

多値位相変調方式を用いた 40 Gbit/s 光トランスポンダ

光電子回路開発センター 藤 咲 芳 春¹・高 橋 智 和¹・森 正 男¹・高 木 秀 樹²

40 Gbit/s Optical Transponder with Multi-Level Phase-Shift-Keying Format

Y. Fujisaku, T. Takahashi, M. Mori, and H. Takagi

多値位相変調方式を用いた 40 Gbit/s 長距離光インタフェースモジュールを開発した。従来の振幅変調方式では、要求される光雑音耐力、分散耐力、光占有帯域幅などの特性確保が困難であるため、新たに RZ-DQPSK 方式を採用し、それらの特性の改善をはかった。また、オプションで半導体光増幅器 (SOA) を内蔵でき、光出力信号を所望の強度まで増幅する機能も備えた。本製品は、業界標準である 300pin MSA に準拠し、43.02, 44.57 Gbit/s のデュアルレートで動作する。

40 Gbit/s long-distance optical interface module with multi-level phase-shift-keying format has been developed. As the conventional amplitude-shift-keying format is difficult to satisfy the required specifications of OSNR, dispersion tolerance, and optical bandwidth, an RZ-DQPSK format was newly adopted to improve these characteristics. The semiconductor optical amplifier, which can boost optical output signal to the required power level, can be built in as an optional extra. This product is based on 300pin MSA, and operates by a dual rate of 43.02 and 44.57 Gbit/s.

1. ま え が き

インターネットトラフィックは年々増加しており、日本国内ではこの 1 年で約 1.2 倍となった¹⁾。ブロードバンド回線はインフラとして広く普及しており、You Tube に代表される動画やビデオ配信などの大容量コンテンツの整備も進んできている。今後もトラフィックはますます増加していくと予想され、基幹系光ネットワークの大容量化が急務となっている。

近年、基幹系の光ネットワークは 10 Gbit/s をベースに WDM を併用することで大容量化がはかられてきたが、さらなる大容量化への要求にこたえるため、40 Gbit/s ベースのシステムの導入が開始されてきている²⁾。既存の 10 Gbit/s のシステムを 40 Gbit/s にアップグレードしようとする場合、従来採用されていた NRZ の振幅変調方式では、要求される光雑音耐力、分散耐力、光占有帯域幅などの特性確保が困難となる。それらの様々な課題に対して総合的に最も適した変調方式として、RZ-DQPSK が有力視されている。DQPSK は 4 値の位相を用いる変調方式であり、光占有帯域幅が狭く、波長分散や偏波モード分散 (PMD) などの分散耐力に優れる。また受信側では、遅延検波かつバランス受信をすることで、受信感度を改善できる利点もある。

本稿で紹介する光トランスポンダは、基幹系光通信装置の中の、物理層 (電気-光変換、光送受信など) の機能を受け持つサブシステムである。当社では、これまで基幹系光トランスポンダの業界標準仕様である 300 pin MSA³⁾ に注力し、10 Gbit/s の光トランスポンダの開発を進めてきた^{4) 5) 6)}。このたび、RZ-DQPSK 方式を採用した 40 Gbit/s の光トランスポンダを新規に開発したので、その性能と特徴を報告する。

2. 機 能

2.1 外 観

光トランスポンダの外観を図 1 に示す。筐体部の寸法は 127 mm × 177 mm × 18 mm と、300 pin MSA サイズに準拠している。

2.2 機能概要

光トランスポンダのブロック図を図 2 に示す。図中、濃い太線は光信号の流れを、細線は電気信号の流れを、薄い太線は SOA 内蔵オプションの光信号の流れを、それぞれ表している。

送信部の主要な光コンポーネントは、波長可変レーザと、IQ 変調器と、パルスカーバとで構成される。波長可変レーザはフルバンドの波長可変機能を有し、C-band、または L-band を選択できる。IQ 変調器は LiNbO₃ を使用したマッハツェンダ型光変調器 (LN 変調器) の一種であり、マッハツェンダ干渉計が二段になっ

