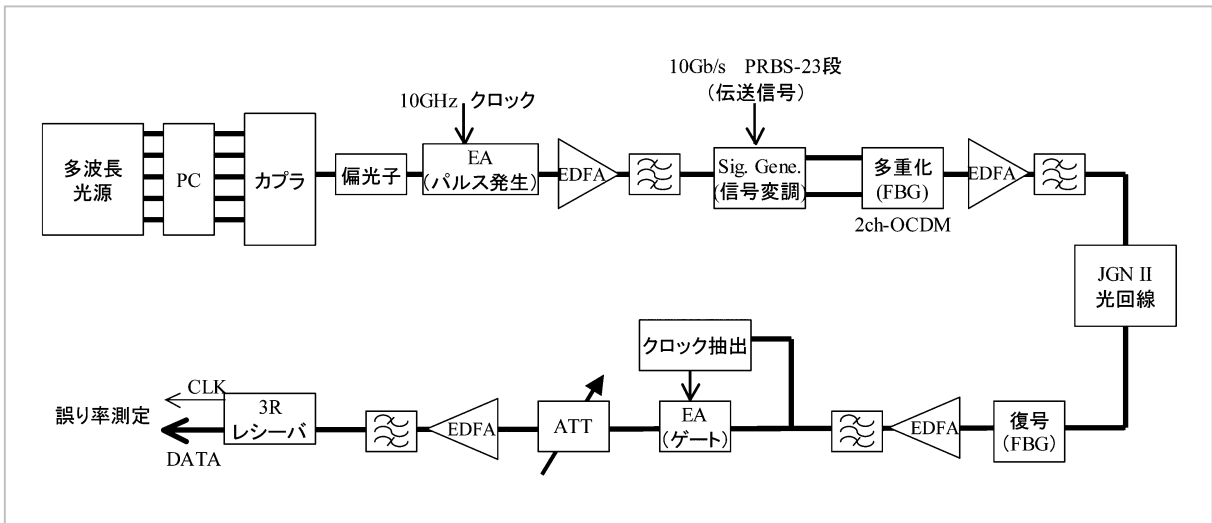


図7 実験系の構成図

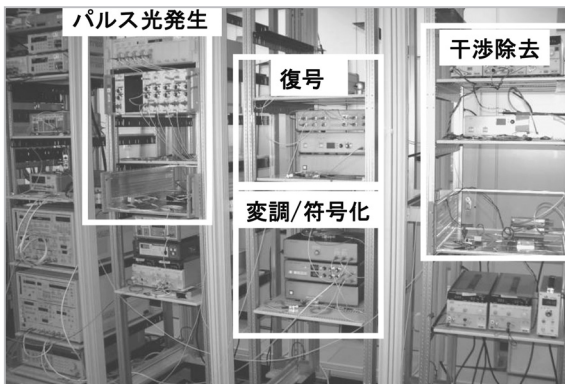


図8 実験に用いた送信・受信器の概観



図10 FBG型符号/復号器の外観



図9 実装した場合の外観

表1 実験に用いた符号器の仕様

符号種別	時間拡散一波長ホッピング方式
符号長	25チップ
チップ時間	16ps
拡散時間	400ps
波長数	5波長 (波長間隔100GHz)
適用データレート	2.5Gbps (データ伝送速度拡張により10Gbpsまで可能)
温度補償	パッシブ方式

動や偏波回転の影響を考慮して設計を行っている。

4.4 実験結果

図11に拡散前のパルス信号を示す。また、図12に2多重後の送信波形を示す。拡散符号化により伝送路中では信号が複雑化して識別不可能となる。

図13に、2チャンネル多重、200 km 伝送後に復号した波形を示す。復号により必要な信号のみが再生されるものの、希望信号のほかに、干渉成分があることが分かる。また、図14に時間ゲート後の波形を示す。

