

光海底ケーブルシステムを支える 大容量長距離光伝送技術

井上 貴則

要 旨

グローバルネットワークの根幹を担う海底ケーブルシステムでは、Tbpsクラスの大容量伝送と太平洋横断クラスの長距離伝送を、高い伝送品質で実現しなければなりません。本稿では、大容量長距離伝送を実現するための技術を解説するとともに、NECの取り組みを紹介します。

キーワード

●分散マネジメントファイバ ●RZ-DPSK ●RZ-DQPSK ●40Gbpsシステム ●伝送実験

1. はじめに

大洋横断に適用される光海底ケーブルシステムは、光直接増幅技術を始め、光ファイバ伝送路設計技術、高感度光変調復調技術、高密度波長多重技術などの多くの技術の適用により、現在では1ファイバ当たり1Tbpsを超える大容量伝送を実用化しています。また、更なる大容量化に向けて、現在主流の10Gbpsをベースとした波長多重伝送方式に加えて、40Gbps方式の導入が期待されています。本稿では、光海底ケーブルシステムを支える大容量長距離光伝送技術に対するNECの取り組みについて紹介します。

2. 10Gbps波長多重伝送方式

現在の光海底ケーブルシステムで主流となっている10Gbps波長多重伝送方式における主要な技術を解説するとともに、これら技術を適用した超長距離大容量伝送特性例について紹介します。

2.1 広帯域低雑音光直接増幅技術

光信号は光ファイバの損失による減衰と、一定間隔で設けられた光海底中継器による増幅を繰り返しながら伝送路中を伝播しています。光海底ケーブルシステムの大容量化では、より多くの信号を波長多重できるように、光海底中継器の信号帯域拡大とフラットな利得特性が求められます。また長距離伝送では多段に接続された光海底中継器から発生する雑音が累積するため、光海底中継器の雑音指数を低く抑え、より

高い受信OSNR (Optical Signal to Noise Ratio) を達成することも重要です。

NECの光海底中継器は、36nm以上の広帯域にわたりフラットな利得特性を持ち、4.5dB以下の低雑音指数を有する大容量長距離伝送に適した広帯域低雑音光直接増幅機能を提供します。

2.2 超高密度波長多重技術及び高利得符号誤り訂正技術

光海底ケーブルシステムの大容量化を図るためにには、隣接する信号波長の間隔を狭くすることによって信号帯域内により多くの信号を配置すること、及び光信号の波形劣化やOSNR劣化に起因する符号誤りを訂正する符号誤り訂正機能 (FEC : Forward Error Correction) の高利得化が重要です。

NECの光海底端局装置は33.3GHz波長間隔及び25GHz波長間隔での超高密度波長多重が可能であり、かつ 3.3×10^{-3} の符号誤り率 (BER : Bit Error Rate) を 1×10^{-12} 以下のエラーフリー信号に訂正することが可能な高利得FECを有しています。

2.3 分散マネジメント伝送路技術

長距離光伝送における波形劣化の主要因である波長分散及び非線形光学効果による複合作用を軽減するためには、局所的な波長分散を持たせつつ、システム全体では波長分散を小さくするように伝送路を設計することが有効です。また高密度波長多重技術の導入に伴う信号帯域拡大に対応するため、波長分散スロープを極限まで低下させ、信号帯域全体にわたってフラットな分散特性を実現することが重要です。NEC

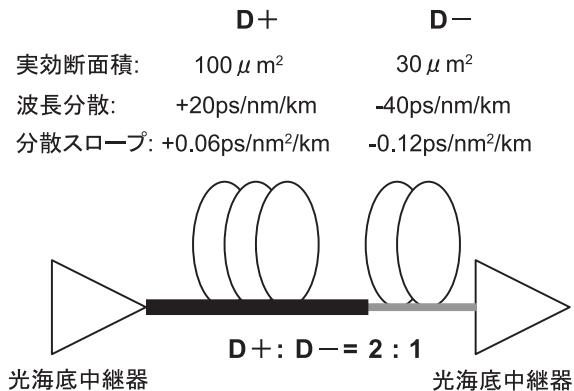


図1 分散マネジメントファイバ構成例

ではこれらの要求を満たすため、2つの異なる特性をもつ光ファイバを用いた分散マネジメントファイバ（DMF：Dispersion Managed Fiber）を長距離光海底ケーブルシステムに適用しています。

図1に分散マネジメントファイバを用いた中継スパン構成例を示します。分散マネジメントファイバは正の分散値と分散スロープを持つ正分散ファイバ（以下、D+と表記）と、D+ファイバとは逆符号かつ約2倍の波長分散と分散スロープを有する負分散ファイバ（以下、D-と表記）から構成されており、D+ファイバの長さとD-ファイバの長さを2:1とすることでシステム全体の波長分散と分散スロープをほぼゼロにすることが可能です。また、信号強度が大きい光海底中継器の直後に実効断面積が拡大されたD+ファイバを、信号強度が減衰する後半に実効断面積の小さなD-ファイバを接続することで非線形効果の影響を軽減しています。