1 光モジュール開発部

2 光モジュール開発部グループ長

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
RZ	Return to Zero	各ビットの間がいったんゼロになる2値の符号化方式
NRZ	Non Return to Zero	各ビットの間がいったんゼロにならない2値の符号化方式
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	2ビットのデータを4つの位相に割り当てるデジタル変調方式であって、直前のシンボルとの差分に位相情報を与えるもの
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	半導体の誘導放出を利用する光増幅器
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	光ファイバのコアにエルビウムイオンを添加し、そのエネルギー準位の遷移の誘導放出を利用する光増幅器
MSA	Multi Source Agreement	複数の企業が集まって統一した仕様を策定し、それに準拠した製品を提供する形態
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio	光信号と雑音との比
WDM	Wavelength Division Multiplexing	一本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を同時に入力し、大容量の情報を送る方式
DGD	Differential Group Delay	光ファイバの複屈折により生ずる、直交する2つの偏波モード間の伝達時間差
SFI-5	Serdes Framer Interface Level 5	40 Gbit/s アプリケーション向けに策定されたインタフェース規格
I2C	Inter Integrated Circuit	周辺デバイス とのシリアル通信方式

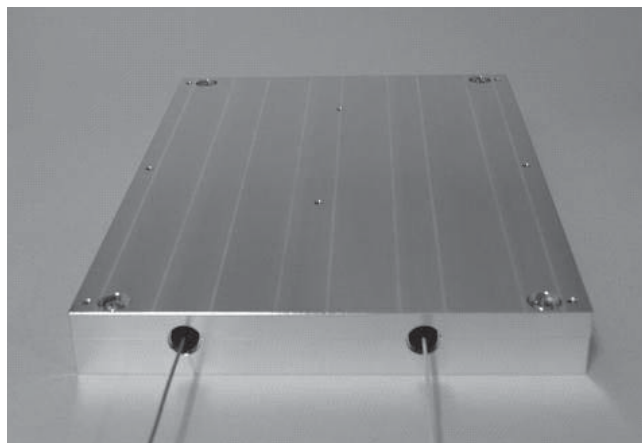


図1 光トランスポンダの外観
Fig. 1. Appearance of optical transponder.

た入れ子構造を持つ⁷⁾。パルスカーバは振幅変調用のLN変調器と同じものである。

電気信号のインタフェースはSFI-5⁸⁾に準拠しており、2.5 Gbit/s × 16の平行接続となる。2.5 Gbit/s × 16の電気信号が300 pinコネクタを経由して入力され、16:2マルチプレクサ(MUX)で20 Gbit/sのシリアル

信号2本(IchとQch)に多重される。その後ドライバアンプでそれぞれ増幅され、IQ変調器に入力されて光変調を行う。ここで連続光が4値に位相変調され、NRZ-DQPSK信号に変換される。一方、MUXから出力された20 GHzのクロック信号は、ドライバアンプで増幅され、パルスカーバに入力される。ここでNRZ-DQPSK信号が、デューティ比50%のRZ-DQPSK信号に変換される。RZ信号に変換することで、光雑音耐力を改善することができる⁹⁾。

オプションとして、SOAを内蔵し、光出力パワーを増幅することが可能である。外付けのEDFAが不要になるため、省スペース化、低コスト化のメリットがある。SOAの後段にはアイソレータを設け、逆入光の影響を阻止している。その後段にはモニタPDを設け、光出力の安定化をはかっている。

受信信号は、まず遅延干渉計に入力される。信号は内部で二分岐され、Ich用、Qch用の二つの遅延干渉計に入力される。それぞれの遅延干渉計では1シンボル遅延させて干渉させることで、位相変調信号を振幅変調信号に変換する。遅延干渉計の出力はバランスドレシーバに接続され、ここで電気変換に変換される。次にCDR+2:16デマルチプレクサに入力され、クロック抽出、識別

