

波長分割多重伝送における光周波数利用効率の拡大技術

森田 逸郎・吉兼 昇

Enabling Technologies for Highly Spectral-Efficient WDM Transmission

Itsuro MORITA and Noboru YOSHIKANE

High spectral efficiency is a key to cost-effective capacity expansion in wavelength division multiplexing (WDM) systems, since it can relax the requirements to the transmission line. This paper reviews enabling technologies to achieve highly spectral-efficient WDM transmission. As an example of the promising technologies for increasing the spectral efficiency, the bandlimitation by optical filtering is described. The impact of bandlimitation for various kinds of modulation formats, including On-Off Keying (OOK), Differential Phase-Shift Keying (DPSK) and Differential Quadrature Phase-Shift Keying (DQPSK), and the attainable spectral efficiency are discussed.

Key words: optical fiber communication, wavelength division multiplexing, bandlimitation, spectral efficiency

波長分割多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 伝送技術の進展により、1本の光ファイバーで伝送できる伝送容量は1Tbit/sを超えるようになってきている。今後、より経済的に大容量光通信システムを実現するためには、既存の光伝送路をそのまま用いて伝送容量の拡大をはかる方式のように、有限の光帯域を有効に利用した伝送容量の拡大が有効と考えられ、そのためには所要伝送信号帯域を削減できる周波数利用効率の向上が重要となる。光通信システムの大容量化の方法としては、伝送信号帯域拡大により波長多重チャンネル数を増加する方法もあるが、この方法には、伝送信号帯域の拡大に伴い、光増幅器の利得等化や、光ファイバー伝送路の分散/損失管理などが複雑になるという問題も存在するため、できるだけ所要帯域を低減することが望ましい。本稿では、光フィルターを用いた光信号帯域制限技術や光多値変調方式を中心に、周波数利用効率を拡大するための技術について述べる。

1. 高周波数利用効率光伝送実験

WDM 伝送システムにおいて、周波数利用効率を拡大す

るためには、WDM チャンネル間の波長間隔を狭窄化した高密度多重を行う必要がある。その際、チャンネル間隔を狭窄化するほど、チャンネル間の干渉 (線形/非線形クロストーク) の影響が大きくなるため、高密度多重化のためには、この影響を抑制する必要がある。チャンネル間の線形クロストークの影響を抑制するためには、狭スペクトル光信号の利用が有効であり、通常の NRZ (non-return-to-zero)/RZ (return-to-zero) 光信号にかわって、デュオバイナリー光信号や光多値変調信号のような種々の光変調技術を用いる方法が検討されている。図1に、最近の高周波数利用効率光伝送実験において、各種変調方式により得られている周波数利用効率と伝送距離の関係を示す¹⁻¹⁹⁾。ここで、周波数利用効率は、情報伝送速度と波長多重チャンネル間の周波数間隔の比で定義されている。最近の光伝送実験においては誤り訂正符号 (FEC: forward error correction) を想定したものが多く、FEC を用いた場合の伝送速度は、情報伝送速度に誤り訂正用の冗長ビット分 (7~25% 程度) を加えたものとなる。そのため、周波数利用効率を一定とした状態での誤り訂正用の冗長ビットの増加 (信号占有帯域

+

の増大)は、誤り訂正能力を向上させる一方で、隣接チャンネル間のスペクトル干渉の増大による伝送特性劣化も誘起することに注意する必要がある。

図1に示した伝送実験では、チャンネル当たりの伝送速度が40 Gbit/s以上に高速化されたものが多い。これは、周波数利用効率が一定の場合、伝送速度が低速になるほどチャンネル間の波長間隔を削減する必要があるが、著しい周波数間隔の削減は、光源に要求される波長安定性や波長選択フィルターの製造性の観点から好ましくないためである。また、周波数利用効率が一定の場合、チャンネル間の線形クロストークの影響は伝送速度によらず一定であるのに対し、非線形クロストークの影響は伝送速度が高速化される(=チャンネル間の波長間隔が拡大される)につれて小さくなることにもよる。

図1より、高密度波長多重化を実現するための技術としては、送信部での偏波多重(同一波長の直交する偏波を用いて2チャンネルを多重)または偏波インターリーブ(隣接波長多重チャンネル間の偏波を直交)と受信部での偏波分離を組み合わせる方法が有効であることがわかる。偏波多重/分離技術は原理的に周波数利用効率を2倍に向上することが可能であり、この方法を用いて2.0 bit/s/Hzの周波数利用効率を達成した例も報告されている¹⁷⁾。ただし、この方法では、受信側で偏波分離するための自動偏波分離装置がチャンネルごとに必要になるため、受信系が複雑になるという問題がある。

