

# 長距離光伝送システム向け 43 Gbps RZ-DQPSK トランスポンダ

## 43-Gbps RZ-DQPSK Transponder for Long-Haul Optical Transmission System

太田 篤 伸<sup>\*1</sup> 谷村 大 輔<sup>\*1</sup>  
 OHTA Atsunobu TANIMURA Daisuke  
 客野 智 彦<sup>\*1</sup> 飯尾 晋 司<sup>\*2</sup>  
 KYAKUNO Tomohiko IIO Shinji

世界で初めて43 Gbps RZ-DQPSK (Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying)変復調方式を採用した、高性能トランスポンダサブシステムを実用化した。既に、国内の大手通信キャリアにて稼動する基幹回線用の伝送装置向けに、商用機として300台以上を評価・生産し出荷した。本トランスポンダサブシステムは、国際標準OTN(Optical Transport Network)に準拠した大容量光ネットワークへの適用が可能であり、誤り訂正機能を有するOTN フレーマと組み合わせることにより、1波長当たり43 Gbps以上の動作速度で高品質データを伝送する高密度波長多重(DWDM:Dense Wavelength Division Multiplexing)光伝送システムの実現を可能にする。本稿では、43 Gbps RZ-DQPSK トランスポンダサブシステムの特徴、構成及び性能について報告する。

We have successfully developed a high performance transponder subsystem first in the world by using 43-Gbps RZ-DQPSK (Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying) modulation formats. We have already manufactured, inspected and shipped over three hundred transponder subsystems as a commercial product of optical transmission system to a domestic major telecommunication carrier. Our transponder is applicable to high capacity optical networks which are recommended by international standard OTN (Optical Transport Network) and the combination of our transponder and OTN-framer including Forward Error Correction (FEC) realizes a DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) optical transmission system which operates over 43-Gbps per wavelength channel. This paper reports features, configuration and performance of 43-Gbps RZ-DQPSK transponder subsystem.

### 1. はじめに

従来の10 Gbps伝送システムに代わり40 Gbps以上の光伝送システム構築が求められている。しかしながら、既に敷設したファイバ伝送システムを利用する場合、1ビット幅のパルス間が狭く周波数帯域が広い40 Gbps信号の伝送では、光信号パルスが、中継器アンプで発生・蓄積するASE(Amplified Spontaneous Emission:自然放出光)雑音、波長分散、偏波分散など光アンプやファイバからの影響を受け、従来以上に伝送距離が制限される。そこで、雑音耐力に優れ、波長・偏波分散から受ける信号波形の歪みに強く、従来と同等以上の伝送能力の確保を目的に、差動位相変調方式(DPSK:Differential Phase Shift Keying)、差動4値位相変調方式(DQPSK:Differential Quadrature

Phase Shift Keying)に加え、受信特性向上を目的にDQPSK符号をRZ(Return to Zero)化したRZ-DQPSK変調方式など、これまでのNRZ(Non Return to Zero)変調方式に代表される光強度をON/OFFする強度変調方式(OOK:On-Off Keying)とは異なり、光の位相を変調することで情報伝達を行う新しい変復調方式が検討されている。

表1 43 Gbps 変調方式の特性比較

変調方式	NRZ	RZ-DPSK	RZ-DQPSK
信号点配置 I: In-Phase (同相成分) Q: Quadrature-Phase (直交位相成分)			
Symbol Rate	43 Gbps	43 Gbps	21.5 Gbps
変調光スペクトル例 (Simulation)			

\*1 フォトニクス事業部 開発センター回路実装設計Gr.

\*2 フォトニクス事業部 第1技術部

表2 RZ-DQPSK 変調方式の主な特徴

RZ-DQPSKの特徴	優位性及び特性等
占有するスペクトル幅が小さい	・ 周波数利用効率を高くできる。 ・ 波形歪に対する影響が小さく、波長分散等に対し高い耐性を持つ。
4値の位相変化点それぞれへ2ビット割り当て	・ 送受信するビットレートに対し1/2の速度で変調及び復調動作を行う。 ・ パルス間隔が広く波形歪に強い。
変復調方式が複雑	・ 送信部では、プリロード機能と位相変調機能を含むDQPSKエンコーダが必要。 ・ 受信部では、位相情報から強度情報、光から電気への変換及び復調の機能が必要。