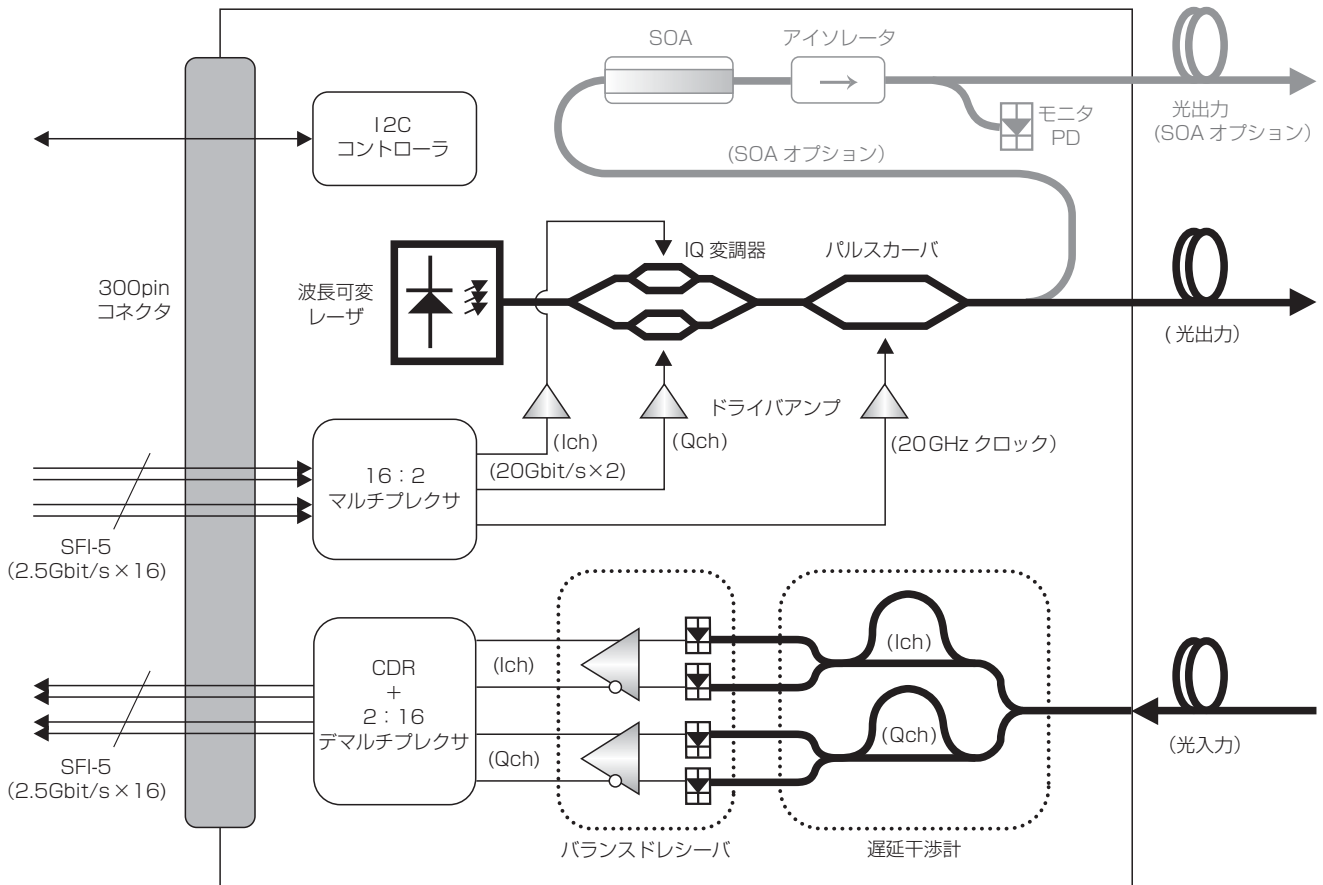


図 2 光トランスポンダのブロック図
Fig. 2. Block diagram of optical transponder.

表 主要諸元
Table. Main specifications.

項目	最小	最大	単位	備考
共通部				
伝送速度	43.02	44.57	Gbit/s	デュアルレート
電源	+5.0, +3.3, -5.2		V	
消費電力	24	28	W	標準仕様
	25	30		SOA オプション
動作温度範囲	-5	70	°C	
サイズ	127 × 177 × 18		mm	
送信部				
光出力パワー	-5	-2	dBm	標準仕様
	4	7		SOA オプション
動作中心波長	1528.773	1563.455	nm	C-band
	1570.416	1607.035		L-band
波長間隔	約 0.4		nm	50 GHz
波長確度	-25	25	pm	
受信部				
光入力パワー	0	8	dBm	
波長分散耐力	-100	100	ps/nm	1 dB ベナルティ
DGD 耐力	-	20	ps	1 dB ベナルティ

再生が行われる。識別再生された 20 Gbit/s × 2 の受信データは 2.5 Gbit/s × 16 の平行信号に変換され、300pin コネクタを経由して出力される。