一方、受信側で偏波分離を用いない場合は、光信号のスペクトル幅を一定に保った状態で伝送情報量(ビット数)の増加が可能な光多値変調信号を用いることが、周波数利用効率の拡大に有効であることがわかる。差動四相位相変調(DQPSK: differential quadrature phase-shift keying)光信号²⁰⁾では、1シンボルで2bitの情報を伝送することが可能であり、偏波分離を用いずに1.6 bit/s/Hzの周波数利用効率が達成されている¹⁹⁾。

また、より簡単に狭スペクトル光信号を得る方法として、狭帯域光フィルターによる帯域制限を行う方法もある。この方法では、狭帯域光フィルターとして波長インターリーバーのような周期特性を有するものを用いれば、波長多重信号を一括して帯域制限することも可能であり、簡単な構成で狭スペクトル光信号を得ることができる。さらに、この方法は種々の光信号への適用が可能であり、多くの高周波数利用効率光伝送実験において、その有効性が示されている。

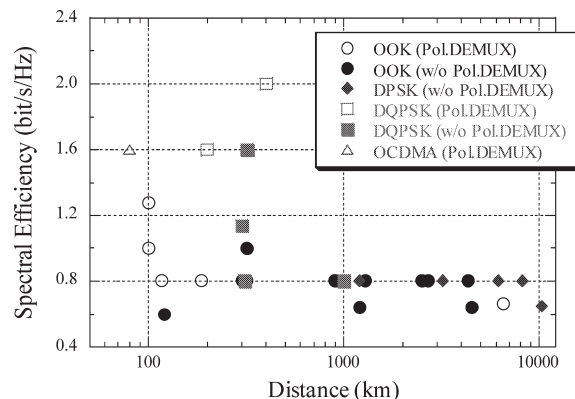


図1 最近の高周波数利用効率光伝送実験結果。

2. 各種変調方式への光フィルターによる帯域制限の適用

狭帯域光フィルターにより光信号を帯域制限する方法は、光通信システムで従来から用いられている強度変調(OOK: on-off keying)方式のNRZ光信号^{2,10,15)}、RZ光信号²¹⁾、キャリアー抑圧型RZ(CS-RZ)光信号^{5-7,14)}、デュオバイナリー光信号¹¹⁾だけでなく、光搬送波の位相変化で情報を伝送する差動位相変調(DPSK: differential phase-shift keying)光信号^{8,9,12)}やDQPSK光信号^{18,19)}など、種々の光信号に適用されている。ただし、一般に過度な帯域制限は信号特性劣化を誘起するため、高密度波長多重化のためには、特性劣化の小さい帯域制限技術の検討が重要となる。ただし、他の光信号と比較して信号スペクトル幅が狭いという特徴を有するデュオバイナリー光信号(またはPSBT: phase shaped binary transmission)の場合、光フィルターを用いた帯域制限により特性改善することが報告されており、帯域制限したデュオバイナリー光信号を用いることにより、隣接チャンネル間の偏波が同一の状態での0.8 bit/s/Hzの周波数利用効率を達成した例も報告されている¹¹⁾。

2.1 CS-RZ OOK 光信号

RZ型の光信号は、NRZ型の光信号と比較して光ファイバー伝送中の非線形光学効果に対する耐力(非線形耐力)や受光感度においてすぐれるため、長距離光伝送実験に適用されることが多い。CS-RZ OOK光信号は、RZ OOK光信号よりも信号スペクトル幅が狭く、非線形耐力もすぐれていることから²²⁾、多くの40 Gbit/sベース長距離波長多重伝送実験で用いられている。さらに、CS-RZ OOK光信号は、帯域制限耐力においてもRZ OOK光信号よりもすぐれているため、狭帯域光フィルターにより帯域制限したCS-RZ OOK光信号を用いた高密度波長多重伝送実験が行われ、0.8 bit/s/Hz以上の周波数利用効率が達成されてい

+

+

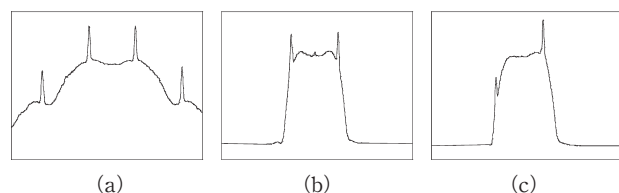


図2 帯域制限 CS-RZ OOK 光信号のスペクトル. (a) 帯域制限前, (b) 対称帯域制限, (c) 非対称帯域制限.

