

3 光ネットワーク

3 Photonic Networks

3-1 光符号分割多重を用いたペタビット級フォトニックネットワーク基盤技術

3-1 Optical Code Division Multiplexing And Its Application to Peta-bit/s Photonic Network

外林秀之 中條 渉 北山研一

Hideyuki SOTOBAYASHI, Wataru CHUJO, and Ken-ichi KITAYAMA

要旨

IT革命と呼ばれる近年の急激な情報技術革新の流れの中で、情報伝送・転送機能を光領域で行うフォトニックネットワークは、今後の超大容量情報通信時代における不可欠な研究開発課題として、高機能化・大容量化の研究を進めている。これらを実現するために、光の持つ属性を極限まで活用する超高速光信号処理を随所に活用した、光符号分割多重のペタビット級フォトニックネットワーク基盤技術における最新の研究成果について紹介する。

Future ultrafast photonic networks will perform transferring signals in the optical layer. The target of the photonic networks is to provide services at data rates much higher than electronic network can. Ultrafast photonic processing is expected to play a key role in future peta-bit/s photonic networks. Because ultrafast photonic processing could advantageously remove the speed limit that electronics imposes severe technology and economic constraints. Applications of optical code division multiplexing (OCDM) to multi-tera bit/s photonic network based on ultrafast photonic processing are reported. A high spectrum efficiency OCDM/WDM transmission as a link technology, and a transparent virtual optical code/wavelength path (VOCP/VWP) network as a node technology are experimentally demonstrated.

[キーワード]

フォトニックネットワーク, ノード, リンク, 光信号処理, ペタビット, 光符号分割多重
Photonic Network, Node, Link, Photonic processing, Peta-bit/s, Optical code division multiplexing

1 はじめに

近年のインターネットを始めとする様々な通信需要は爆発的に増大しており、多様な形態の情報を広帯域ネットワークを通じて自由に取扱いえるマルチメディア環境の実現は、生活や経

済の高度化に大きく寄与するものと考えられている。近年のこうした急激なIT (Information Technology) 革命の流れの中で、我々はまさに時代の変革期にいても過言ではない。しかしながら、現況の電気信号処理を主体としたネットワークでは、この需要に帯域の面で対応

しきれなくなっている。このため電氣的な速度制限に縛られることない、桁違いに速くまたフレキシブルなサービスを提供できる可能性を秘めたフォトニックネットワークの実現が急務となっている。情報伝送・転送機能を光領域で行うフォトニックネットワークは、今後の超大容量情報通信時代における不可欠な最重要の研究課題であり、光が持つ特有の属性を積極的に活用する新しいコンセプトのフォトニックネットワークの研究開発や、情報通信インフラストラクチャの基礎となる研究を進めている。日本政府が進める e-Japan 重点計画（高度情報通信ネットワーク社会の形成に関する重点計画）においては、2005 年までにペタビット級ネットワーク通信の基礎技術を確立し、2010 年頃を目途に実用化を図る事が策定されている。

光符号分割多重 (Optical Code Division Multiplexing: OCDM) は、従来の光時分割多重 (Optical Time Domain Multiplexing: OTDM) や波長多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) とは異なる新しいブレイクスルー技術として注目されている [1]。OCDM は、送信側でチャネル毎に異なる符号化をし、受信側で同一の符号を鍵として復号化することで情報信号を得る方式である。この原理を応用することの特徴は、送信側と受信側でペアにした固有の符号を用い、多数のチャネル信号を同じ波長帯で一本の光ファイバで同時に送ることができること、非同期のアクセスができることが挙げられる。そのため、フォトニックリンク [2] [3]、多元接続 [4]、光パスネットワーク [5] [6]、ラベルスイッチングルーティング [7] [8] などに応用が可能である。本報告では、ペタビット級を目指した超高速フォトニックネットワークへの OCDM 技術の適用例を紹介する。まず **2** ではフォトニックネットワークを実現するための必須基盤技術となる、超高速光信号処理の原理とその応用例を紹介する。**3** では OCDM 技術のリンクへの応用として、高周波数利用効率の超テラビット OCDM/WDM 伝送の実験結果 [3] を、**4** では OCDM 技術のノードへの応用として、超広帯域バーチャル光符号／波長パスネットワークの実験結果 [6] を報告する。

2 超高速光信号処理技術

光技術はこれまで、ポイントツーポイントの伝送技術としてネットワークに大きな革新をもたらしてきた。しかしながら、そこで用いられている機能は、電気－光変換・光ファイバ伝送・光増幅・光－電気変換などのごく限られたものでしかなく、光の持つポテンシャルの一部が活用されているにすぎない。毎秒テラビット級の情報量を処理するには、信号処理機能ができるだけ電子デバイスに頼らず光領域で実現する必要がある。ここに、光を電気に変換することなく光のままで情報を超高速に処理をする全光信号処理技術の活躍の場があると考えられる [1]。現在の光技術に最も欠如しているのは、光ミキサや光スイッチなどの超高速光信号処理技術応用である。エレクトロニクス技術においてはビット単位で自由自在な信号処理が可能であるが、光領域ではビット単位で論理演算を行うような事は現状では難しく、むしろ大容量の情報を一括して処理するのに適している。

光信号処理技術の処理速度は電気処理限界速度を大きく超える処理速度でなければ意味がない。非線形光学効果を用いた光信号処理技術は、サブペタ Hz 領域に達する超広帯域性という潜在的な利点があるが、技術の現状は極めて未成熟な段階である。光信号処理には 3 次の非線形光学効果を用いられることが多いが、その非線形感受率が極めて小さいことが主な要因である。図 1 に 3 次の非線形光学媒質に、キャリア周波数の異なる二つの光波が入射した場合に生じる非線形光学効果を示す。自己位相変調効果 (Self-Phase Modulation: SPM)、相互位相変調効果 (Cross-Phase Modulation: XPM)、四光波混合 (Four-Wave Mixing) などを発生する。図 2 に示すように、現在主に利用されている光ファイバや半導体増幅器を用いた光信号処理技術の機能としては、①光領域での掛け算機能 (光ミキサ) [9] [10]、②波長変換 (キャリア周波数) 機能、③位相共役光生成機能 [11] [12] などがある。超高速フォトニックネットワークにおいて光が潜在的に持つ広帯域性と超高速性を十分に活用するために、超短パルス生成、超広帯域光生成 [13] [14] [15]、光スイッチング、全光学的波長変換などが中核的な役