リモートコントロール用に、I2C 通信機能を内蔵しており、波長の切りかえをはじめ、各種設定、アラームの読み取り、アナログモニタの読み取りなどが可能になっている。

2. 3 主要諸元

主要諸元を表に示す。光出力パワーは標準仕様では -5 ~ -2 dBm であるが、SOA 搭載オプションの場合は 4 ~ 7 dBm まで増幅することができる。

3. 特性

3. 1 送信波形

送信波形 (アイパターン) を図 3 に示す。アイパターンは光強度の遷移を重ねて表示したものであるため、位相情報は観察できない。RZ-DQPSK 信号の場合はパルスカーバの包絡線が正弦波状に観察されることになり、語源である「目」の形には見えないが、ここでは便宜上アイパターンと呼ぶことにする。

図 3 では、波長、温度をパラメータに、合計 9 つのアイパターンを示している。性能判断の尺度としては、ト

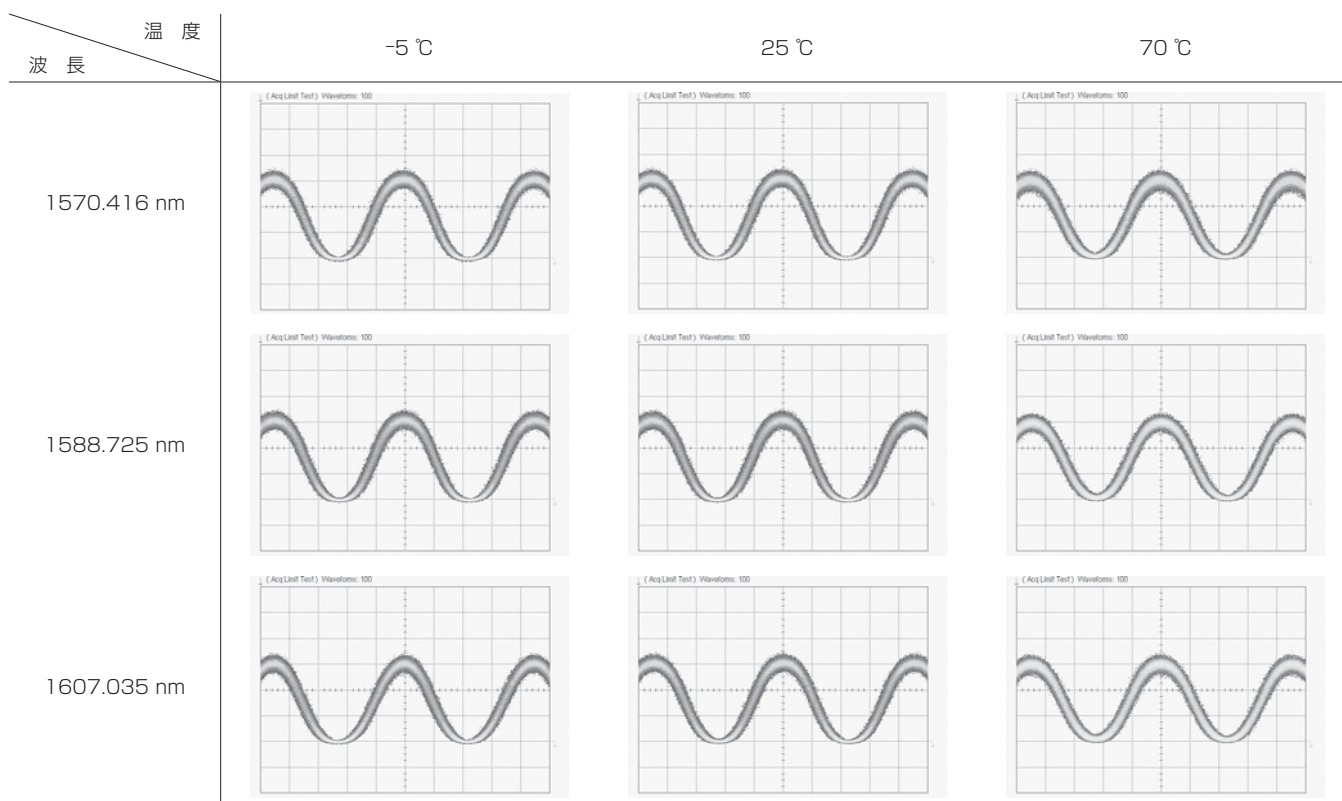


図3 送信波形
Fig. 3. Eye patterns.