る⁵⁻⁷. このような CS-RZ OOK 光信号の帯域制限耐力をさらに高めるため, 最適帯域制限条件についての検討も行われている²³. 図2は, 半値幅が45 GHzの光フィルターによる帯域制限前後の42.7 Gbit/s CS-RZ OOK 光信号のスペクトルを示している. 通常は, 光信号を狭帯域光フィルターで帯域制限する場合, 図2 (b) に示すような対称帯域制限 (信号中心周波数と光フィルターの中心周波数が一致) が用いられるが, 図2 (c) に示すような非対称帯域制限 (光フィルター中心周波数を信号中心周波数から離調) を行った場合の信号特性を図3に示す. 図3は, 帯域制限光フィルターの半値幅と離調量による帯域制限42.7 Gbit/s CS-RZ OOK 光信号特性変化についての計算機シミュレーション結果を示している. 計算機シミュレーションでは, 帯域制限前の Q 値 (信号品質の指標, 電気的信号対雑音比と等価で, 符号誤り率特性に直接関係する) は25 dB, 光フィルターの透過特性形状は三次のスーパーガウス型が仮定されている. 図3に示されるように, 光フィルターの半値幅が40~80 GHzの場合, 非対称帯域制限のほうが対称帯域制限よりも帯域制限による信号特性劣化が小さいことがわかる. 特に, 光フィルター半値幅が55~65 GHzの範囲では, 非対称に帯域制限することにより, 対称帯域制限の場合と比較して5 dB以上の特性改善が得られる. 非対称帯域制限 CS-RZ OOK 光信号の非線形耐力は対称帯域制限 CS-RZ OOK 光信号よりも小さいため²³, 非線形効果の影響が顕著になる伝送距離が1000 km以上の超長距離伝送では, 非対称帯域制限による優位性は小さくなる. しかし, 伝送距離が1000 km程度以下の高密度波長多重光伝送システムでは, 非対称帯域制限 CS-RZ OOK 光信号が有効となり⁶, 本光信号を用いた伝送実験において, 1.0 bit/s/Hzの周波数利用効率を達成した⁵.

2.2 DPSK 光信号

光搬送波の位相変化により“0”または“1”の情報ビットを伝送する DPSK 光信号を用いた場合, バランスド受信と併用することにより, 従来のOOK光信号よりも約3 dBの受光感度向上が得られるだけでなく, 光ファイバー伝送中のWDMチャネル間の非線形クロストークの影響も小

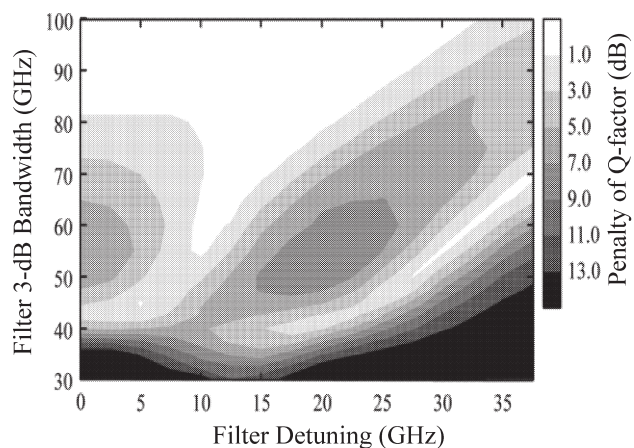


図3 42.7 Gbit/s 帯域制限 CS-RZ OOK 光信号の帯域制限による信号特性劣化.

さくなるため, 最近の長距離光伝送実験において多く用いられている²⁴. このようなすぐれた特性を示す DPSK 光信号を光フィルターで帯域制限することにより, 長距離高密度光伝送を目指した検討も行われている^{8,9,12}.

図4に, 帯域制限 CS-RZ DPSK 光信号および帯域制限 CS-RZ OOK 光信号の送受信系の概略図を示す. CS-RZ DPSK 光信号の送信部では, まず, データ信号を光の位相情報に変換するための位相変調器が用いられる. マツハ・ツェンダー型強度変調器を透過光が最小となるようバイアスして駆動する方式を用いた位相変調は, 0 または π の位相変化が安定に得られることから, 多くの DPSK 伝送実験で用いられている. また, 伝送速度の2分の1の周波数のクロック (CLK) 信号による CS-RZ 化も併用され, 非線形耐力の向上がはかられている. DPSK 変調用の位相変調器としてマツハ・ツェンダー型光変調を用いた場合, 送信部の構成部品は CS-RZ OOK 光信号の場合と同一となり, 差異はマツハ・ツェンダー型光変調器の駆動条件 (バイアスおよび駆動電圧) だけとなる. CS-RZ DPSK 受信系では, 1 bit 前の光信号との位相比較を行うことで位相変化を強度変化に変換する1 bit 遅延器 (MZDI) を用いた後, 1 bit 遅延器の2つの光出力をバランスド受信器で差動受信する. DPSK 光信号受信器の部品点数は, 従来のOOK光信号の場合より増加するが, バランスド受信により約3 dB向上した受信感度が得られる. また, DPSK 光信号を受信するためには, 本来, 光変調器の駆動信号を差動符号に変換するためのプリコーダが必要となるが, 擬似ランダム符号を用いた実験では省略することができる²⁴.