このような背景の下、当社は、1波長当たり43 Gbpsとする長距離 DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) の伝送システム実現に寄与し、さまざまな技術課題を克服する手段として43 Gbps RZ-DQPSK 変復調方式を採用したトランスポンダサブシステム (以下、トランスポンダと略称) を開発、製品化したので、その特徴、構成及び性能について報告する。

## 2. RZ-DQPSK 変調方式の特徴

表1に、43 Gbps変調方式の代表的な例について、特性比較を示す。RZ-DQPSK 変調方式はRZ-DPSK 方式やOn-Off Keyingと比較して、占有スペクトル幅が小さく、1ビット幅のパルス間隔を広くすることができるため、高密度波長多重や長距離の伝送システムに適した伝送方式である。また、電気的な高速動作の負担低減が可能なることから光送信部や受信部で用いる駆動、増幅機能を目的とする高周波集積回路の実現性・安定性などにおいて優れた利点がある。RZ-DQPSK 変調方式の主な特徴に対する優位性等を、表2に示す。

## 3. トランスポンダの仕様概要

### 3.1 外観とブロック図

図1に、本トランスポンダの外観写真を、図2にブロック図を示す。外形サイズは、320×110×40 mmであり、ブロック図に示すように、送信部、受信部、外部インタフェース部から成る。ケースには、装置内での冷却を考慮した放熱フィ

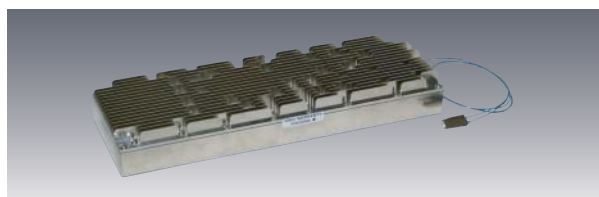


図1 RZ-DQPSK トランスポンダ外観

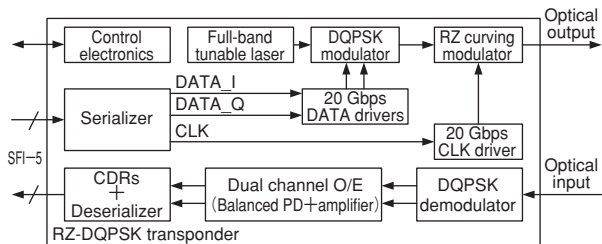


図2 RZ-DQPSK トランスポンダのブロック図

表3 トランスポンダサブシステムの主要諸元

分類	No.	項目	仕様・性能	条件/備考	
全般	1	動作温度範囲	-5C~+70C	ケース温度	
	2	電源電圧	1) +5.0 V, 2) +3.30 V, 3) -5.20 V		
	3	主信号電気インタフェース	300 pin MSA <sup>*1</sup> 準拠		
	4	伝送速度	1) 43.0 Gbps, 2) 44.6 Gbps	マーク率50%	
	5	外形サイズ	320×110×40 mm		
	6	重量	2.5 kg		
	7	消費電力	38 W		
	8	光出力パワー	-8 dBm		
	送信部	9	波長可変範囲	1) 1528.77~1563.45 nm 2) 1570.42~1607.04 nm	50 GHz ITU <sup>*2</sup> -Grid準拠
		10	波長設定安定度	≤ +/-20 pm	
		11	RZ変調消光比	>13 dB	
		12	光スペクトラム幅	≤0.4 nm	3 dB帯域
		13	受信波長範囲	1) 1528.77~1563.45 nm 2) 1570.42~1607.04 nm	50 GHz ITU <sup>*2</sup> -Grid準拠
受信部	14	受光パワー	+4 dBm		
	15	最小受光感度	-4 dBm	誤り率≤1×10 <sup>-12</sup>	
	16	光Return Loss	≥30 dB		
	17	波長分散耐性	≥±100 ps/nm	≤2 dB Q値penalty	
	18	DGD耐性	≥20 ps	≤2.5 dB OSNR penalty	

\*1: Multi Source Agreement <sup>TM</sup> \*2: International Telecommunication Union