測定条件
・ 44.6 Gbit/s
・ PRBS 2³¹-1

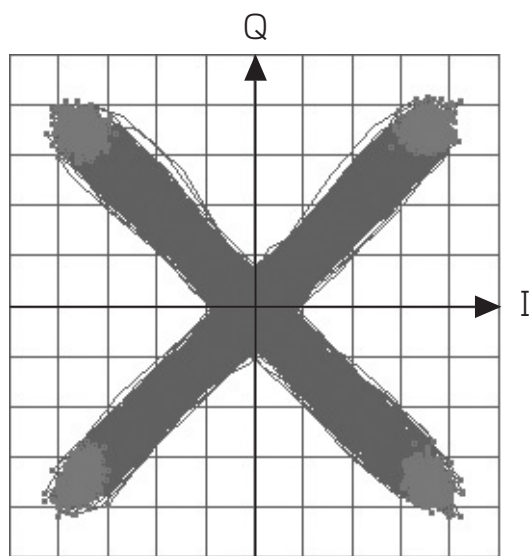


図4 コンスタレーション
Fig. 4. Constellation.

て測定したコンスタレーションを図4に示す。コンスタレーションとは、光の振幅と位相を極座標で表示したものである。4値の位相状態はそれぞれ狭い領域に収斂しており、直交性も良いため、適切に位相変調が行われていることが確認できる。

3.2 光雑音耐力

光雑音耐力を図5に示す。長波側ほど特性が不利になるため、波長を1607.035 nmに設定してデータを取得し、OSNR = 13 dB, OSNR = 16 dBにおける誤り率をそれぞれプロットした。光入力パワーが0~8 dBmまでフラットな特性が得られており、温度依存性も十分小さいことを確認している。

3.3 分散耐力

波長分散に対する耐力を図6に、PMDを非統計的に評価する指標であるDGDに対する耐力を図7に、それぞれ示す。誤り率が10⁻³になるOSNR値を、実測およびシミュレーションで取得した。実測値は環境温度25℃、光入力パワー5 dBmにおける測定値を代表値としてプロットしたものであるが、シミュレーションと良く一致しており、設計通りの性能が得られている。

3.4 内蔵SOAによる光出力信号の増幅

図2のブロック図で示したように、RZ-DQPSK信号を生成するには光変調器を2段直列に接続する必要があるため、光出力パワーは-5~-2 dBmと弱くなってしまふ。WDMシステムにおいて、光トランスポンダに要

レースの細さがあげられるが、いずれの条件においても十分細く、良好なアイパターンが得られている。また、波長依存性、温度依存性は小さく抑えられており、均一なアイパターンが得られている。

位相情報を評価するため、位相変調アナライザを用い

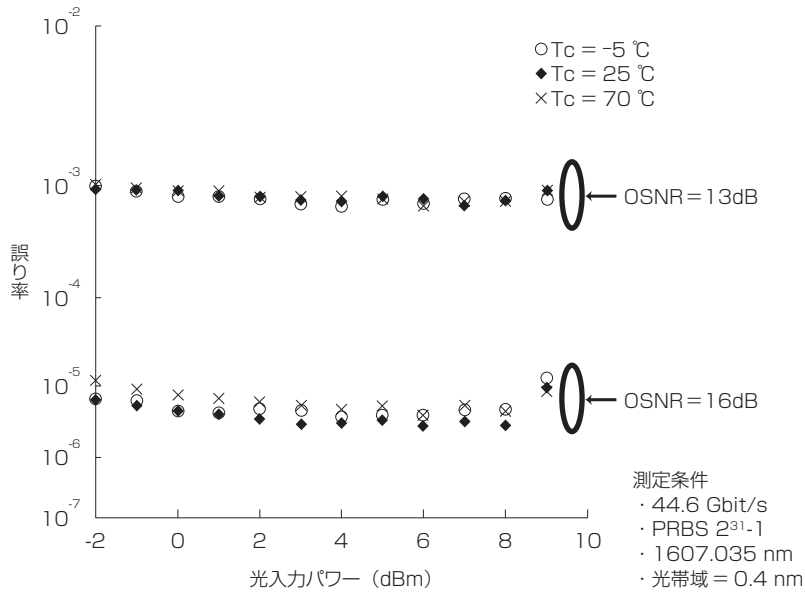


図5 光雑音耐力
Fig. 5. OSNR tolerance.