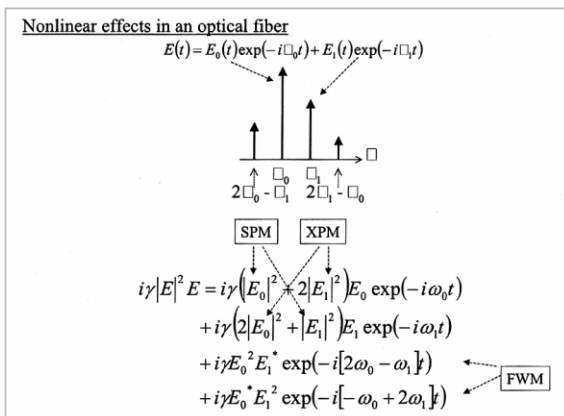


図1 光ファイバ中の三次非線形光学効果

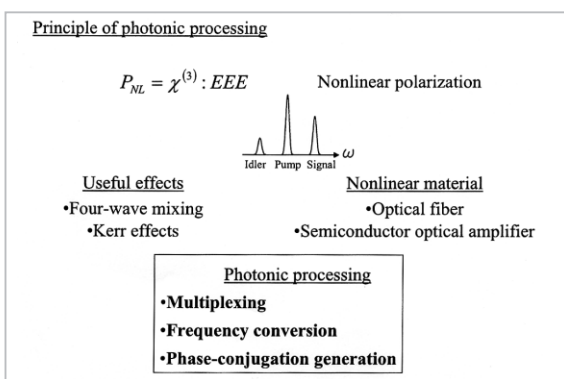


図2 超高速光信号処理技術

割を期待されている。これらを多角的・機能的に活用することによって、フォトニックネットワークにおけるリンク、ノード、アクセスへ応用が可能である。

超高速光信号処理技術の一例として、光ファイバの非線形光学効果を利用したスーパーコンティニュウム (Supercontinuum : SC) 光発生及びその応用について紹介する。SC光はコヒーレンス性を保ったままスペクトルが超広帯域に広がった光で、WDM ネットワークにおける多波長光源などへの応用が期待される。光ファイバを用いてSC光を発生する方式は二つに分けることができる。一方は、異常分散ファイバを用いてソリトン効果を利用したパルス圧縮による方法である。もう一方は、正常分散ファイバを用いて光カー効果による周波数チャーピングによって、スペクトルを広げる方法である。後者の方式を用いると、出力SCパルスは、矩形形状でその周波数チャーピング特性はほぼ線形である。図3に、SC光を用いた多波長信号生成の原理を示す[15][16][17]。広帯域に広がったスペクトルを、

AWG (Arrayed Waveguide Grating) などのような他波長フィルタでスペクトルスライスする事により、一つの光源から多波長の信号を非常に簡便に生成することができる[18][19]。

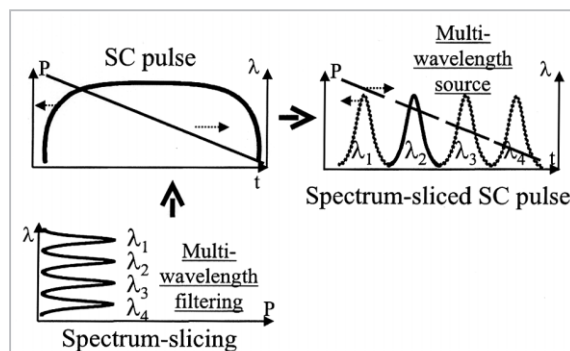


図3 スーパーコンティニュウム光のスペクトルスライスによる多波長信号生成の動作原理

3 周波数利用効率 1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s QPSK-OCDM/WDM (4 OCDM x 40 WDM x 40 Gbit/s) 伝送実験

フォトニックネットワーク通信容量増大に関しては、従来はOTDMとWDMの組み合わせにより、波長数を増やすことで容量拡大が図られてきた。今後、通信容量需要の更なる加速が予想されるが、光ファイバの伝送損失を補うための光増幅が可能な波長帯域は限られており、波長数増大による容量拡大もやがて波長資源の不足が顕在化すると考えられる。限られた波長帯域で容量を増大し、かつシステムコストの低下を図るためには、波長資源の有効活用化が不可欠で、周波数利用効率の向上が期待される。このたび、OCDMに超高速光信号処理技術による雑音除去機構を適用する事によって、従来の多重化技術ではこれまで困難とされてきた周波数利用効率の著しい向上を図ることができ、伝送容量大容量化を飛躍的に推し進めることが可能となった。QPSK (Quaternary Phase Shift Keying) 光符号／復号化、超高速光時間ゲート及び光しきい値処理による干渉雑音除去を用いた、周波数利用効率 1.6 bit/s/Hz でCバンド波長帯のみの総容量 6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM x

40 WDM x 40 Gbit/s) 伝送実験^[3]について報告する。

3.1 高周波数利用効率実現のためのキー技術

QPSK 光符号／復号

図4にQPSK-OCDMの動作原理を示す。時間拡散／逆拡散のOCDM方式で、光符号としては3チップQPSK光符号を、光符号器／復号器としては光トランスバーサルフィルタを用いている。光信号としてはチップ間隔より短いパルスを用い、本実験では光トランスバーサルフィルタに入射した光パルスは3分岐され、それぞれ5psずつの遅延が付けられる。また分岐された光パルスのキャリア位相は、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の四値の位相シフトが施され合波される。つまり光符号としては、チップ数3、チップ間隔5psのQPSK光符号を用いている。復号後の波形は、時間領域でのマッチトフィルタリング特性を示し、符号一致の場合は自己相関波形、不一致の場合は相互相関波形となる。これをしきい値処理によって判別する事で多重信号送受信が行える。この方式の特徴は、光符号方式としてQPSK光符号を用いる事によって、相関特性の良い光符号数

を増大している点にある。これによって、同一波長に多重できる光符号数を確保し、効率的な光符号分割多重を行える。

超高速光時間ゲート・光しきい値処理

OCDMでは多重数が増えると、所望以外の光符号から生じる干渉雑音が増大し、S/N比の劣化をもたらす。OCDMのプロセスゲインを確保するために、受信部において超高速光時間ゲート及び光しきい値処理を適用し、復号処理における干渉雑音を大幅に抑制する事によって、多重数の増大が可能となった。図5(a)に示すように、まず光時間ゲートによって、自己相関のメインローブ外にある雑音を除去する。次に図5(b)に示すように、光しきい値処理によって、光時間ゲート窓内に残存する干渉雑音によるデジタル信号「0」及び信号「1」のパワー変動を抑圧する。これらによって他符号からの干渉雑音を大幅に抑圧することが可能となり、光符号分割多重数を増加する事ができ、周波数利用効率の向上が図れる。また、これらの光時間ゲート及び光しきい値処理は、時間領域での高速性と同時に波長多重した信号に対する広帯域性も