ンが取り付けられている。放熱フィンの設計は、実稼動時の風量や方向に対し、熱計算モデルを用いて最適化されている。ケース材料には、アルミニウム合金を使用した。

### 3.2 トランスポンダの主要な仕様

本トランスポンダの主要諸元を、表3に示す。全般諸元中の伝送速度については、SDH (Synchronous Digital Hierarchy) /SONET (Synchronous Optical NETwork) に対応するための43.0 Gbpsだけでなく、クライアント側にて4×10 GbE-LANPHY (Ethernetの物理層規格) にも対応することを前提に44.6 Gbps動作も可能とした。送・受信部の波長範囲としては、LもしくはCバンドのどちらかの波長帯を選択する。

受信特性としては、入力主信号にASE雑音を重畳させた光SNR (OSNR : Optical Signal to Noise Ratio) による誤り率 (BER : Bit Error Rate) 劣化特性が基本であり、一定のファイバ伝送距離に相当する波長分散量やDGD量 (Differential Group Delay : ファイバ内にて、直交する偏波間で発生した伝播時間差) などの波形歪の起因となるパラメータを用いて測定されたOSNRペナルティや、BERを変換したQ値ペナルティが重要な性能指標である。

### 3.3 長距離 DWDM 伝送装置への組み込み例

図3に、本トランスポンダを組み込んだ長距離 DWDM システム伝送装置の構成例を示す。

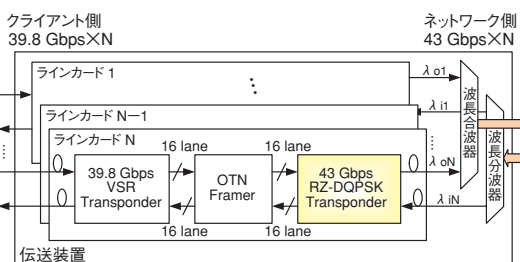


図3 長距離 DWDM システム用の伝送装置構成例

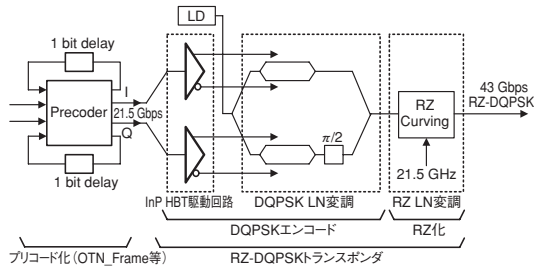


図4 RZ-DQPSK 変調符号生成部

クライアント側では、SDH/SONETに準拠した39.8 Gbps NRZ 光信号が光クロス接続(OXC)や光ルーター等により経路が切り替えられ、装置内部のラインカードと接続される。ネットワーク側では、ラインカード毎に割り当てられた波長に対し、43 Gbps RZ-DQPSK符号化されたデータを、波長合波器を用いて波長多重、あるいは波長分波器を用いて波長毎に分離し、長距離(数100 km)の送受信を行う。

ラインカードには、VSR(Very Short Reach)トランスポンダやクライアント信号のOTN準拠フレームフォーマットへのマッピング、誤り訂正、監視データ検出処理などを行うためのOTNフレームが搭載される。各トランスポンダとOTNフレーム間は、SFI-5(Serdes Framer Interface Level 5)<sup>①</sup>に準拠した2.5 Gbpsまたは2.7 Gbpsの16レーンのパラレル信号により接続される。

#### 4. トランスポンダサブシステムの設計

##### 4.1 送信部

送信部の光源としては、制御回路が集積化されたCバンドもしくはLバンドのFull-band Tunable Laserを用いており、波長間隔50 GHz(0.4 nm)で運用した場合、最大88波の波長可変が可能である。

RZ-DQPSK符号生成用としては、2種類のLN(Lithium Niobate: LiNbO<sub>3</sub>)変調器を搭載している。図4に、LN変調器を用いたRZ-DQPSK変調符号生成部のブロック図を示す。DQPSKエンコード用のLN変調器は、I、Q(In-phase, Quadrature-phase)データとしてDQPSK符号用にOTNフレーム等によってプリコード化された2組の21.5 Gbps信号により駆動され、43 Gbps DQPSK信号を生成(エンコード)する。さらに、RZ変調用のLN変調器を用いることにより、Duty 50%にRZ化したDQPSK変調符号を光信号として出力する。

