

光符号分割多重を用いた超高速フォトニックネットワーク

外 林 秀 之

Ultrafast Photonic Network Based on Optical Code Division Multiplexing

Hideyuki SOTOBAYASHI

This paper reports the applications of Optical Code Division Multiplexing (OCDM) technique to ultrafast photonic networks. OCDM has unique attributes such as asynchronous transmission, a potential of secure communication, soft capacity on demand, and a high degree of scalability. Therefore, the application areas of OCDM evolve into multiple access, point-to-point transmission, optical path networks, and label-switching routing. After the historical review of the OCDM, some experimental demonstrations of photonic network applications are described.

Key words: optical code division multiplexing, photonic network, photonic link, photonic node, photonic processing

光符号分割多重 (optical code division multiplexing: OCDM) のルーツは、無線通信の分野のスペクトル拡散技術にある。スペクトル拡散技術は 1950 年代半ばに開発された技術で、周波数割り当てにおける周波数グリッドの制約からの解放を目指した技術であった¹⁻³⁾。基本となるのは、拡散符号とよばれる符号を用いて信号を識別することであり、従来技術の周波数および時間多重とは別の次元の手法を提供する^{4,5)}。図 1(a) に示すように、スペクトル拡散技術は、狭帯域の信号を符号により広帯域に周波数を拡散するというアイデアに基づいている。スペクトル拡散により伝送された信号は、受信側では雑音のように振る舞い、符号がわからなければ信号を受信できない。受信側では、送信側と同じ符号を用いることでスペクトル逆拡散である相関処理を行い、復号が行われる。スペクトル逆拡散および信号再生は他チャネルの信号が存在する場合にも行うことができる。その結果、スペクトル拡散技術は、非常に雑音加わる環境下でセキュリティの高い通信が必要

とされる軍事での通信応用として注目を集めた。単に多重化の方法というだけではなく、秘匿性、秘話性、耐妨害性などすぐれた特徴をもち、これらの特徴を生かした衛星通信や携帯電話などへの応用も始まり、スペクトル拡散技術は符号分割多重もしくは符号多元接続技術として利用されるに至っている⁶⁾。

1. 光符号分割多重技術

光分割多重技術としては、これまで光時分割多重 (optical time domain multiplexing: OTDM) と波長分割多重 (wavelength division multiplexing: WDM) がおもに用いられている。符号分割多重技術を光領域に持ち込む大きな目的のひとつは、符号による多重化、多元接続である。これにより、システム内において光符号識別によるスイッチングの機能を導入することができる^{7,8)}。OCDM は、OTDM, WDM とは別の多重化の次元をもつことになるのに加え、異なる特有の性質を示すこと⁹⁻¹¹⁾ から、1970 年代

通信総合研究所 (〒184-8795 小金井市貫井北町 4-2-1)

Massachusetts Institute of Technology (77 Massachusetts Institute of Technology, rm. 36-323, Cambridge, MA02139, U.S.A.)