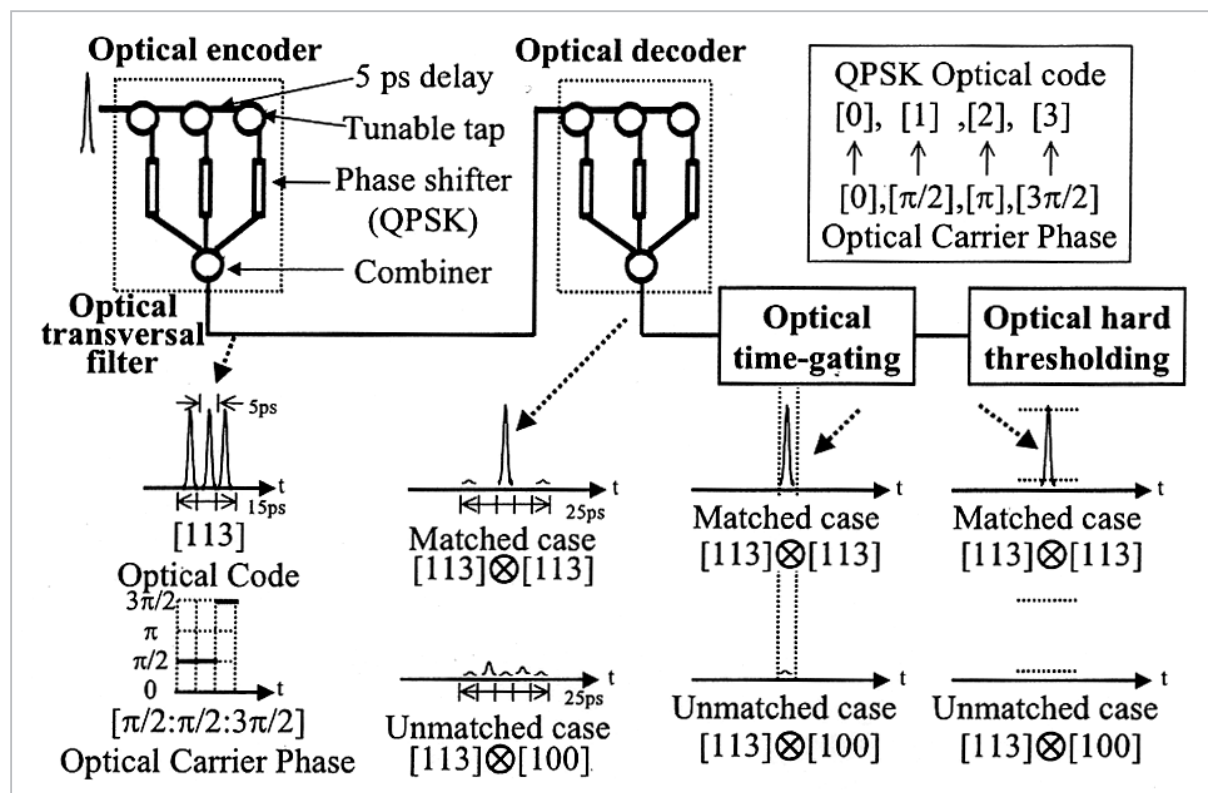


図4 光時間ゲート及び光しきい値処理による干渉雑音除去機能を有するQPSK-OCDMの動作原理

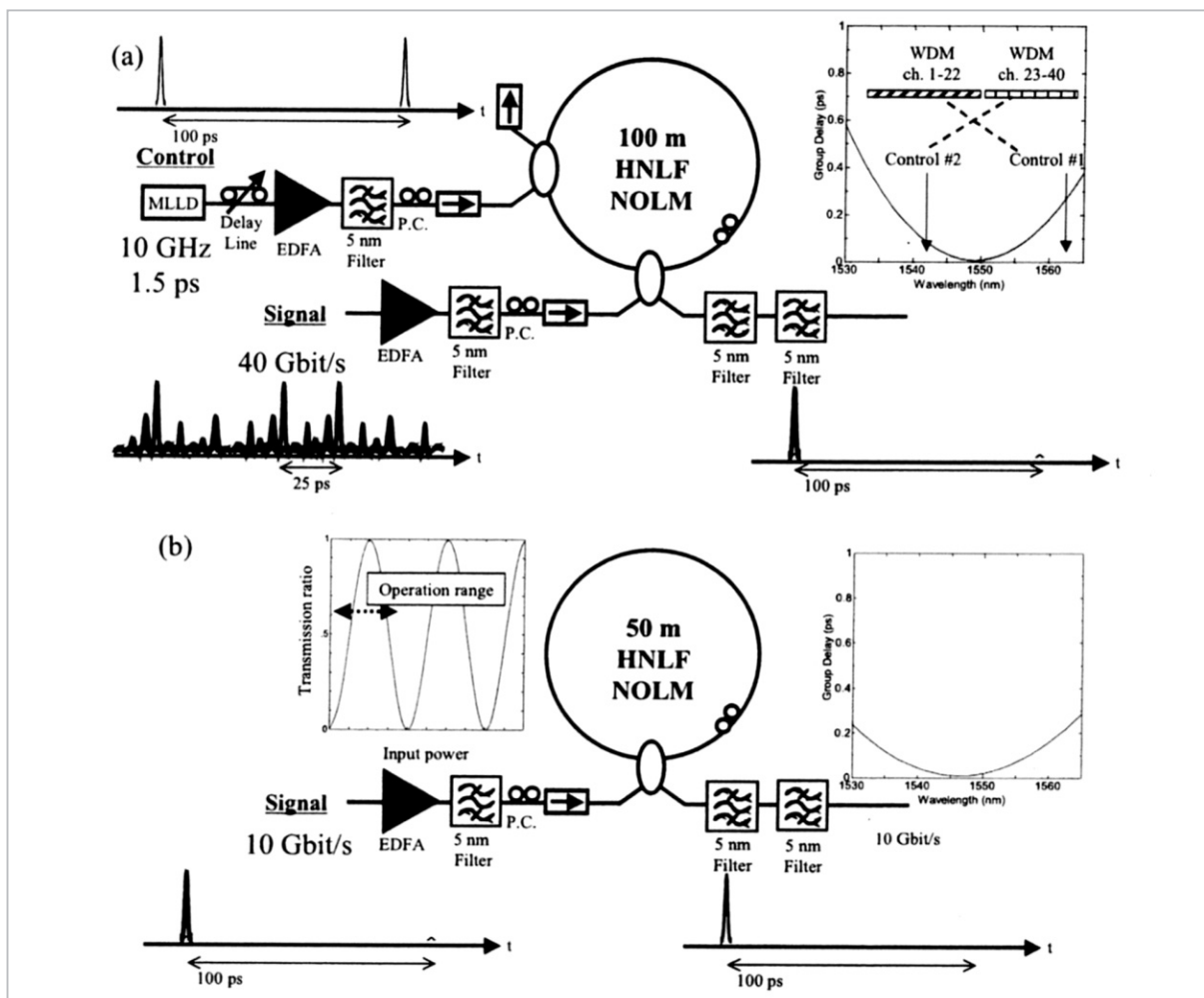


図5 (a) 超高速光時間ゲート及び(b)光しきい値処理による干渉雑音除去

要求される。今回は、高非線形ファイバで非線形光ループミラー (NOLM) を構成することで、広帯域にわたってテラビット級の時間ゲート及び光しきい値処理を実現した[10]。

3.2 1.6bit/s/Hz, 6.4Tbit/s OCDM/WDM (40OCDM × 40WDM × 40Gbit/s) 伝送実験

図6に1.6bit/s/Hz周波数利用効率、6.4Tbit/s OCDM/WDM伝送の実験系を示す。中心波長1533nm, パルス幅1.5psのハイブリッドモード同期半導体レーザパルスが10Gbit/sにデータ変調され、光遅延多重器によって40Gbit/sに多重される。スーパーコンティニューム光生成ファイバを用い超広帯域光が生成され[15]、8分岐され光符号化が行われる。光符号器は周波数特性として200GHzの周期性を有するため、超広帯域光の多波長同時光符号化が可能である[2][3][20]。8

分岐された光信号は、2直交偏波のそれぞれ4光符号が生成され、偏波多重が行われる。RDFとSMFからなる40km分散フラットを2スパン、総長80km伝送後、2分岐されそれぞれAWGにより波長分波される。両AWGは20WDMチャンネル、チャンネル間隔200GHzのもので、中心波長が100GHz異なる(WDM ch. 1: 1532.68nm-ch. 40: 1563.86nm)。波長分波後、偏波分離され、光復号器によって復号処理される。復号後の信号は、まず光時間ゲートによって干渉雑音除去が行われる。光時間ゲートは、10GHz繰り返して行われ、40Gbit/sから10Gbit/sへの光分離の機能も兼ねている。続いて光しきい値処理によって干渉雑音抑圧が行われる。本伝送においては、100GHz間隔に40Gbit/sの40OCDM信号が多重されているため周波数利用効率は1.6bit/s/Hzとなる。