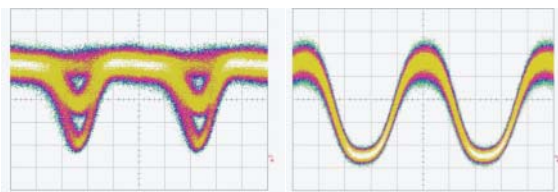


図5 43 Gbps DQPSK 光波形

図6 RZ-DQPSK 光波形

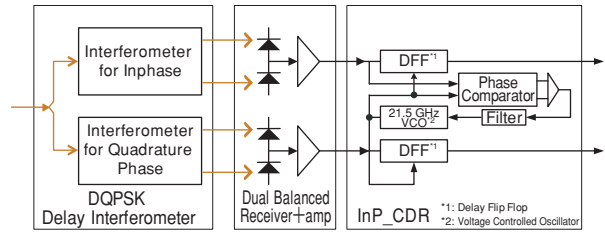


図7 受信フロントエンド部

LN変調器駆動用のデバイスには、当社コアコンピタンスである化合物半導体技術InP-HBT(Indium Phosphide Heterojunction Bipolar Transistors)プロセス( $f_T = 120$  GHz,  $f_{max} = 180$  GHz)を用いて製造されたリタイミング機能付き駆動回路を用いた。同回路は、3.8 V<sub>pp</sub>の4 port出力駆動能力を有する。図5、図6に、43 Gbps DQPSK光波形とRZ-DQPSK光波形を示す。

##### 4.2 受信部

受信部では、DQPSK復調用の遅延干渉計(DQPSK Delay Interferometer)や増幅回路を含んだ2組のバランスドレシーバを用いて、DQPSKデコードと等価増幅動作を実現している。図7に、受信フロントエンド部のブロック図を示す。

受信フロントエンド部に入力したRZ-DQPSK変調符号の光信号は、Iデータ復調用とQデータ復調用として3 dB分岐し、それぞれ干渉計に入力する。分岐した信号は、それぞれ1ビット(約47 ps)遅延させ、干渉させる。Iデータ用干渉計とQデータ用干渉計とでは、90°位相がずれた干渉特性を持たせてあり、PIN-PD(Photo Diode)と増幅回路を含む2組のバランスドレシーバにより、プリコード前のデータに復調する。復調した21.5 Gbps×2 portの信号に対して、クロック・データ・リカバリー回路(CDR: Clock Data Recovery)を用いてクロック抽出及び識別再生機能を実現している。

なお、PDは自社InPプロセスで製造しており、広帯域(≧40 GHz)な動作が可能で、フルバンドに対応した波長範囲に対して安定した高感度(≧0.7 A/W)を有する受信性能を特長とする。干渉計とバランスドレシーバ間は、90%以上の結合効率を得ている。増幅回路やCDR回路には、前述のInP-HBTプロセスを用いて製造した集積回路を使用している。

図8、図9に、それぞれバランスドレシーバとCDRの21.5 Gbps動作時の出力波形例を示す。

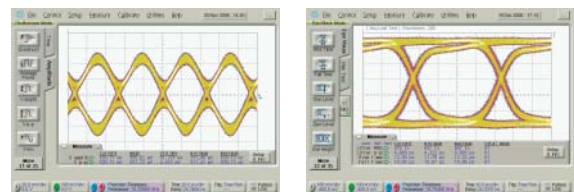


図8 バランスドレシーバ出力波形例

図9 CDR 出力波形例

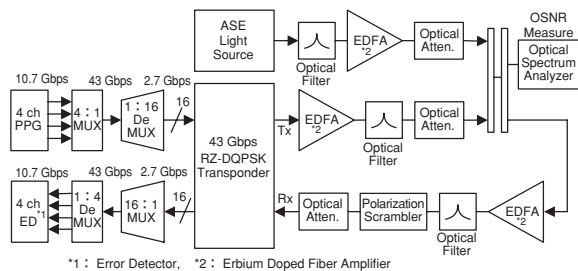


図 10 ASE 雑音耐力の評価系

4.3 外部インタフェース部

トランスポンダ外部との電気インタフェースはSFI-5に準拠しており、業界標準(300 pin MSA: Multi Source Agreement) (2) の 300 ピンコネクタを用いている。