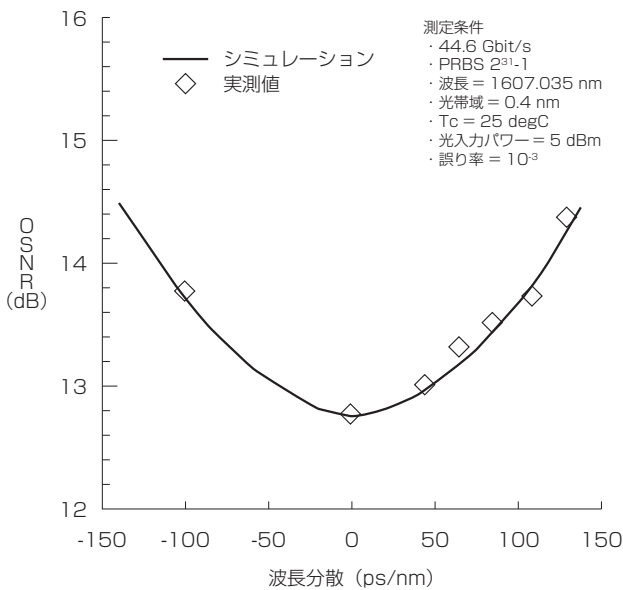


図6 波長分散耐力
Fig. 6. Chromatic dispersion tolerance.

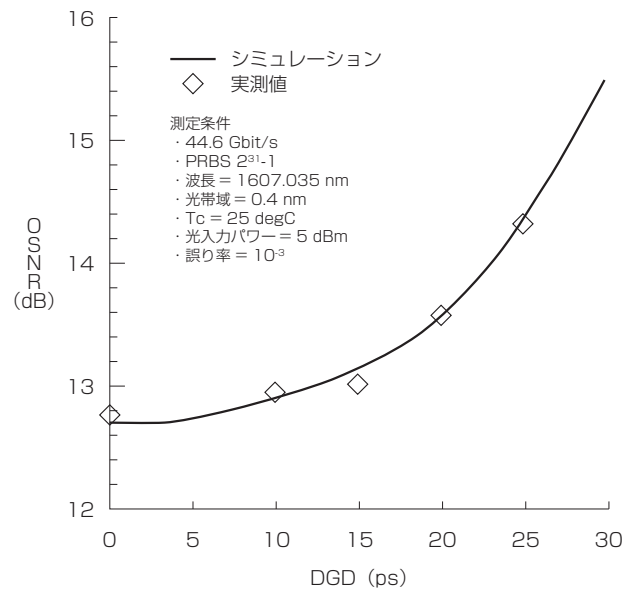


図7 DGD 耐力
Fig. 7. DGD tolerance.

求される光出力パワーは 0 ~ 5 dBm 程度であるため、外付けの EDFA を用いて増幅する構成となり、実装スペースの拡大、コスト増大などの課題があった。EDFA を光トランスポンダに内蔵する試みも考えられるが、L-band 向けは EDF (エルビウム添加ファイバ) が長くなるために小型化が困難で、C-band 向けにかぎられていた。

SOA は EDFA に比べて、小型、低消費電力、広帯域などの利点があるが、応答速度が ns オーダーと高速な

ため、NRZ などの振幅変調信号を飽和領域で増幅するとパターン効果が発生する欠点がある。ここでのパターン効果とは、ビット「1」が続いたときに SOA の励起キャリアが枯渇し、ゲインが徐々に低下していく現象のことである。図 8 (a) は 11.1 Gbit/s の NRZ 信号を SOA で増幅した場合のアイパターンを、SOA の入力パワーをパラメータとして並べたものである。SOA の入力パワーが上がるにつれて飽和領域での動作となり、パターン効果のために出力波形は劣化していく。よって、これまで