図7に多波長同時光符号化に利用した40Gbit/s

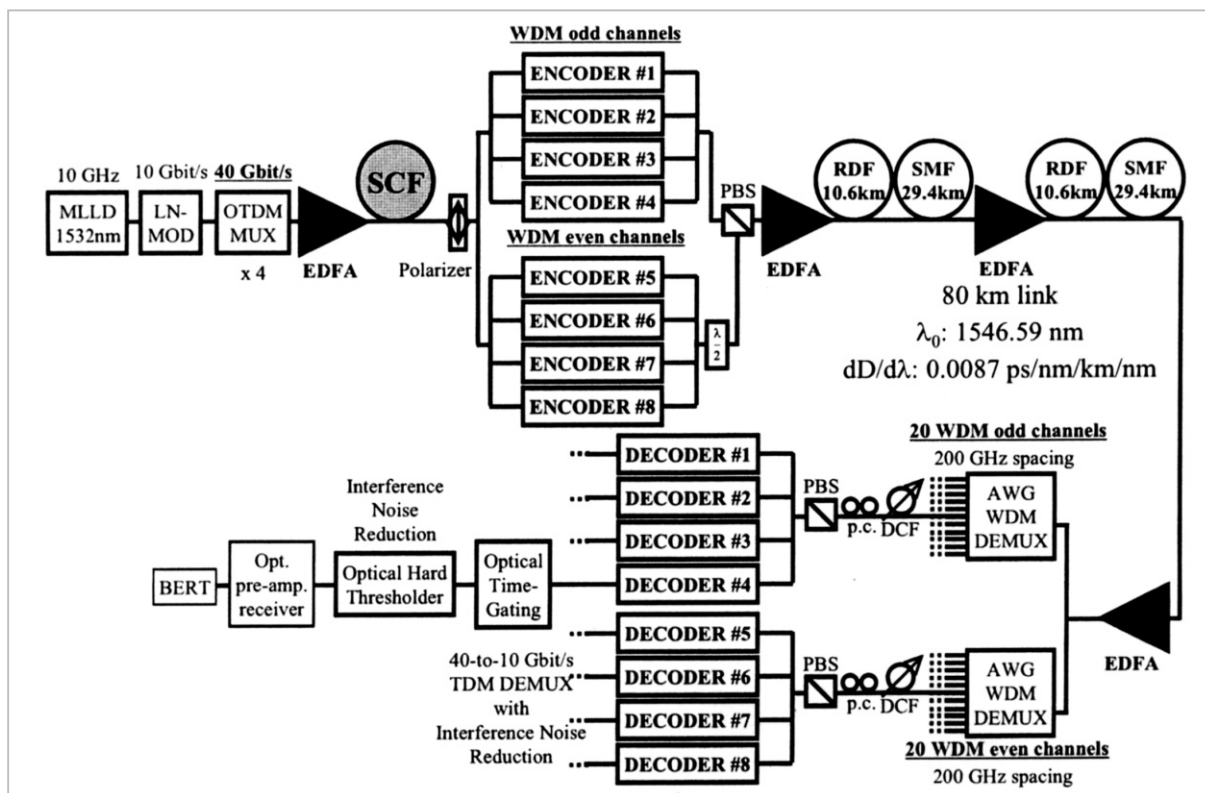


図6 周波数利用効率 1.6bit/sHz, 6.4Tbit/s OCDM/WDM (40OCDM × 40WDM × 40Gbit/s) 伝送実験

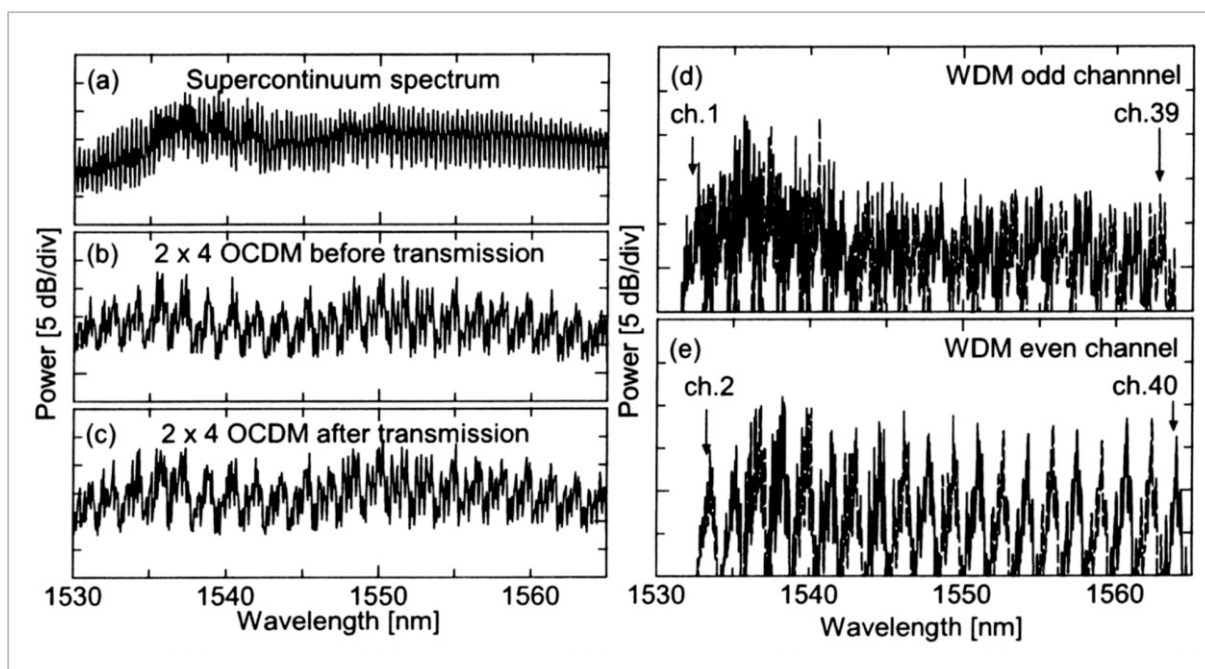


図7 (a) 40 Gbit/s スーパーコンティニューム光スペクトル、(b) 伝送前、(c) 伝送後 2 偏波 × 40OCDM 光スペクトル、(d) 偶数、(e) 奇数 WDM チャンネル光スペクトル。