プリコード化された 2.7 Gbps の 16 レーンの電気入力信号は、シリアライザを用いて 21.5 Gbps × 2port まで多重化し、送信部変調器への入力データとする。一方、21.5 Gbps × 2port としてトランスポンダ内部で復調された信号は、デシリアライザを用いて 2.7 Gbps の 16 レーンとして分離し、出力する。

本トランスポンダには、LN変調器や遅延干渉計といった高度で複雑なアルゴリズムを用いて制御する必要がある光デバイスを搭載しており、トランスポンダに搭載したマイクロプロセッサ群を用いて制御及び監視機能を実現している。トランスポンダ内部のアラームや波長設定などのユーザー用のインタフェースは、PC(シリアルインタフェース)通信により監視や設定が可能であり、操作コマンドは 300 pin MSA 仕様準拠している。

5. 性能評価

5.1 評価系

図10に、トランスポンダのASE雑音耐力に対する評価系を示す。RZ-DQPSK変調された主信号出力(Tx)に対し、2×2の光カップラを用いて、ASE雑音の重畳、光スペクトラムアナライザを用いた OSNR 値の設定、受信(Rx)側へのループバックを構築している。さらに、受信側(Rx)の直前に狭帯域光バンドパスフィルタ(BW ≧ 60 GHz)や偏波スクランブラ(Polarization scrambler)を用いて、実運用状態に近い条件で性能評価した。

波長分散や偏波分散を起因とした信号波形の歪に対する耐

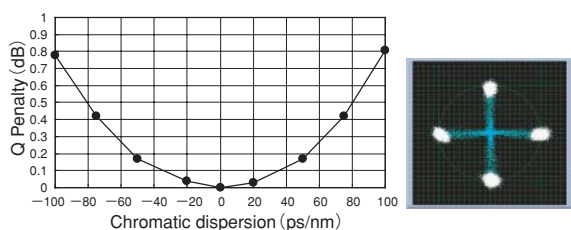


図 11 分散耐力の測定結果      図 12 コンスタレーション例

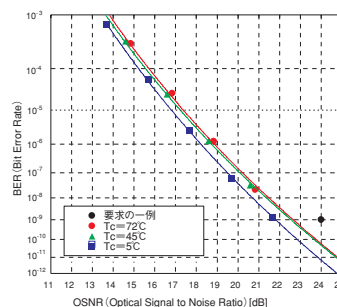


図 13 ASE 雑音耐力性能(0.1 nm Res.)

力性能は、この評価系の信号光経路へ可変波長分散器や DGD 素子を適切に挿入し、評価を実施した。

5.2 送信性能評価結果

図11に、波長分散に対する耐力性能結果を示す。100 ps/nm の分散量に対し、ペナルティは1 dB以下であり、良好な特性が得られた。また、送信性能として、正負の波長分散に対し優れた対称性を持つこと、さらに、本トランスポンダが出力する光スペクトルの占有幅が0.3 nm 以下と十分に小さいことを確認した。

また、図 12 の位相変調アナライザを用いたコンスタレーション特性に示すように、I と Q が、極めて優れた直交特性を有していることが確認できた。

5.3 受信性能評価結果

図13に、ASE雑音耐力性能を示す。ASE雑音耐力は、本体ケース温度(Tc)に対して依存性が十分小さいことを確認した。また、近年議論されている40 Gbpsシステムに要求される OSNR = 24 dB (@BER = 1 × 10<sup>-9</sup>) (3) を一例として比較した場合でも、一定の性能余裕を確認できた。

上記5.2章も含め、送受信評価を通じて、RZ-DQPSK変調方式の実用性・有効性を確認した。

6. おわりに

InPを中心とする半導体製造・設計技術、光学設計・実装技術、光デバイス制御技術、光伝送評価技術など、これまで当社で培った多くの要素技術を駆使することで、世界に先駆けて本トランスポンダサブシステムの開発・製品化を成功させた。

本成果は、1波長当たり 100 Gbps を超える将来のフォトニックネットワーク向け超 100 Gbps RZ-DQPSK Transponder の開発へ、展開する予定である。

参考文献

- (1) OIF-SFI-5-01.0 (<http://www.oiform.com/>)
- (2) REFERENCE DOCUMENT FOR 300PIN 40Gb TRANSPONDER (<http://www.300pinmsa.org/>)
- (3) Greg Raybon et al., OFC/NFOEC2008, OTuG1