200 km 伝送後においても、雑音によりひずみは加わるものの大きなひずみがないことが分かる。

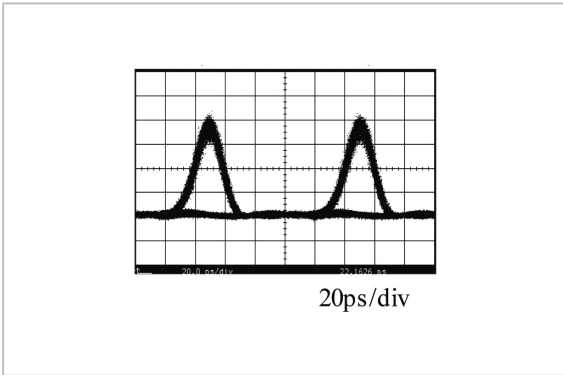


図 11 変調波形

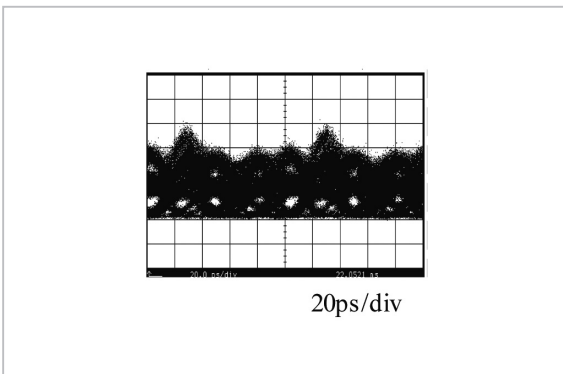


図 12 拡散符号化後(2チャンネル多重)

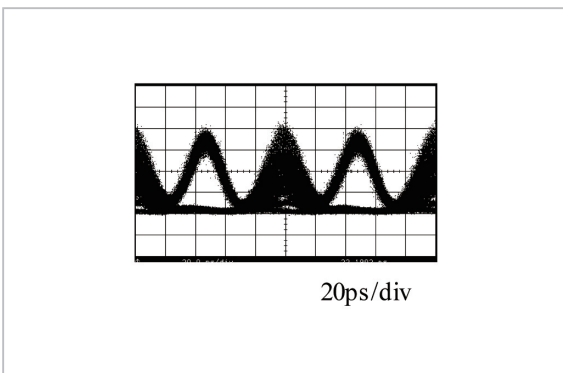


図 13 200km 伝送、復号後の波形

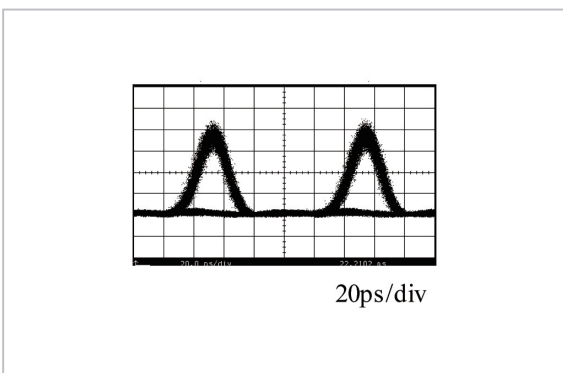


図 14 復号及び干渉除去後の波形

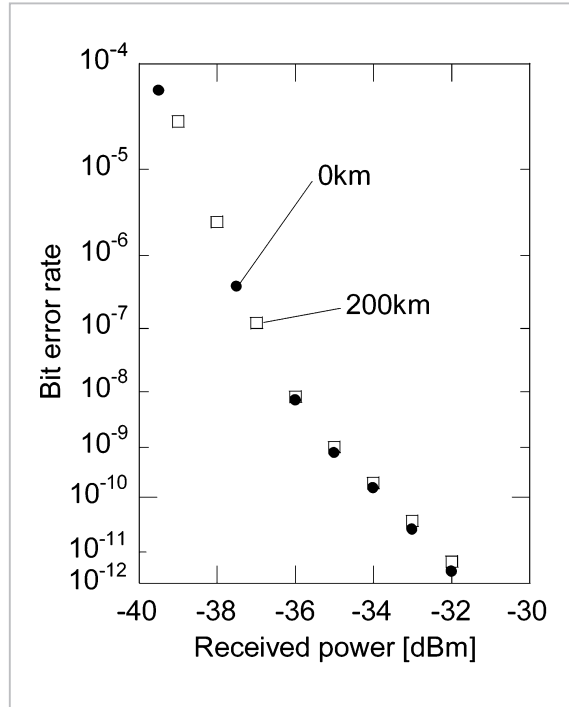


図 15 誤り率特性

図 15 に S/N による性能を示す。同図より、良好な伝送特性が得られることが分かる。

また、本実証実験により、OCDM 伝送が既設の光回線に適用できることが分かった。

5 まとめ

OCDM (符号分割多重) 方式によるマルチユーザの多重伝送実験を行い、既設の光ファイバ回線で都市間通信(メトロ系)に必要な 200 km 伝送に適用できることが実証された。