スーパーコンティニュームスペクトル、伝送前後の2偏波40OCDMスペクトル及び波長分波、偏波分波後の奇数及び偶数WDMチャンネルの光ス

ペクトルを示す。全WDMチャンネルにおけるパワー差は約8dBであった。図8に第40WDMチャンネル(1563.86nm)の光復号後、光時間ゲート後、

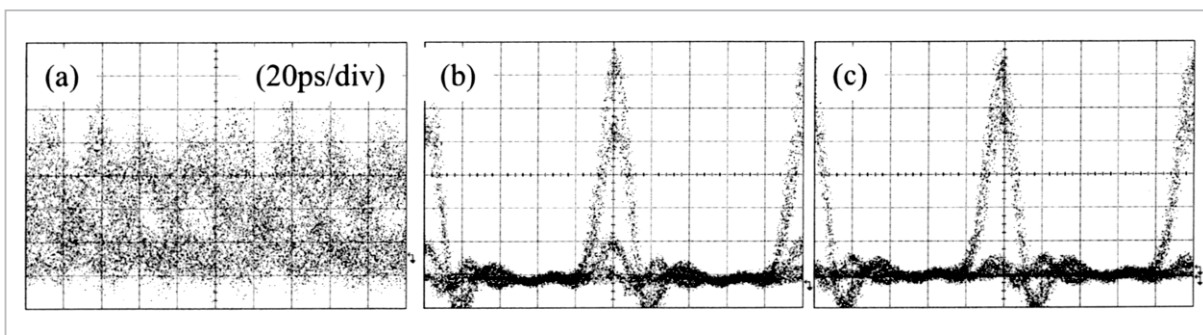


図8 第40WDMチャネル(1563,866nm)の(a)光復号後、(b)光時間ゲート後、(c)光しきい値処理後のアイパターン。

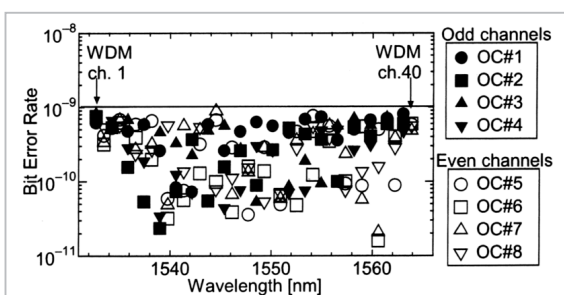


図9 ビット誤り率測定結果

光しきい値処理後のアイパターンを示す。まず光時間ゲートによって、時間ゲート窓外の干渉雑音が除去されS/Nが大幅に改善されているのが分かる。さらに、光しきい値処理により、残留する干渉雑音による信号「0」及び「1」のパワー変動が抑圧され信号品質が向上しているのが分かる。図9に全チャネルの誤り率測定結果を示す。160ch. 全てにおいてビット誤り率 1×10^{-9} 以下が達成された。

3.3 まとめ

QPSK 光符号／復号化及び超高速光時間ゲート

ト、光しきい値処理と偏波多重によって周波数利用効率 1.6 bit/s/Hz の 6.4 Tbit/s OCDM/WDM ($40 \text{ OCDM} \times 40 \text{ WDM} \times 40 \text{ Gbit/s}$) 伝送がCバンド波長帯のみを利用して実証された。さらに、OCDMの多重数を上げること、使用する波長バンドをS, C, Lバンドに広げることなどにより総容量が 40 Tbit/s を超える伝送も可能である。

4 8.05 THz 超広帯域バーチャル光符号/波長パス(VOCP/VWP)ネットワーク

OCDMの技術は、多元接続のみならず光パスネットワークにも適用が可能である。図10(a)に示すような、光符号(Optical Code: OC)によって割り当てられる論理パスとしての光符号パス(Optical Code Path: OCP)は、OCDMネットワークの概念において提案されている[5]。OCDMは既存のWDMネットワークにオーバレイする事ができる[2][3][4]。光符号を導入することで、ネットワークに柔軟性を持たせ、ネットワーク

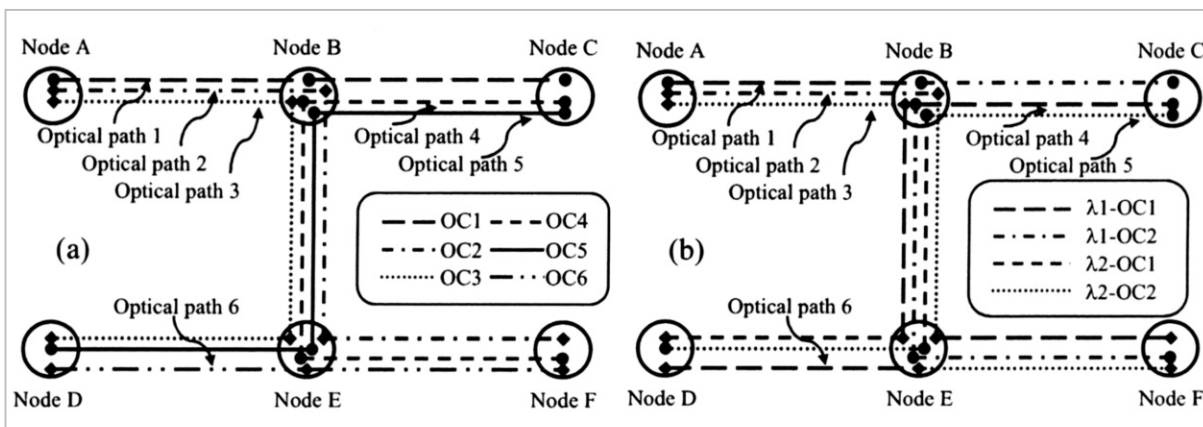


図10 (a) OCPネットワーク及び(b) VOCP/VWPネットワークにおける光パス

資源の有効活用化が可能である。図10(b)に示すように、こうしたOCDM/WDMハイブリッドネットワークにおいては、柔軟な光符号及び波長の変換がキー技術となる。

本節では、動作帯域幅が8.05THzかつ光3R機能を備えた光符号及び波長変換が可能なネットワークノードを、SC光生成を利用することによって実証を行ったので、実験結果を報告する。また、光符号及び波長が変換可能なバーチャル光符号／波長パスネットワークを、四つのノードを結ぶ全長180kmの伝送も含めて実証を行ったので、その結果も報告する。

4.1 バーチャル光符号／波長パス(Virtual Optical Code / Wavelength Path : VOCP/VWP)ネットワーク

OCDM/WDMネットワークにおいては、光パスへの光符号と波長の割り当て方は二通りある。すなわちノードにおいて、光符号及び波長変換を行う場合と行わない場合である。光符号及び波長変換を行わない場合、各光パスは全長にわたりそれぞれ、固有の光符号及び波長が割り当てられる。つまり、光パスはOCPと波長パス(Wavelength Path : WP)によって決定される。これとは反対に、光符号及び波長変換に基づく光パス設定は、VOCP/VWPネットワークに適用される。図10(b)に示すように、光符号及び波長はノードにおける変換によって、リンク毎に設定される。例えば、Optical Path 3を設定するためには、ノードBにおいて波長2・光符号2(OC2- λ_2)の信号は、波長1・光符号1(OC1- λ_1)に変換される。図10に示すように、ノードにおける光符号及び波長変換を行うことで、ネットワーク全体に必要な光符号数若しくは波長数を減らすことができる。OCDM/WDMパスネットワークの拡張性、再構成性を確保するには、光符号及び波長の同時変換がキー技術となる[6][8][21]。VOCP/VWPを導入することによって、ネットワーク需要や光パス数の増大に伴い懸念される、光符号や波長割り当て問題の解決に寄与すると考えられる。

4.2 VOCP/VWPネットワーク実験

図11(a)にVOCP/VWPネットワーク実験系を

示す。ここでは原理確認のため、図10(b)における三つの光パス、つまりOptical path 1におけるNode AからNode C、Optical path 2及びOptical path 3におけるNode AからNode Eへの信号伝送を行う。Node Bにおいては三種類の信号変換が必要となる。つまり λ_1 -OC1から λ_1 -OC2への光符号のみの変換(Optical path 1)、 λ_1 -OC2から λ_2 -OC2への波長のみの変換(Optical path 2)、 λ_2 -OC2から λ_1 -OC1への光符号及び波長の同時変換(Optical path 3)である。各ノードはノンゼロ分散シフトファイバ及び分散補償モジュールからなる分散補償伝送路で結ばれている。Node AからNode Bへは80km、Node BからNode CとNode BからNode Eへは各50kmで全長180kmのリンクである。その平均零分散は長は1550.1nmで分散スロープは0.017ps/nm/km/nmである。

Node Aにおいて、 λ_1 -OC1、 λ_1 -OC2、 λ_2 -OC2の三種類の信号が生成され多重される。パルス幅が1.5psで、中心波長が1549.7nm(λ_1)及び1552.5nm(λ_2)の繰り返し周波数10GHzのハイブリッドモード同期レーザパルスが10Gbit/sにデータ変調され光符号化される。光符号器は3で用いたものと同じ光トランスバーサルフィルタを用い、符号長8チップで位相変化は2相のBPSK(Binary Phase Shift Keying)を用いた。本実験では、光符号として[00000000]のOC1、[0 π 0 π 0 π 0]のOC2を用いた。