E-mail: hideyuki@mit.edu

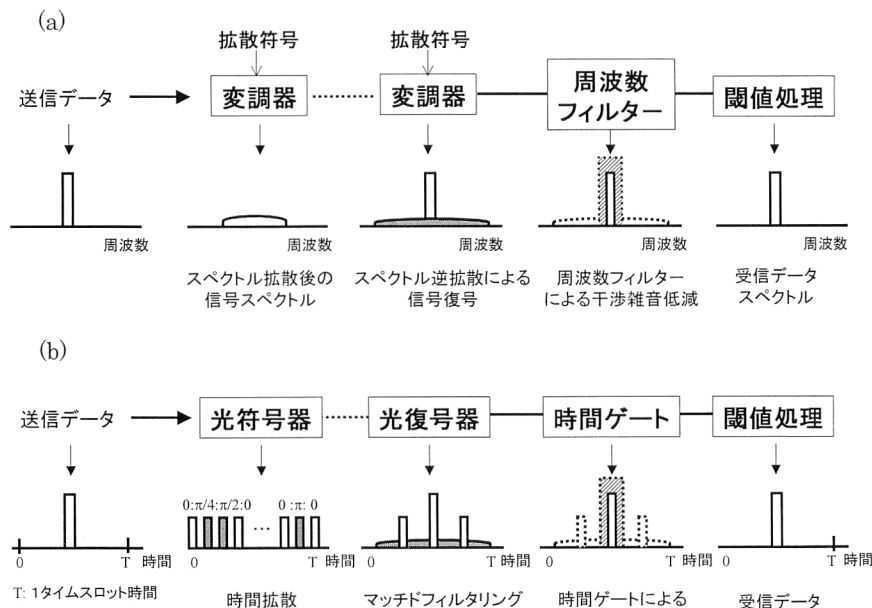


図1 (a) スペクトル拡散における拡散・逆拡散過程とスペクトルの変化, (b) 時間拡散における拡散・逆拡散過程とパルス波形の変化。

以降研究がなされている。提案は古く、1978年に Marom らがファイバー遅延線を用いることで相関器を構成できることを示した¹²⁾。その後1986年に Prucnal らがこれを拡散・逆拡散に応用した多元接続を提案し¹³⁾、拡散符号と符号誤り率に関する研究が進められ、光デバイスの進歩、光技術の進展に伴い、近年ではシステム実験も可能となりさまざまな試みが行われている^{14,15)}。

OCDM は、光の位相情報を用いるかどうかで、非コヒーレント方式とコヒーレント方式に大別できる。コヒーレント方式では、光のキャリア位相を二値もしくは多値で変化させ、その組み合わせを光符号として用いる。一方、非コヒーレント方式は、光の ON/OFF の一連の組み合わせを光符号として用いる方式である。両者の大きな違いは、信号対雑音比 (S/N 比) 特性である。OCDM では、他チャネルからの信号が雑音として働くため、チャネル数と S/N 比は独立ではない。チャネル数と S/N 比の積はほぼ一定と考えてよく、これは信号のビットレートと拡散符号の速度であるチップレートの比、つまり 1 bit あたりのチップ数で決まる。非コヒーレント方式の場合、単極性の拡散符号しか用いることができない。一方、コヒーレント方式の場合は、無線通信でのスペクトル拡散と同じように両極性あるいは多極性の符号を用いることができる。その結果、チャネル数・S/N 比積は、非コヒーレント方式の場合 1 bit あたりのチップ数の平方根でしか改善されないが、コヒーレント方式の場合には 1 bit あたりのチップ数に比例する。つまり、チップ数を 100 倍にした場合、非コヒーレント方式

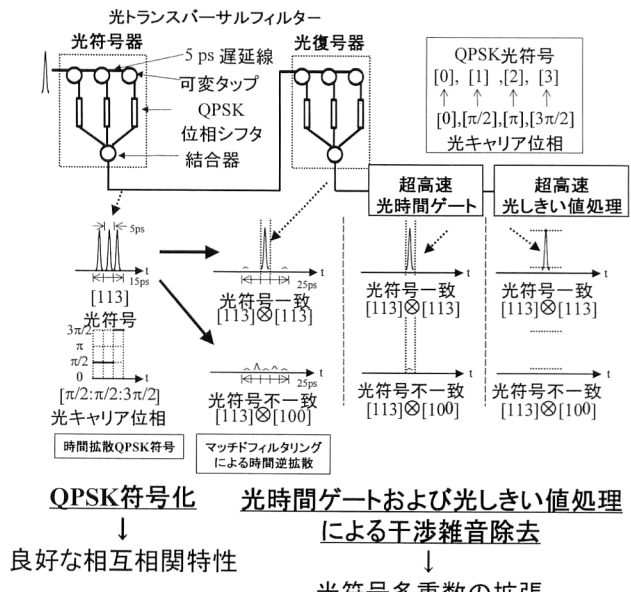


図2 高スペクトル利用効率 QPSK-OCDM の動作原理。

ではチャネル数は 10 倍にしかできないが、コヒーレント方式ではチャネル数を 100 とすることが可能である。したがって、システムの規模と伝送品質という点で、コヒーレント方式がすぐれていることになる。

一方、光符号生成という観点からは、周波数領域で符号を生成する方法、時間領域で符号を生成する方法に大別できる。周波数領域で光符号を生成する方法は、図 1(a) に示すような無線通信でのスペクトル拡散の光化ともとらえられる。コヒーレント方式の周波数領域での光符号生成方式