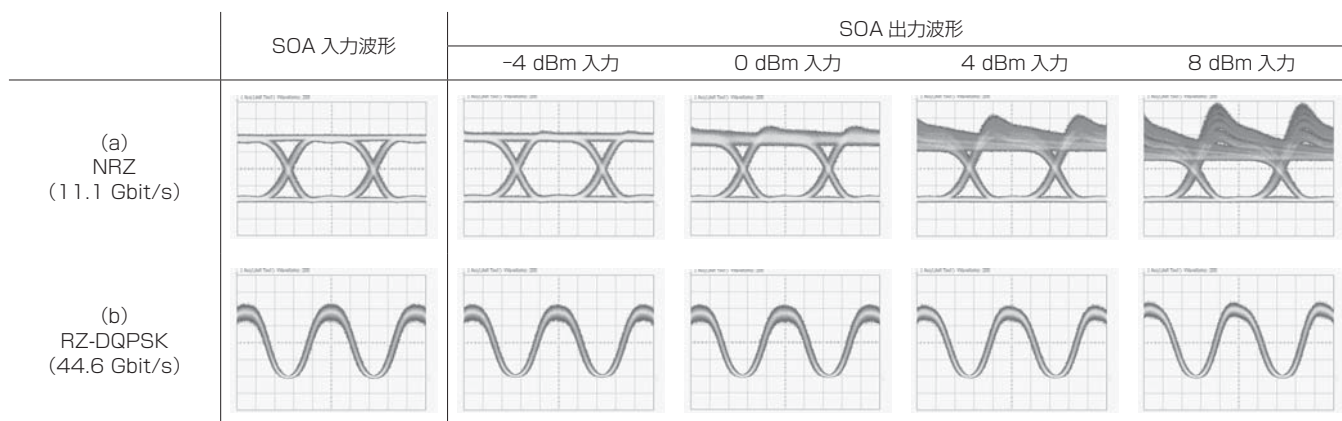


図8 SOA の飽和特性
Fig. 8. Saturation Characteristics of SOA.

SOA の用途は連続光の増幅用（アレー型 Tunable LD など）、線形領域での使用（受信側のプリアンプなど）にかぎられており、送信信号の増幅用としては適さないとされていた。

一方、RZ-DQPSK は位相変調信号であるため、NRZ のようにビット「1」が続くことがなく、SOA のパターン効果はほとんど現れない。図8(b)に同じ要領で測定したSOA の出力波形を示すが、極端な飽和領域においても出力波形の劣化が小さいことが確認できる。

SOA のもう一つの欠点である雑音指数の大きさに関しては、本トランスポンダにおけるSOA 入力パワーが-5 dBm 以上であるため、OSNR > 40 dB を確保でき、実用上問題ない。また、チャープの発生は小さく、伝送特性への影響もないことを確認している。

4. む す び

当社で開発した多値位相変調方式を用いた40 Gbit/s 光トランスポンダについて、機能、特性の詳細を紹介した。基幹系のシステムは10 Gbit/s から40 Gbit/s へと移行していくことが予想されるが、40 Gbit/s のトランスポンダは相対的に高価であるため、今後は低コスト化への取り組みを進めていく。また、DQPSK は100 Gbit/s の変調方式としても有力視されており、本開発で培った要素技術をベースに100 Gbit/s へ向けた開発を推進していく予定である。

参 考 文 献

- 1) 総務省：「我が国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握」, http://www.soumu.go.jp/main_content/000080807.pdf
- 2) 松田ほか：「東名阪基幹伝送路に導入した40G-DWDM システムの開発」, NTT 技術ジャーナル, Vol.20 No.4, pp.58-61, 2008
- 3) <http://300pinmsa.org/>
- 4) 藤咲ほか：「10Gbit/s 小型トランスポンダの開発」, 沖テクニカルレビュー, 第197号, pp.106-109, 2004
- 5) 藤咲ほか：「10Gbit/s フルバンドチューナブル光トランスポンダ」, フジクラ技報, 第111号, pp.16-19, 2006
- 6) Y. Fujisaku, et. al. : "A 10-Gbit/s Full-Band Tunable Optical Transponder", Fujikura Technical Review, No.36, pp.15-17, 2007
- 7) 及川ほか：「40Gbps DQPSK 変調用 LiNbO₃ 光変調器の開発」, 住友大阪セメント Technical Report 2008, pp.10-15, 2008
- 8) <http://www.oiforum.com/public/documents/OIF-SFI5-01.0.pdf>
- 9) Peter J. Winzer, et. al. : "Advanced Modulation Formats for High-Capacity Optical Transport Networks", Journal of Lightwave Technology, Vol.24, No.12, pp.4711-4728, 2006