図11(b)に示すようにNode Bにおいて、受信信号は波長分波、光復号され、光3Rで信号再生された後に、波長変換及び光符号変換が行われる。まず最初にチャネル間各350GHz、チャネル数24のAWGによって波長分波され、次に光復号器によって復号される。復号後の信号は二分岐され一方は注入同期モード時レーザに入射され、10GHzのクロック抽出が行われる。クロック抽出によって、信号の歪みとノイズの蓄積が解消され、retimingとreshapingが行われる。つまり、クロック抽出光として、高いS/N比を有し、タイミングジッタがもとのモード同期レーザと同程度になり、チャーピングを伴わないパルスが波長 λ_c (1555nm)において生成される[22][23]。クロック抽出光は、二分岐され一方は、半導体過飽和吸収体(SA)時間ゲートデバイスのポ

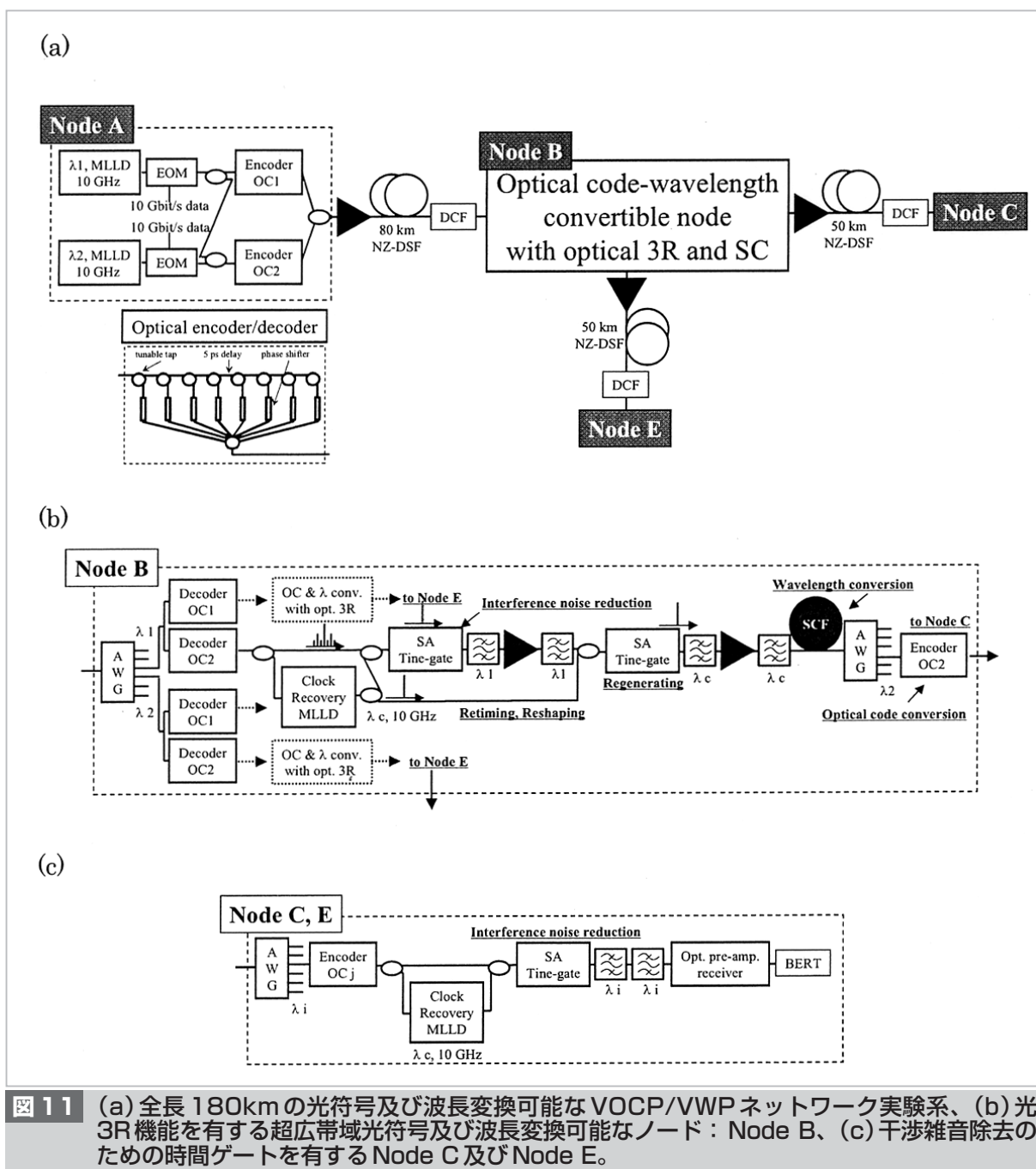


図 11 (a) 全長 180km の光符号及び波長変換可能な VOCP/VWP ネットワーク実験系、(b) 光 3R 機能を有する超広帯域光符号及び波長変換可能なノード：Node B、(c) 干渉雑音除去のための時間ゲートを有する Node C 及び Node E。

ンプパルスとして利用される。SA の逆バイアスが -1.7V の時に、時間幅が約 10ps の時間ゲートが行える [22] [23]。光時間ゲートによって、復号信号の干渉雑音を除去する [1]。時間ゲートされた復号信号は、今度は逆に二つ目の SA 時間ゲートデバイスのポンプパルスとして働き、抽出されたクロックパルスをゲートする。これにより、抽出クロックパルス列は、復号データによってデータ変調され、信号再生が行われる (regeneration)。以上のことから、クロック抽出及び二つ

の SA 時間ゲートデバイスによって光 3R が達成される。波長変換は、再生された波長 λ_c の信号をポンプ光として SC 光を生成し、その SC 光を変換すべき所望の波長において AWG を用いてスペクトルスライスする事によって行われる。SC ファイバとしては、 2km の分散フラットファイバを用いた [15]。波長変換後の信号は、光符号器によって変換すべき新しい符号が付加される。以上のように、光 3R 機能を備えた光符号及び波長の同時変換が Node B において実現される。

図11(c)に示すように、光符号及び波長変換された信号は、50km伝送後それぞれNode C及びNode Eにおいて受信され、信号誤り率が測定される。Node C及びNode Eにおいては、Node Bにおける処理と同じく、波長分波され光復号後、抽出されたクロックによって時間ゲートが行われ、干渉雑音が除去された信号が受信される。

図12(a)に80km伝送後のNode Bにおける信号 λ_1 -OC2のアイパターンを示す。抽出されたクロックにより時間ゲートをした後のアイパターンを図12(b)に示す。時間ゲートによって、自己相関波形のサイドローブと他符号による干渉雑音は除去され、S/N比が向上しているのが分かる。図12(c)に光3Rによって、波長 λ_c にて再生された信号のアイパターンを示す。光3Rによって、タイミングジッタが軽減され、S/N比も向上しているのが分かる。図12(d)に光3Rによって再生された信号をポンプ光としてSC光を発生させ、24チャンネルAWGによってスペクトルスライスした光スペクトルを示す。波長変換の波長幅は、1524.9nmから1590.0nmと65.1nmに及び、

これは周波数に換算すると8.05THzの動作帯域幅を有する。波長変換後の信号のビット誤り率が 10^{-9} となる受光感度を測定した結果を図12(d)に示す。これらの結果から、Node Bにおいては動作帯域幅8.05THzの光符号・波長同時変換が行える事が分かる。