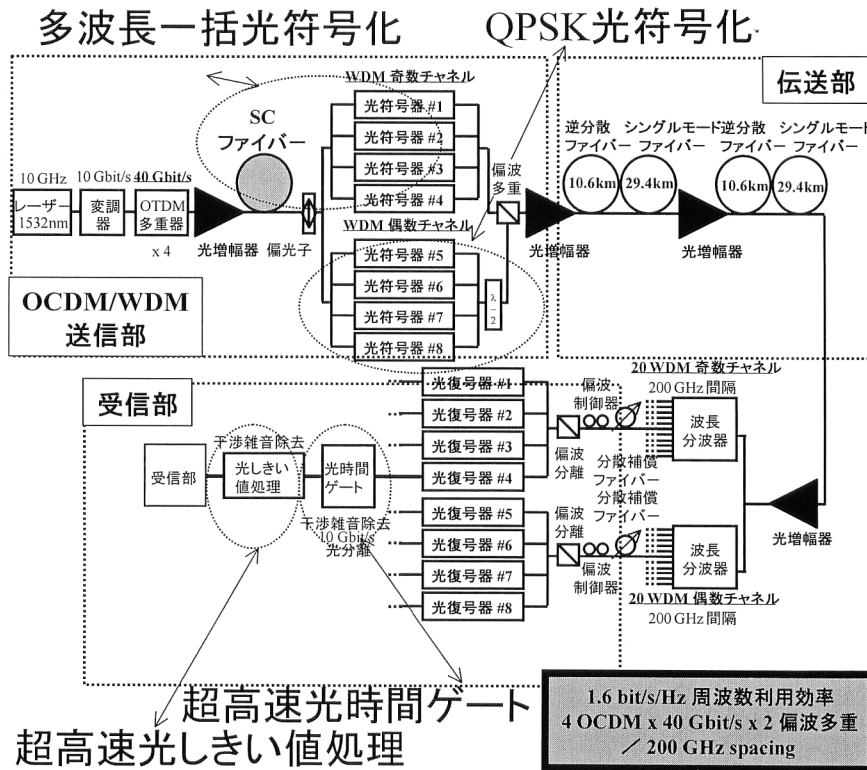


図3 スペクトル効率1.6 bit/s/Hzでの6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) 伝送実験系。

としては、超短パルスを回折格子で空間的にスペクトル分解し、空間位相マスクで光符号化を施す方式が提案されている¹⁶⁾。同様の原理で、位相シフター付アレイ導波路格子による実証も行われている¹⁷⁾。一方、時間領域での光符号生成による原理を図1(b)に示す。時間領域で光信号を拡散・逆拡散することで、光符号の識別が行える。この原理を用いた例としては、スーパーストラクチャー・ファイバークラッググレーティングによる方式^{18,19)}、光トランスバースアルフィルタによる方式(図2参照)¹¹⁾などがある。

このように、OCDMでは各チャンネルに固有の光符号を割り当てることにより、多数の信号が同一波長・同一時間スロット・同一伝送ファイバを共有でき、非同期のアクセスが可能、通信セキュリティの向上、柔軟な多重の拡張性などの特徴を有する。このため、応用分野としては、光アクセス^{20,21)}、光リンク^{22,23)}、光パズネットワーク^{24,25)}、ラベルスイッチルーティング²⁶⁻²⁸⁾などへの応用が検討されている。

2. 高スペクトル利用効率OCDM/WDM伝送への応用

現在用いられている光信号変調・復調は、光信号のON/OFFを判定する二値強度変調-直接検波のデジタル伝送

技術であり、光が本質的に有する可能性の一部が活用されているにすぎない。さらなる伝送容量の拡大を目指して、光源・光増幅器・広帯域伝送ファイバの開発による新たな波長領域の拡大を行うとともに、有限な波長資源を極限的に活用する方式を開拓する、両面からの技術開発が急務となっている。光スペクトルをどれだけ有効に利用しているかをはかるひとつの指標が、1 Hzに占める毎秒あたりのビット数で表されるスペクトル利用効率 (bit/s/Hz) である。通常のWDMシステムでは、スペクトル利用効率0.4 bit/s/Hzに実用的な壁があり、これまでに1477~1610 nmのSバンド、Cバンド、Lバンドの3つの増幅波長帯を利用し、偏波多重を加えることで、約11 Tbit/WDM伝送が実証されている²⁹⁾。シャノンの第二基本定理によれば、「伝送速度 $R <$ 通信容量 C [bit/s] の情報を任意に小さい誤り率で伝送する符号化方法が存在する」ことが示されている。最近の光ファイバ中の非線形伝送に関する理論的検討では、情報理論の考え方を援用することで、約4 bit/s/Hzのスペクトル利用効率での伝送が可能であると予想されている³⁰⁾。OCDMでは各チャンネルごとに固有の符号化を行い、多数のチャンネル信号を同じ波長帯で同時に送ることができるため、WDMシステムにオーバーレイすることにより、これまで困難とされてきた周波数利用効率の著しい