今後、多重数を向上するための研究開発、実用化・商用化、特に、次世代メトロ光ネットワークへの適用を目指した研究開発が必要である。

参考文献

- 1 尾家祐二, "超高速研究開発ネットワーク JGN II", 情報通信研究機構季報, Vol.51, Nos.3/4, pp.3-11, 2005.
- 2 <http://www.jgn.nict.go.jp/>
- 3 S.Kutsuzawa, N.Minato, K.Sasaki, S.Kobayashi, A.Nishiki, T.Ushikubo, T.Kamijoh, Y.Kamio, N.Wada, and F.Kubota, "Field demonstration of time-spread/wavelength-hop OCDM using FBG en/decoder", in OFC2005, OME77, Mar. 2005.
- 4 K.Kitayama, H.Sotobayashi, and, N.Wada, "Optical Code Division Multiplexing(OCDM) and Its Applications to Photonic Networks", IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E82-A, No.12, pp.2616-2626, Dec.1999.
- 5 K.Kitayama, N.Wada, and H.Sotobayashi, "Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation", J. Light wave technol., Vol.18, pp.1834-1844, 2000.
- 6 和田尚也, 外林秀之, 北山研一, "SC 光源とファイバ格子を用いた時間拡散/波長ホップ OCDM", 1999 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-10-128.
- 7 N.Wada, H.Sotobayashi, and K.Kitayama, "2.5 Gbit/s time -spread/wavelength-hop optical code division multiplexing using fibre Bragg grating with supercontinuum light source", Electron. Lett., Vol.36, No.9, pp.815-817, 2000.
- 8 大柴小枝子, 湊直樹, 沓沢聡子, 岩村英志, 西木玲彦, 北山研一, "FBG 符号拡散器を用いたデータレート拡張型時間拡散/波長ホップ光符号分割多重方式に関する実験検討", 電子情報通信学会 光通信システム研究会 (OCS), OCS2002-92, 2002 年 11 月.
- 9 S.Kutsuzawa, N.Minato, S.Oshiba, A.Nishiki, and K.Kitayama, "10 Gb/s x 2ch signal unrepeated transmission over 100km of data rate enhanced time-spread/wavelength-hopping OCDM using 2.5 Gb/s-FBG en/decoder", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.15, pp.317-319, 2003.
- 10 H.Tamai, H.Iwamura, N.Minato, and S.Oshiba, "Experimental study on time-spread wavelength-hop Optical code division multiplexing with group delay compensating en/decoder", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.16, pp.335-337, 2004.
- 11 T.Miyazaki, M.Daikoku, I.Morita, T.Otani, Y.Nagao, M.Suzuki, and F.Kubota, "Stable 160-Gb/s DPSK transmission using a simple PMD compensator on the field photonic network test bed of JGNII", in OECC' 04 Tech. Dig., PD1-3, 2004.
- 12 H.Iwamura, N.Minato, H.Tamai, S.Oshiba, and A.Nishiki, "FBG based optical code en/decoder for long distance transmission without dispersion compensating devices", in OFC'04 Tech. Dig., WK6, 2004.
- 13 G.W.Yoffe, Peter A.Krug, F.Ouellette, and D.Thorncraft, "Temperature-compensated optical-fiber Bragg gratings", in OFC'95, W14, 1995.



かみ おゆきよし
神尾 享秀

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員)
光通信



わだ なおや
和田 尚也

新世代ネットワーク研究センター超高速フォトニックネットワークグループ研究マネージャー(旧情報通信部門超高速フォトニックネットワークグループ主任研究員) 博士(工学)
フォトニックネットワーク



くぼ たみと
久保田 文人

新世代ネットワーク研究センター長(旧情報通信部門研究主管) 博士(情報工学)
ネットワークアーキテクチャ

くつざね ともこ
沓沢 聡子

沖電気工業株式会社研究開発本部
光ファイバ通信システム

みなと なおき
湊 直樹

沖電気工業株式会社研究開発本部
光ファイバ通信システム

ささき けんすけ
佐々木 健介

沖電気工業株式会社研究開発本部
光エレクトロニクスデバイス

こばやし しゅうこう
小林 秀幸

沖電気工業株式会社研究開発本部
光エレクトロニクスデバイス

にし き あきひこ
西木 玲彦

沖電気工業株式会社研究開発本部
ファイバーブラッググレーティング

うしくぼ たかし
牛窪 孝

沖電気工業株式会社研究開発本部
光ファイバ通信システム

かみじょう たけし
上條 健

沖電気工業株式会社研究開発本部
博士(工学)
光エレクトロニクス