図13にVOCP/VWPネットワークの伝送時のビット誤り率の測定結果を示す。Node Aにおけるback-to-back、80km伝送後、Node Bにおける光3Rを伴う光符号・波長変換後、及び50km伝送後のNode C若しくはNode Eにおける信号誤り率を示している。Node Bにおける80km伝送後の値と、光3Rを伴う光符号及び波長変換後の値を比較すると、変換後信号は送信ノードであるNode Aとほぼ同じ品質の信号となっているのが分かる。また、光符号・波長変換に伴うパワーペナルティもほとんどない。これは、Node Bにおいて光3Rを行っているためであり、これによってネットワークのトランスペアレント性が確保されている。VOCP/VWPネットワークとしては、光符号及び波長変換が可能なノードをリ

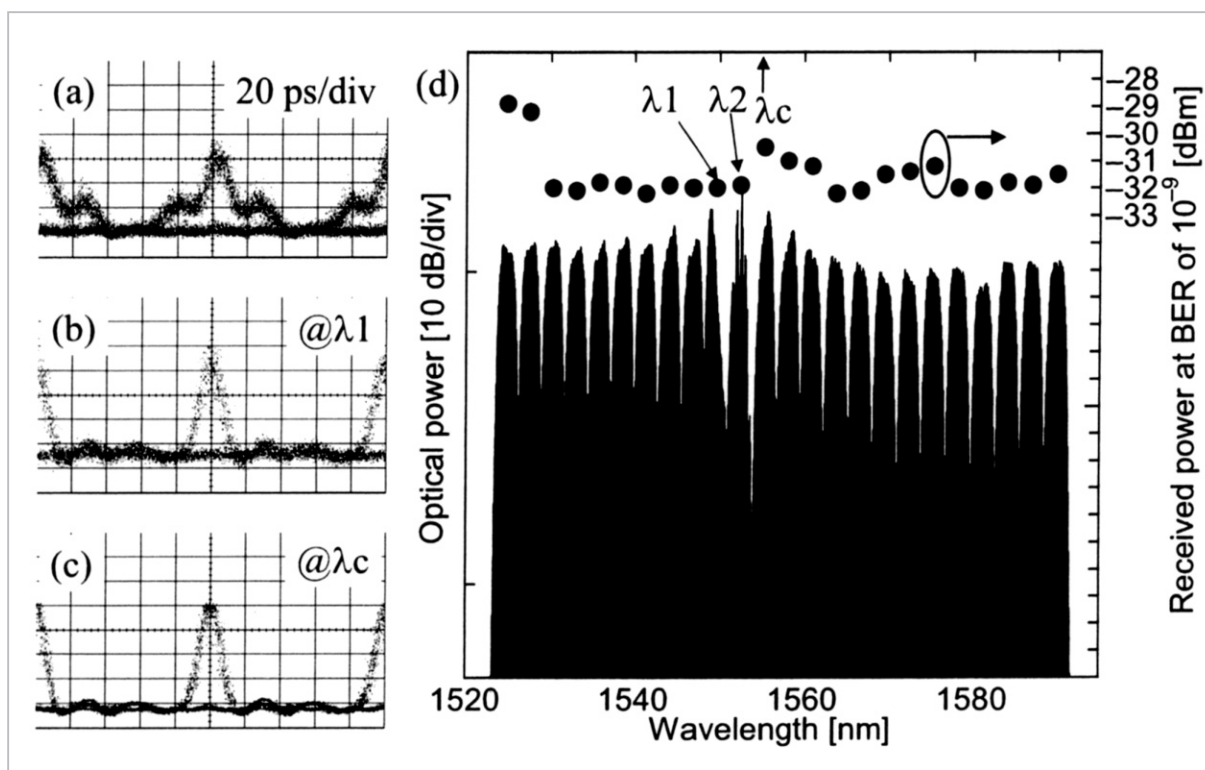


図12 (a)Node Bにおける復号後の λ_1 -OC2信号のアイパターン、(b)時間ゲートによる干渉雑音除去後のアイパターン、(c)光3R後の波長 λ_c の再生光信号、(d)SC光をスペクトルスライスする事により波長変換した信号の光スペクトルと、各変換波長における信号誤り率 10^{-9} の受光感度。

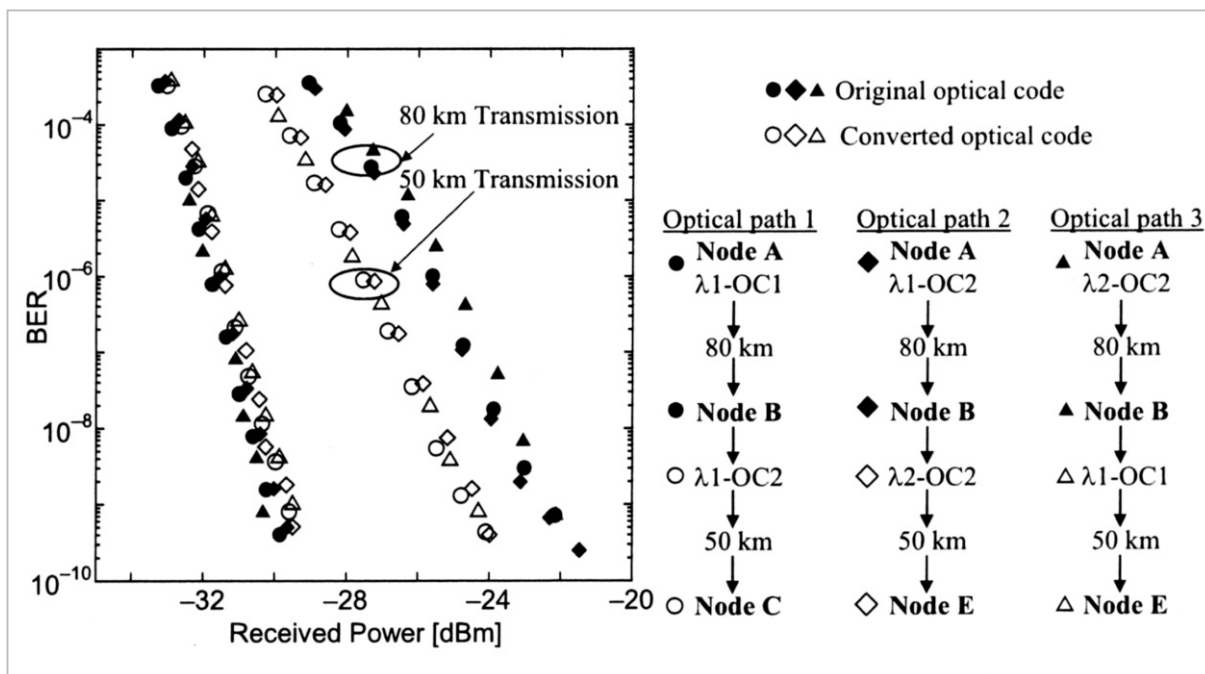


図 13 Node Aにおけるback-to-back、80km伝送後、Node Bにおいて光3Rを伴う光符号及び波長変換後、及び50km伝送後のビット誤り率の変化。

リンクする、全長180kmの信号伝送が符号誤りなく実験的に実証された。

4.3 まとめ

動作帯域幅が8.05THzで、光3R機能を有する光符号及び波長が変換可能なノードを実証した。その結果、4ノードを結ぶ全長180kmでのVOCP/VWPネットワークの信号伝送をチャネル速度10Gbit/sにて行った。本提案方式は、将来のOCDM/WDMパスネットワークにおける有望なノード構成と考えられる。