42.7 Gbit/s CS-RZ DPSK 光信号について, 半値帯域幅が45 GHzの光フィルターを用いた帯域制限前後の光スペクトルおよび光信号波形 (帯域53 GHzの受光器を用いて

+

+

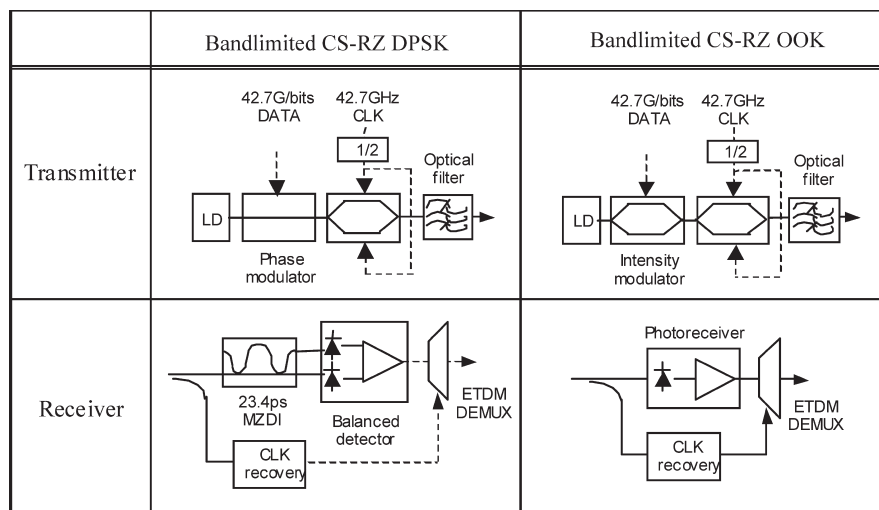


図4 CS-RZ DPSK 光信号と CS-RZ OOK 光信号の送受信系構成。

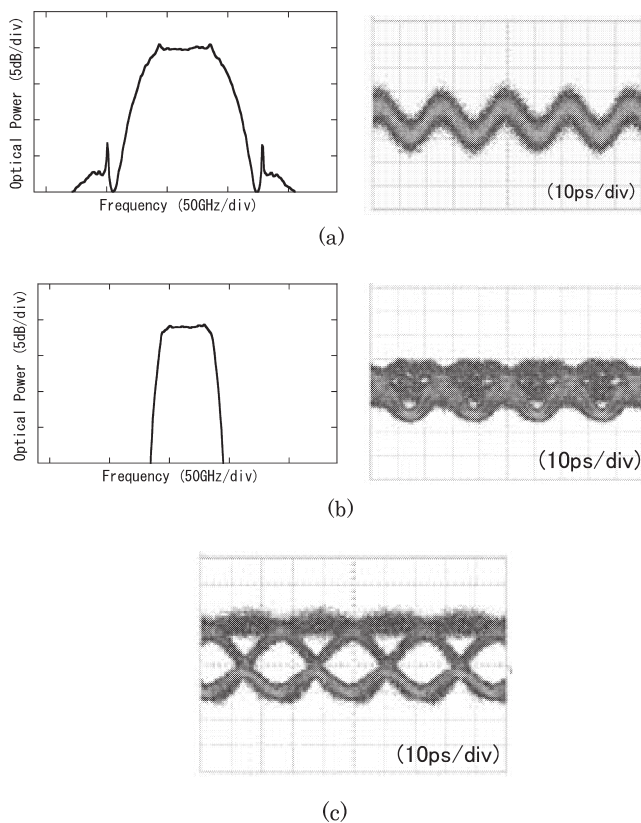


図5 42.7Gbit/s CS-RZ DPSK 光信号のスペクトルと信号波形。(a) 帯域制限なし、(b) 45 GHz 帯域制限、(c) バランスド受信後の電気信号波形。

測定) を図5に示す。帯域制限により光信号波形には大きな劣化がみられるが、図5(c)に示す通り、両ポートからの出力をバランスド受信することにより、良好なアイ開口が得られている。帯域制限前後で、光信号対雑音比(OSNR)を変化させて測定した送受信器対向特性を図6