向上が可能となった²³⁾。

図2に本OCDMの原理を示す。この原理の特徴は、光符号方式として四相位相シフトキーイング (quaternary phase-shift keying: QPSK) を用い、同一波長に多重できる光符号数の増大を可能にしたことにある。さらに、受信部において超高速光時間ゲート検波および光閾値処理を適用し、復号処理における干渉雑音を大幅に抑制した点が挙げられる。これらにより、超高速光符号・復号化が可能になり、1.6 bit/s/Hzの周波数利用効率での長距離伝送が実証された²³⁾。なお、後者の技術は、OTDM、WDMにも適用が可能である。これらを導入することにより、OTDM、WDMでも周波数利用効率の向上が期待できる。

図3に、1.6 bit/s/Hz周波数利用効率、6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) 伝送の実験系を示す²³⁾。光符号器はそれ自体が波長特性の周期性をもっている³¹⁾ので、スーパーコンティニューム光³²⁾のような超広帯域光を利用することで、上記の周波数間隔ごとの多波長信号を同時に光符号化することができる^{22,23)}。光受信部においては、まず超高速光時間ゲートの導入により、光ゲート窓外の雑音を除去することが可能となった¹¹⁾。また、光閾値処理の導入により、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」および信号「1」のパワー変動を抑圧することが可能となった。これらの技術により他チャネル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ことができ、周波数利用効率の向上がはかれた。その結果、スペクトル利用効率1.6 bit/s/Hzの伝送が可能となり、Cバンド波長帯 (1530~1565 nm) のみを使用した6.4 Tbit/sのOCDMの長距離伝送を実証した²³⁾。

3. バーチャル光パスネットワークへの応用

先に述べたように、符号分割多重の光領域への適用の魅力のひとつは、スイッチング機能をもたせることができることである^{7,8)}。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。ネットワーク内の各ノード間リンクごとに光符号・波長を割り当て、各ノードにおいて光符号および波長変換を行うことができれば、バーチャルパスを設定することが可能で、この方式をバーチャル光符号/波長パス (virtual optical code path/virtual wavelength path: VOCP/VWP) ネットワークという^{24,25)}。この構成では、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の問題を解決する必要があるが、そのためには光符号および波長の同時変換がキー技術のひとつとなる。

図4(b)にVOCP/VWPネットワークの実験系を示す²⁵⁾。ここでは、原理確認のため、図4(a)における3つの光パス、つまり光パス1におけるノードAからノードC、光パス2および光パス3におけるノードAからノードEへの信号伝送を行った。ノードBにおいては3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 (光パス1)、 λ_1 -OC2から λ_2 -OC2への波長のみの変換 (光パス2)、 λ_2 -OC2から λ_1 -OC1への光符号および波長の同時変換 (光パス3) である。ノードAにおいて、 λ_1 -OC1、 λ_1 -OC2、 λ_2 -OC2の3種類の10 Gbit/s信号が生成され多重される。光源としては、パルス幅が1.5 psで、中心波長が1549.7 nm (λ_1) および1552.5 nm (λ_2) の繰り返し周波数10 GHzのハイブリッドモード同期レーザー^{33,34)}からの光パルスを用いた。光符号器は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二相の二値位相シフトキーイング (binary phase shift keying: BPSK) を用いた。本実験では、光符号として[00000000]のOC1、[0 π 0 π π 0 π 0]のOC2を用いた。図4(b)に示すように、ノードBにおいては受信信号はまず波長分波、光復号され、その後光3R機能で信号再生された後に、波長変換および光符号変換が行われた。光3Rは次のように実現された^{25,33,34)}。復号後の信号は二分岐され、一方は注入同期モード同期レーザーに入射され、10 GHzのクロック抽出が行われる。クロック抽出により、高いS/N比を有し、タイミングジッターがもとのモード同期レーザーと同程度になった。チャーピングを伴わないパルスが波長 λ_c (1555 nm) において生成される。つまり、信号の歪みと雑音の蓄積が解消され、retimingとreshapingが行われる。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時間ゲートデバイス^{33,34)}のポンプパルスとして利用され、復号信号の干渉雑音を除去する¹¹⁾。時間ゲートされた復号信号は、今度は逆に2つ目の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りデータ変調され、信号再生が行われる (regeneration)。以上により、クロック抽出および2段の時間ゲートデバイスにより光3Rが達成される。波長変換は、3R再生された信号をポンプ光としてSC光を生成し、変換すべき所望の波長においてスペクトルスライスすることにより行われる³²⁾。波長変換後の信号は、光符号器により新しい符号が付加され、符号変換が行われる。