5 結論

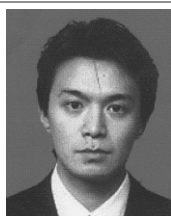
光符号分割多重技術の特性を活用し、テラビットを超えるフォトニックネットワークの実証を行った。リンク技術としては、周波数利用効率1.6bit/s/Hzでの6.4Tbit/s OCDM/WDM伝送を、ノード技術としては、動作帯域幅8.05THzの

光符号・波長が変換可能なVOCP/VWPネットワークを実験的に確認した。ともに、光の持つ属性を有効活用した超高速光信号処理技術を随所に機能的に適用することによって、初めて実現されたものである。これらの研究成果は、ペタビット級フォトニックネットワーク実現を技術的に保証するものであり、いわば光で光を制御するネットワーク技術の開拓であり、既存のネットワークのパラダイムシフトの起爆剤と成り得ると考えられる。超高速・高機能情報通信実現のためには、超高速フォトニックネットワークの実現が必要不可欠であり、本研究成果は、そのための必須基盤技術を開拓するものである。ペタビット級フォトニックネットワークの実現によって、ユーザ毎の通信可能情報量は飛躍的に増大し、これまで不可能であった様々な高度情報サービスが可能になる。これは現在進みつつあるIT革命を根底から支える技術として情報通信社会への波及効果が大きいと考えられる。

参考文献

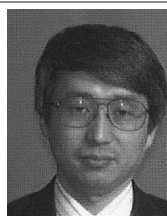
- 1 K. Kitayama, H. Sotobayashi, and N. Wada, "Optical code division multiplexing (OCDM) and its application to photonic networks," *IEICE Transactions on Fundamentals*, vol. E82-A, no. 12, pp. 2616-2626, 1999.
- 2 H. Sotobayashi, W. Chujo, and K. Kitayama, "1.52 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM x 19 WDM x 20 Gbit/s) transmission experiment," *IEE Electron. Lett.*, vol. 37, no. 11, pp. 700-701, 2001.
- 3 H. Sotobayashi, W. Chujo, and K. Kitayama, "1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4OCDMx 40WDMx 40Gbit/s) transmission experiment," 27th European Conference on Optical Communication (ECOC '01), postdeadline paper, PD.M.1.3, vol. 6, pp. 6-7, October 2001.
- 4 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "10 Gb/s OCDM/WDM multiple access using spectrum-sliced supercontinuum BPSK pulse code sequences," *Optical Amplifiers and their Applications (OAA '99)*, PD7, pp. Pdp7-1-Pdp7-3, June 1999.
- 5 K. Kitayama, "Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion," *IEEE Selected Areas in Commun.*, vol.16, pp.1309-1319, 1998.
- 6 H. Sotobayashi, W. Chujo, and K. Kitayama, "Demonstration of ultra-wideband and transparent virtual optical code/wavelength path network," *Optical Fiber Communication Conference (OFC 2001)*, TuV4, pp. TuV4-1-TuV4-3, March 2001.
- 7 K. Kitayama, N. Wada, and H. Sotobayashi, "Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 12, pp. 1834-1844, 2000.
- 8 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "Optical code based label swapping for photonic routing," *IEICE Trans. on Comm.*, pp. 2341-2347, vol. E83-B, no. 10, 2000.
- 9 H. Sotobayashi, W. Chujo, and T. Ozeki, "80 Gbit/s simultaneous photonic demultiplexing based on OTDM-to-WDM conversion by four-wave mixing with a supercontinuum light source," *IEE Electron. Lett.*, vol. 37, no. 10, pp. 640-642, 2001.
- 10 H. Sotobayashi, and C. Sawaguchi, Y. Koyamada, and W. Chujo, "Walk-off free ultrafast nonlinear optical loop mirror composed of a highly-nonlinear dispersion-shifted fiber for demultiplexing 320 Gbit/s TDM signals," *Optical Amplifiers and their Applications (OAA 2001)*, OTuA6, pp. OtuA6-1-OTuA6-3, July 2001.
- 11 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "Cancellation of the signal fading for 60 GHz subcarrier multiplexed optical DSB signal transmission in non-dispersion-shifted fiber using midway optical phase conjugation," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 12, pp. 2488-2497, 1999.
- 12 H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama, "3 x 10 Gbit/s OCDM transmission at 1550 nm band over 150 km standard fiber using midspan optical phase conjugation," *Fifth Optoelectronics and Communications Conference (OECC2000)*, 14A2-4, pp. 456-457, July 2000.
- 13 T. Morioka, K. Mori, S. Kawanishi, and M. Saruwatari, "Multi-WDM-channel, Gbit/s pulse generation from a single laser source utilizing LD-pumped supercontinuum in optical fibers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 3, pp.365-367, 1994.
- 14 Y. Takushima, and K. Kikuchi, "10-GHz, over 20-channel multiwavelength pulse source by slicing supercontinuum spectrum generated in normal-dispersion fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no. 3, pp.322-324, 1999.
- 15 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "325 nm bandwidth supercontinuum generation at 10 Gbit/s using dispersion-flattened and non-decreasing normal dispersion fibre with pulse compression technique," *Electron. Lett.*, vol. 34, no. 13, pp.1336-1337, 1998.
- 16 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "Observation of phase conservation in multi-wavelength BPSK pulse sequence generation at 10 Gbit/s using spectrum-sliced supercontinuum in an optical fiber," *OSA Optics Letters.*, vol. 24, no. 24, pp. 1820-1822, 1999.

- 17 H. Sotobayashi, W. Chujo, and T. Ozeki, "Wideband tunable wavelength conversion of 10 Gbit/s RZ signals by optical time-gating of highly chirped rectangular shape supercontinuum light source," OSA Opt. Lett. vol. 26, no. 17, pp. 1314-1316, 2001.
- 18 H. Sotobayashi, K. Kitayama, and W. Chujo, "40 Gbit/s photonic packet compression and decompression by supercontinuum generation," IEE Electron. Lett. vol. 37, no. 2, pp. 110-111, 2001.
- 19 K. Kitayama, H. Sotobayashi, T. Hashimoto and W. Chujo, "Photonic gateway for TDM - WDM - TDM: 40 Gbit/s (4 x 10 Gbit/s) conversion and reconversion," 26th European Conference on Optical Communication (ECOC 2000), paper 9.4.3, pp. 301-302, vol. 3, Munich, September 2000.
- 20 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "Transfer response measurements of a programmable bipolar optical transversal filter by using the ASE noise of an EDFA," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 11, no. 7, pp.871-873, 1999.
- 21 H. Sotobayashi and K. Kitayama, "All-optical simultaneous code and wavelength conversion of 10 Gb/s BPSK codes by four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier for optical code division multiplexings," IEE Electron. Lett., vol. 35, no. 13, pp. 1091-1093, 1999.
- 22 H. Kurita, I. Ogura and H. Yokoyama, "Ultrafast all-optical signal processing with mode-locked semiconductor lasers," IEICE Trans. on Electron. vol. E81-C, no. 2, pp. 129-139, 1998.
- 23 H. Kurita, Y. Hashimoto, I. Ogura, H. Yamada, and H. Yokoyama, "All-optical 3R regeneration based on optical clock recovery with mode-locked LDs," 25th European Conference on Optical Communication (ECOC 1999), PD3-6, pp. 56-57, 1999.



そとばやし ひでゆき
外林秀之

基礎先端部門超高速フォトニックスネットワークグループ研究員 博士（工学）
フォトニックスネットワーク



なかじょう しかる
中條 渉

基礎先端部門超高速フォトニックスネットワークグループリーダー 工学博士
フォトニックスネットワーク



きたやま けんいち
北山研一

大阪大学大学院工学研究科教授 工学博士
フォトニックスネットワーク