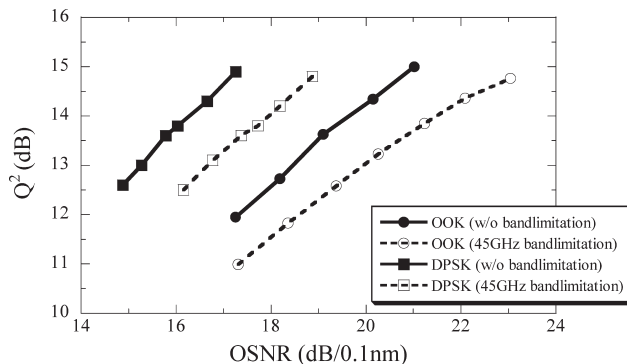


図6 42.7 Gbit/s CS-RZ 光信号の送受信器対向特性。

に示す。比較のため、図6にはCS-RZ OOK 光信号の送受信器対向特性も示している。ここでは、CS-RZ OOK 光信号を帯域制限する場合も、光フィルターの中心周波数を光信号中心周波数に一致させて対称に帯域制限した。図6より、DPSK 光信号を用いることにより、同一OSNRで得られるQ値はOOK 光信号と比較して約3 dB向上することがわかる。また、両者の帯域制限による信号品質劣化は同程度(1 dB程度)であるため、45 GHzの光フィルターによる帯域制限後のDPSK 光信号特性は、帯域制限しないOOK 信号よりもまさっていることもわかる。また、CS-RZ OOK 光信号を帯域幅が45 GHzの光フィルターで非対称に帯域制限した場合、非対称帯域制限による特性改善は1 dB程度であるため(図3)、帯域制限DPSK 光信号のほうがすぐれた特性を有する。このようなすぐれた特性を有する帯域制限CS-RZ DPSK 光信号を用いることにより、40 Gbit/s ベース高密度大洋横断伝送において0.8 bit/s/Hzの周波数利用効率を達成した⁹⁾。

+

+

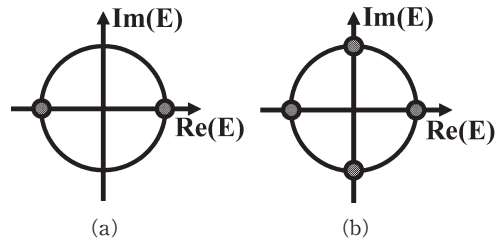


図7 DPSK 光信号と DQPSK 光信号のコンスタレーション. (a) DPSK 光信号, (b) DQPSK 光信号.

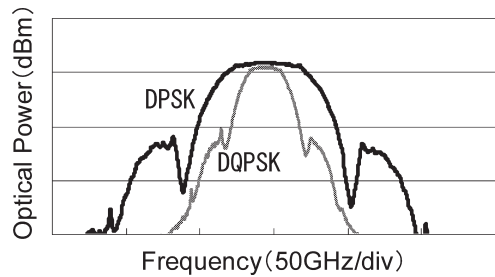
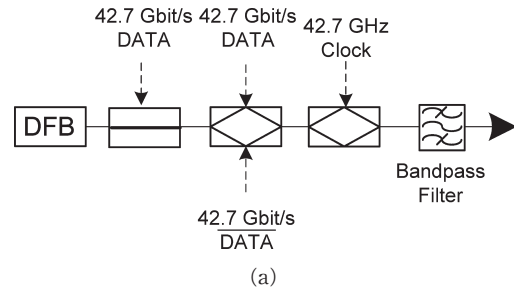


図8 42.7 Gbit/s RZ DPSK 光信号と 42.7 Gbit/s RZ DQPSK 光信号のスペクトル.

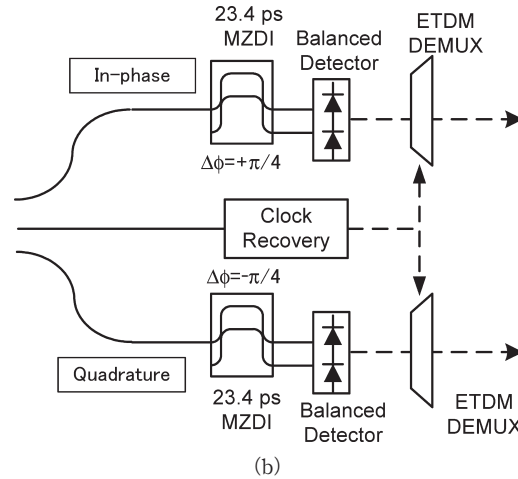


図9 RZ DQPSK 光信号の送受信系構成. (a) 送信系, (b) 受信系.

2.3 DQPSK 光信号

DPSK 光信号では 2 つの位相状態を用いて “0” または “1” の 1 bit の情報を伝送するのに対し, DQPSK 光信号では, 図 7 に示すような 4 つの位相状態を用いて 2 bit の情報を伝送する. したがって, 光信号で伝送する情報量を一定とした場合, 光信号スペクトル幅は非常に狭くなる. 図 8 には, 例として, 伝送速度が 42.7 Gbit/s の DPSK 光信号と DQPSK 光信号のスペクトルを示す. 42.7 Gbit/s DQPSK 光信号のシンボル速度は 21.4 Gsymbol/s であるため, その光信号スペクトル形状は伝送速度が 21.4 Gbit/s の DPSK 光信号とほぼ一致し, そのスペクトル幅は 42.7 Gbit/s DPSK 光信号のほぼ 2 分の 1 となっている. このような狭スペクトル幅を有する DQPSK 光信号は高密度波長多重伝送に適しており, 偏波多重/分離技術を併用した周波数利用率 2.0 bit/s/Hz を達成した例も報告されている¹⁷⁾. また, DQPSK 光信号のような光多値変調方式によるシンボル速度の低減は, 狭スペクトル化の効果と合わさって, 波長分散や偏波モード分散に対する耐力を向上させるという効果もあり, 伝送速度の高速化にともなう課題を解決する方法のひとつとしても検討されている.