光符号および波長変換された信号は、その光符号・波長に応じてノードCもしくはノードEに送信され、そこで信号誤り率が測定される。ノードCおよびノードEにおいて

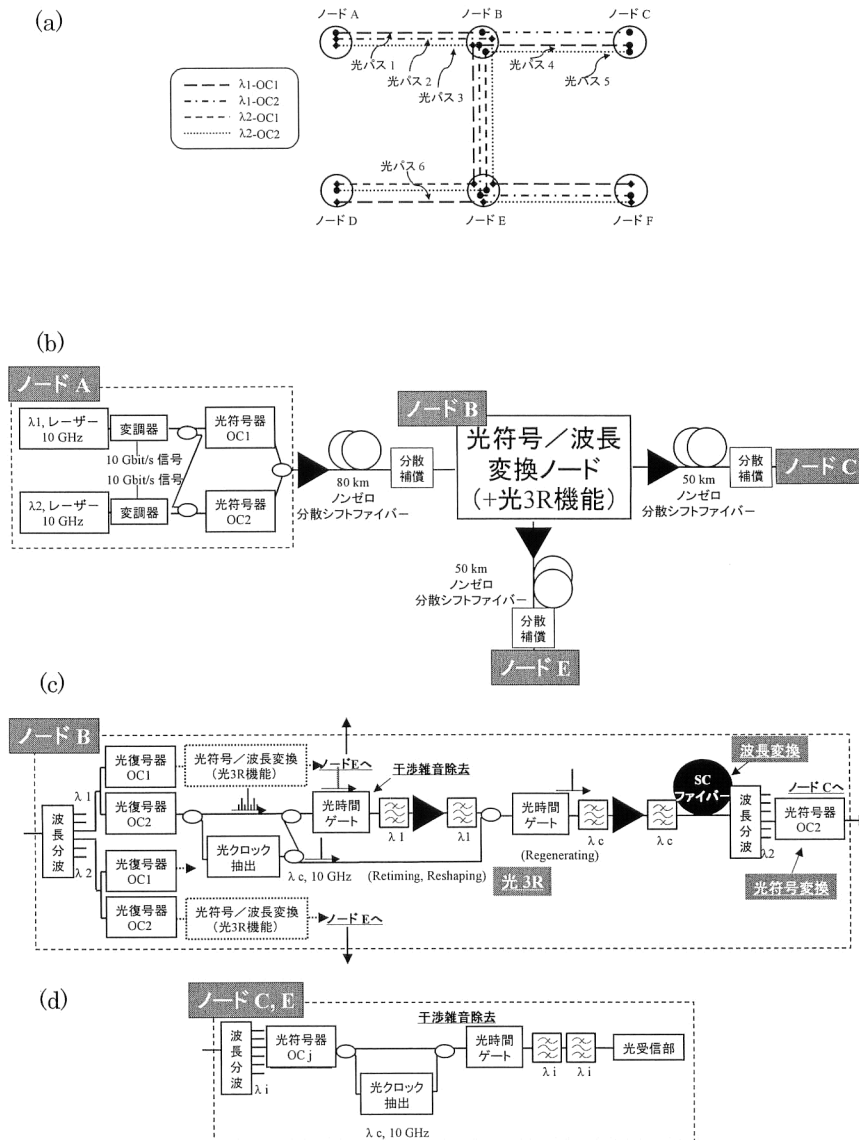


図 4 (a) VOCP/VWP ネットワークにおける光パスネットワーク, (b) 全長 180 km の光符号および波長変換可能な VOCP/VWP ネットワーク実験系, (c) 光 3R 機能を有する超広帯域光符号および波長変換可能なノード：ノード B の実験系, (d) 干渉雑音除去のための時間ゲートを有するノード C およびノード E の実験系。