このような DQPSK 光信号を光フィルターで帯域制限することにより, さらなる高周波数効率化を目指した検討も行われている^{18,19)}. 図 9 に, 帯域制限 RZ DQPSK 光信号の送受信系の概略図を示す. DQPSK 光信号を生成する方法には, 2 つの位相変調器を並列接続する方法と, 縦列

接続する方法が提案されているが, 図 9 には縦列接続する方法の構成を示した. 本構成の場合, RZ DPSK 光信号の送信系に, データ信号により 0 または $\pi/2$ の位相変化を与える位相変調器を追加することで, RZ DQPSK 光信号を生成することが可能となる. RZ DQPSK 光信号の受信系構成は RZ DPSK 光信号の受信系と同一であり, 1 bit 遅延器の 2 アーム間の位相差を $\pi/4$ および $-\pi/4$ に設定した受信系に受信光信号を分岐入力することで, DQPSK 光信号の 2 つのデータ (in-phase 成分と quadrature 成分) を復号する. しかし, 実験評価においては, 一式の受信系を用いて, 位相差を $\pi/4$ および $-\pi/4$ に順次設定して評価することが多い. さらに, DQPSK 光信号を受信するためには, 本来, 光変調器の 2 系統の駆動信号を差動符号に変換するためのプリコーダーが必要となるが, 実験評価においては, 復号後に想定されるデータパターンを符号誤り率測定器にプログラムすることで符号誤り率を測定する 경우가多い.

図 10, 図 11 に, 半値帯域幅が 45 GHz の光フィルターによる帯域制限の有無の, それぞれの場合の 85.4 Gbit/s (シンボル速度: 42.7 Gsymbol/s) DQPSK 光信号波形を示す. 帯域制限を用いた場合, 1 bit 遅延器による復号前の光信号波形は大きく劣化しているが, 復号およびバランス

+

+

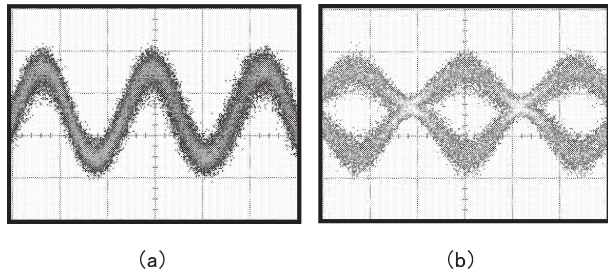


図10 RZ DQPSK 光信号の信号波形。(a) 復調前の光信号波形, (b) バランスド受信後の電気信号波形。

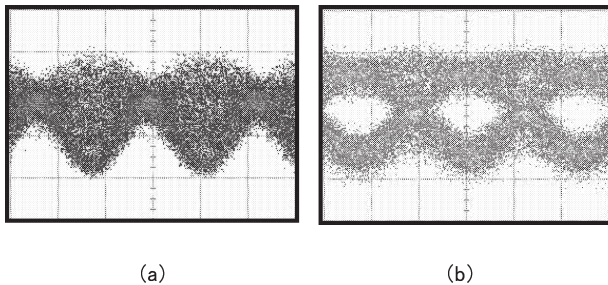


図11 帯域制限RZ DQPSK 光信号の信号波形。(a) 復調前, (b) バランスド受信後。

ド受信により良好なアイ開口が得られていることがわかる。それぞれの場合について、OSNR を変化させて測定した送受信器対向特性を図12に示す。85.4 Gbit/s RZ DQPSK 光信号を45 GHzの光フィルターで帯域制限した場合、帯域制限によるQ値劣化は1 dB程度であり、これは図6に示す42.7 Gbit/s RZ DPSK 光信号を同一の光フィルターで帯域制限した場合の特性劣化とほぼ同じ値であった。このような特性を有する帯域制限RZ DQPSK 光信号を用いることにより、偏波多重/分離を用いない大容量光伝送実験において、1.6 bit/s/Hzの周波数利用効率を達成した¹⁹⁾。

波長分割多重伝送において、周波数利用効率を拡大するための技術を紹介し、周波数利用効率の向上には光フィルターによる帯域制限が非常に有効であることを述べた。光フィルターによる帯域制限をCS-RZ OOK 光信号、DPSK 光信号、DQPSK 光信号などの各種変調方式へ適用した場合の信号特性について述べ、CS-RZ OOK 光信号を帯域制限する場合、光フィルターの中心周波数を光信号中心周波数から離調することにより、帯域制限による特性劣化を抑制できることを示した。また、バランスド受信を用いることにより約3 dBの受信感度改善が得られるCS-RZ DPSK 光信号は、帯域制限耐力も大きく、周波数利用効率0.8 bit/s/Hzの大洋横断伝送が可能であることを示した。ま