は (図 4(d)), ノード 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り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。実験においては, ノード B の機能として, 1524.9~1590.0 nm の動作帯域幅 8 THz の光符号・波長同時変換が確認された。また, VOCP/VWP ネットワークとしては, 本実験系は光符号および波長変換が可能で 1 ノードを含んだ全長 180 km のシステムとなり, 信号伝送が符号誤りなく行えることが実証された²⁵⁾。

本稿では, OCDM 技術とその超高速フォトニックネットワークへの応用を解説した。本稿では, 誌面の都合で紹

介できなかったが, 光符号を用いたルーティング²⁶⁻²⁸⁾ や add/drop²¹⁾ など, さらなる試みもなされているので, 他の解説論文等も参照いただきたい^{14,15,35,36)}。OCDM 技術は多くの潜在的 가능성이広がっている。既存ネットワーク技術のパラダイムシフトの起爆剤となるような発展を期待する。

本研究を行う契機を与えてくださり, 常日ごろ研究のご指導をいただいている大阪大学教授北山研一先生に深く感謝いたします。日ごろ叱咤激励をいただき, 独立行政法人通信総合研究所の飯田尚志, 塩見正, 酒井保良, 井筒雅之, 福地一, 板部敏和, 蓮池和夫, 中條渉, 久保田文人, 各諸

氏に深く感謝いたします。また、研究ディスカッションをしていただいた通信総合研究所超高速フォトニックネットワークグループの皆様にも感謝いたします。最後に、在外研究中、研究指導およびディスカッションをいただいている、マサチューセッツ工科大学 Hermann A. Haus 教授、Erich P. Ippen 教授、Franz X. Kärtner 教授に深く感謝いたします。