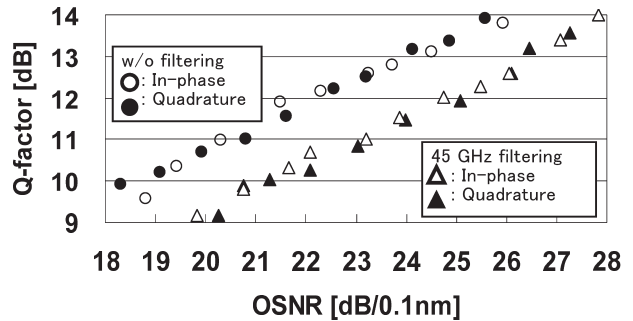


図12 85.4 Gbit/s RZ DQPSK 光信号の送受信器対向特性。

た、光多値変調化により信号スペクトル幅を拡大せずに伝送速度を向上することが可能なDQPSK 光信号は周波数利用効率の拡大に非常に有効であり、光フィルターによる帯域制限を併用することで、偏波多重/分離を用いずに1.6 bit/s/Hzの周波数利用効率を得られることを示した。

本稿で紹介した検討をともに行ったKDDI研究所の枝川、釣谷、縣の各氏に感謝いたします。また、日ごろよりご指導いただいているKDDI研究所浅見所長、鈴木執行役員、田中グループリーダーに感謝いたします。

文 献

- 1) H. Sotobayashi, W. Chujo and K. Kitayama: "1.6 bit/s/Hz, 6.4 Tbit/s OCDM/WDM (4 OCDM×40 WDM×40 Gbit/s) transmission experiment," *ECOC 2001*, PD.M.1.3 (2001).
- 2) S. Bigo, Y. Frignac, G. Charlet, W. Idler, S. Borne, H. Gross, R. Dischler, W. Poehlmann, P. Tran, C. Simonneau, D. Bayart, G. Veith, A. Jourdan and J. P. Hamaide: "10.2 Tbit/s (256×42.7 Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100 km TeraLight™ fiber with 1.28 bit/s/Hz spectral efficiency," *OFC 2001*, PD25-1 (2001).
- 3) T. Ito, T. Ono, Y. Yano, K. Fukuchi, H. Yamazaki, M. Yamaguchi and K. Emura: "Feasibility study on over 1 bit/s/Hz high spectral efficiency WDM with optical duobinary coding and polarization interleave multiplexing," *OFC '97*, TuJ1 (1997).
- 4) T. Ito, K. Fukuchi, K. Sekiya, D. Ogasawara, R. Ohira and T. Ono: "6.4 Tb/s (160×40 Gb/s) WDM transmission experiment with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency," *ECOC 2000*, PD1.1 (2000).
- 5) I. Morita, T. Tsuritani, N. Yoshikane, A. Agata, K. Imai and N. Edagawa: "100% spectral-efficient 25×42.7 Gbit/s transmission using asymmetric filtered CS-RZ signal and a novel crosstalk suppressor," *ECOC 2002*, PD4.7 (2002).
- 6) T. Tsuritani, I. Morita, A. Agata and N. Edagawa: "Optimum pre-filtered CS-RZ signal for 40 Gbit/s-based highly spectral-efficient ultralong-haul transmission using all-Raman repeaters," *OFC 2003*, FE4 (2003).
- 7) A. Agarwal, S. Banerjee, D. Grosz, A. Kung, D. Maywar, A. Gurevich and T. Wood: "Ultra-high-capacity long-haul 40-Gb/s WDM transmission with 0.8-b/s/Hz spectral efficiency by means of strong optical filtering," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 15 (2003) 470-472.
- 8) T. Tsuritani, K. Ishida, A. Agata, K. Shimamura, I. Morita, T. Tokura, H. Taga, T. Mizuochi and N. Edagawa: "70