文 献

- 1) R. C. Dixon: "Spread Spectrum Systems with Commercial Applications (Wiley-Interscience, New York, 1994).
- 2) R. Dixon: "Why spread spectrum?" IEEE Commun. Soc. Mag., **13**, No. 4 (1975) 21-25.
- 3) R. Scholtz: "The spread spectrum concept," IEEE Trans. Commun., **25** (1977) 748-755.
- 4) R. Pickholtz, D. Schilling and L. Milstein: "Theory of spread spectrum communications—A tutorial," IEEE Trans. Commun., **30** (1982) 855-884.
- 5) W. Utlaut: "Spread spectrum: Principles and possible applications to spectrum utilization and allocation," IEEE Commun. Soc. Mag., **16**, No. 5 (1978) 21-31.
- 6) M. Sust: "Code division multiple access for commercial communications," *Review of Radio Science 1992-1994* (International Union of Radio Science, 1994) pp. 155-179.
- 7) Y. Takushima and K. Kikuchi: "Photonic switching using spread spectrum technique," Electron. Lett., **30** (1994) 436-438.
- 8) 多久島裕一: "光ファイバ通信におけるスペクトル拡散技術とその応用", 東京大学博士論文 (1995).
- 9) N. Karafolas and D. Uttamchandani: "Optical fiber code division multiple access networks: A review," Opt. Fiber Technol., **2** (1996) 149-168.
- 10) D. D. Sampson, G. J. Pendock and R. A. Griffin: "Photonic code-division multiple-access communications," Fiber Integrated Opt., **16** (1997) 129-157.
- 11) K. Kitayama, H. Sotobayashi and N. Wada: "Optical code division multiplexing (OCDM) and its application to photonic networks," IEICE Trans. Fundam., **E82-A** (1999) 2616-2626.
- 12) E. Marom: "Optical delay line matched filter," IEEE Trans. Circuits Syst., **25** (1978) 360-364.
- 13) P. Prucnal, M. Santoro and T. Fan: "Spread spectrum fiber optic local area network using optical processing," IEEE/OEA J. Lightwave Technol., **4** (1986) 547-554.
- 14) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "Optical code division multiplexing (OCDM) and its application for Peta-bit/s photonic network," Inform. Sciences, **149** (2003) 171-182.
- 15) H. Sotobayashi: "Ultra-fast photonic networks based on optical division multiplexing," Radio Sci. Bull., No. 304 (2003) 34-47.
- 16) J. A. Salehi, A. M. Weiner and J. P. Heritage: "Coherent ultrashort light pulse code-division multiple access communication systems," IEEE/OEA J. Lightwave Technol., **8** (1990) 478-491.
- 17) H. Tsuda, H. Takenouchi, T. Ishii, K. Okamoto, T. Goh, K. Sato, A. Hirano, T. Kurokawa and C. Amano: "Spectral encoding and decoding of 10 Gbit/s femtosecond pulses using high resolution arrayed-waveguide grating," Electron. Lett., **35** (1999) 1186-1188.
- 18) P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen and D. J. Richardson: "Phase encoding and decoding of short pulses at 10 Gb/s using superstructured fiber Bragg gratings," IEEE Photonics Technol. Lett., **13**, no. 2 (2001) 154-156.
- 19) P. C. Teh, M. Ibsen, J. H. Lee, P. Petropoulos and D. J. Richardson: "Demonstration of a four-channel WDM/OCDMA system using 255-chip 320-Gchip/s quaternary phase coding gratings," IEEE Photonics Technol. Lett., **14** (2002) 227-229.
- 20) H. Sotobayashi and K. Kitayama: "10 Gb/s OCDM/WDM multiple access using spectrum-sliced supercontinuum BPSK pulse code sequences," *Proc. Optical Amplifiers and Their Applications (OAA '99)*, PD7 (Nara, June 1999) pp. Pdp7-1-Pdp7-3.
- 21) K. Kitayama and M. Murata: "Photonic access node using optical code-based label processing and its applications to optical data networking," IEEE/OEA J. Lightwave Technol., **19** (2001) 1401-1415.
- 22) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "1.52 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×19 WDM×20 Gbit/s) transmission experiment," Electron. Lett., **37** (2001) 700-701.
- 23) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s QPSK-OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) transmission experiment using optical hard thresholding," IEEE Photonics Technol. Lett., **14** (2002) 555-557.
- 24) K. Kitayama: "Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion," IEEE Sel. Areas Commun., **16** (1998) 1309-1319.
- 25) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "Transparent virtual optical code/wavelength path network," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electronics, **8** (2002) 699-704.
- 26) K. Kitayama, N. Wada and H. Sotobayashi: "Architectural considerations for photonic IP router based upon optical code correlation," IEEE J. Lightwave Technol., **18** (2002) 1834-1844.
- 27) H. Sotobayashi and K. Kitayama: "Optical code based label swapping for photonic routing," IEICE Trans. Commun., **E83-B** (2000) 2341-2347.
- 28) M. Murata and K. Kitayama: "A perspective on photonic multiprotocol label switching," IEEE Network, **15**, No. 4 (2001) 56-63.
- 29) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasawara and T. Ono: "10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment," *Proc. Optical Fiber Communications Conf. 2001 (OFC 2001)*, PD24 (2001) pp. PD24-1-PD24-3.
- 30) E. E. Narimanov and P. Mitra: "The channel capacity of a fiber optics communication system: Perturbation theory," IEEE/OEA J. Lightwave Technol., **20** (2002) 530-537.
- 31) H. Sotobayashi and K. Kitayama: "Transfer response measurements of a programmable bipolar optical transversal filter by using the ASE noise of an EDFA," IEEE Photonics Technol. Lett., **11** (1999) 871-873.
- 32) 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.*, **34** (1998) 1336-1337.
- 33) H. Kurita, I. Ogura and H. Yokoyama: "Ultrafast all-optical signal processing with mode-locked semiconductor lasers," *IEICE Trans. Electron.*, **E81-C**, No. 2 (1998) 129-139.
- 34) 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 (1999) pp. 56-57.
- 35) 外林秀之: "光符号分割多重ネットワーク", *応用物理*, **71** (2002) 853-859.
- 36) 外林秀之: "光符号分割多重と超高速光信号処理", *光学*, **32** (2003) 26-31.

(2003年5月27日受理)