+

+

- GHz-spaced 40×42.7 Gbit/s transmission over 8700 km using CS-RZ DPSK signal, all-Raman repeaters and symmetrically dispersion-managed fiber span," *OFC 2003*, PD23 (2003).
- 9) I. Morita and N. Edagawa: "50 GHz-spaced 64×42.7 Gbit/s transmission over 8200 km using pre-filtered CS-RZ DPSK signal and EDFA repeaters," *ECOC 2003*, Th4.3.1 (2003).
 - 10) G. Charlet, W. Idler, R. Dischler, J.-C. Antona, P. Tran and S. Bigo: "3.2 Tbit/s (80×42.7 Gb/s) C-band transmission over 9×100 km of Teralight fiber with 50 GHz channel spacing," *OAA 2002*, PDP1 (2002).
 - 11) G. Charlet, J. Antona, S. Lanne and S. Bigo: "From 2100 km to 2700 km distance using phase-shaped binary transmission at 6.3 Tbit/s capacity," *OFC 2003*, WE3 (2003).
 - 12) B. Zhu, L. E. Nelson, S. Stulz, A. H. Gnauck, C. Doerr, J. Leuthold, L. Gruner-Nielsen, M. O. Pedersen, J. Kim, R. Lingle, Jr., Y. Emori, Y. Ohki, N. Tsukiji, A. Oguri and S. Namiki: "6.4-Tb/s (160×42.7 Gb/s) transmission with 0.8 bit/s/Hz spectral efficiency over 32×100 km of fiber using CS-RZ DPSK format," *OFC 2003*, PD19 (2003).
 - 13) H. Bissessur, G. Charlet, C. Simonneau, S. Borne, L. Pierre, C. De Barros, P. Tran, W. Idler and R. Dischler: "3.2 Tb/s (80×40 Gb/s) C-band transmission over 3×100 km with 0.8 bit/s/Hz efficiency," *ECOC 2001*, PD.M.1.11 (2001).
 - 14) J.-X. Cai, M. Nissov, C. Davidson, Y. Cai, A. Pilipetskii, H. Li, M. Mills, R.-M. Mu, U. Feiste, L. Xu, A. Lucero, D. Foursa and N. Bergano: "Transmission of thirty-eight 40 Gb/s channel (>1.5 Tb/s) over transoceanic distance," *OFC 2002*, FC4 (2002).
 - 15) S. Bigo, W. Idler, J.-C. Antona, G. Charlet, C. Simonneau, M. Gorlier, M. Molina, S. Borne, C. de Barros, P. Sillard, P. Tran, R. Dischler, W. Poehmann, P. Nouchi and Y. Frignac: "Transmission of 125 WDM channels at 42.7 Gbit/s (5 Tbit/s capacity) over 12×100 km of TeraLight Ultra fibre," *ECOC 2001*, PD.M.1.1 (2001).
 - 16) Y. Yano, T. Ono, K. Fukuchi, T. Ito, H. Yamazaki, M. Yamaguchi and K. Emura: "2.6 terabit/s WDM transmission experiment using optical duobinary coding," *ECOC '96*, ThB.3.1 (1996).
 - 17) P. Cho, G. Harston, C. Kerr, A. Greenblatt, A. K Aplan, Y. Achiam, G. Levy-Yurista, M. Margalit, Y. Gross and J. Khurgin: "Investigation of 2-b/s/Hz 40-Gb/s DWDM transmission over 4×100 -km SMF-28 fiber using RZ-DQPSK and polarization multiplexing," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 656-658.
 - 18) N. Yoshikane and I. Morita: "70 GHz-spaced 50×85.4 Gb/s transmission over 300 km using pre-filtered and copolarized CS-RZ DQPSK signals," *OFC 2004*, PDP38 (2004).
 - 19) N. Yoshikane and I. Morita: "160% spectrally-efficient 5.12 Tb/s (64×85.4 Gb/s RZ DQPSK) transmission without polarization demultiplexing," *ECOC 2004*, Th.4.4.3 (2004).
 - 20) R. A. Griffin and A. C. Carter: "Optical Differential Quadrature Phase-Shift Key (oDQPSK) for high capacity optical transmission," *OFC 2002*, WX6 (2002).
 - 21) T. Tsuritani, A. Agata, K. Imai, I. Morita, K. Tanaka, T. Miyakawa, N. Edagawa and M. Suzuki: "35 GHz-spaced-20 Gbps $\times 100$ WDM Z transmission over 2700 km using SMF-based dispersion flattened fiber span," *ECOC 2000*, PD1.5 (2000).
 - 22) A. Hirano, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Sano and H. Toba: "40 Gbit/s L-band transmission experiment using SPM-tolerant carrier-suppressed RZ format," *Electron. Lett.*, **35** (1999) 2213-2215.
 - 23) A. Agata, I. Morita, T. Tsuritani and N. Edagawa: "Characteristics of asymmetrically filtered 40 Gbit/s CS-RZ signals," *OFC 2003*, MF78 (2003).
 - 24) A. H. Gnauck, G. Raybon, S. Chandrasekhar, J. Leuthold, C. Doerr, L. Stulz, A. Agarwal, S. Banerjee, D. Grosz, S. Hunsche, A. Kung, A. Marhelyuk, D. Maywar, M. Movasaghi, X. Liu, C. Xu, X. Wei and D. M. Gill: "2.5 Tb/s (64×42.7 Gb/s) transmission over 40×100 km NZDSF using RZ-DPSK format and all-Raman-amplified spans," *OFC 2002*, FC2 (2002).

(2004年10月18日受理)

+