2.4 高感度RZ-DPSK変調方式

光海底中継器を多段接続する長距離伝送においては受信OSNRが低い条件下でも十分な伝送特性が得られるように、より高い雑音耐力が求められます。従来の光海底ケーブルシステムに適用されている光送受信機の変調方式としては、NRZ（Non-Return-to-Zero）、RZ（Return-to-Zero）などの光強度情報を用いたOOK（On-Off Keying）変調方式が一般的です。近年これに加えて、光の位相情報を用いたRZ-DPSK（Return-to-Zero Differential Phase Shift Keying）変調方式の実用化が進められています。

RZ-DPSK変調方式は、送信側では送信するデータを位相差情報として重複し、受信側では光信号を1ビット遅延干渉後、バランス受信器で差動受光することによって位相情報を2倍の信号振幅をもつ電気信号に変換してデータ列を復調させる方式です。そのため、RZ-DPSK変調方式は従来のRZ変調方式に対して、約3dB高い受信感度特性を得ることができます。これにより、光海底中継器の多段接続による受信OSNR劣化を実効的に3dB改善することができることになり中継器間隔一定の条件においては伝送距離として約2倍の延長が可能となります。更にRZ-DPSK変調方式は従来のRZ変調方式に比べ、非線形効果への耐力に優れており、長距離伝送に適した変調方式といえます。

NECは、10Gbps伝送システムの変調方式として、NRZ、RZ、RZ-DPSKをラインナップし、要求される伝送容量及び伝送距離などに応じて最適な変調方式を適用しています。

2.5 超長距離大容量伝送特性例

NECは上述した主要技術を適用した光送受信機、光増幅器、光ファイバ伝送路を組み合わせた光伝送特性評価系を構築し、さまざまな伝送性能の評価及び検証を行っています。以下に、この光伝送特性評価系を用いた1Tbpsを超える超長距離大容量伝送システムの伝送特性例について紹介します。

図2(a)に、10Gbps-132波（1.32Tbps）の光伝送特性評価系の構成を示します。

送信側では2台のRZ-DPSK変調器を用いて25GHz波長間隔の132波10Gbps RZ-DPSK変調信号を生成し、プリ分散補償用の分散補償ファイバ（DCF：Dispersion Compensation Fiber）を介して伝送路に送出します。伝送路は73kmスパンのDMFファイバ、伝送路内分散補償用ファイバ（DEC：Dispersion Equalization Cable）、出力が+16.4dBm、信号帯域が28nmの光中継器及び利得等価器（BEQ：Block Equalization）から構成される全長1,075kmのループ伝送路を使用しています。伝送路からの受信信号は累積分散を補償するためのDCFを通過後、25GHz De-MUXにより所望の信号波長のみが抽出され、RZ-DPSK復調器に入力されます。

図2(b)に6,450km伝送後のQ値と受信スペクトラムを示します。横軸は信号波長を、縦軸は左端がQ値、右端が受信スペクトラムの光強度を表しています。最もQ値特性の低い信号波長においてもFECによるエラー訂正限界Q値である8.8dBに対し6dB

要素技術及び装置

光海底ケーブルシステムを支える大容量長距離光伝送技術

以上のマージンを有する良好な伝送特性が得られています。

図2(c)は、光送受信機の構成のみを変更し、33GHz波長間隔99波RZ-DPSK信号の9,675km伝送における伝送特性を評価した結果です。最も低いQ値の信号波長においても、FECエラー訂正限界に対し4dB以上のマージンを有しており、太平洋横断

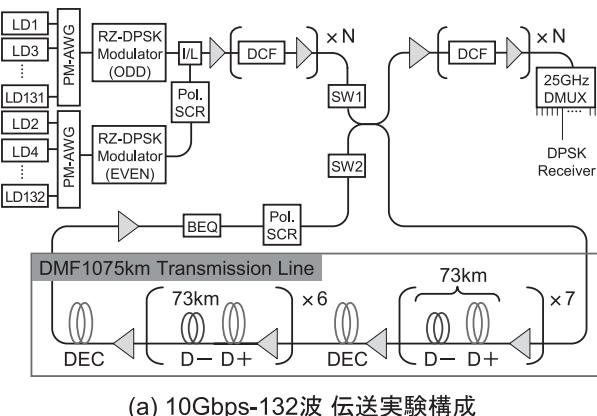
に相当する距離の光海底ケーブルシステムにおいても高品質な大容量伝送が可能です。

3. 40Gbps 波長多重伝送方式

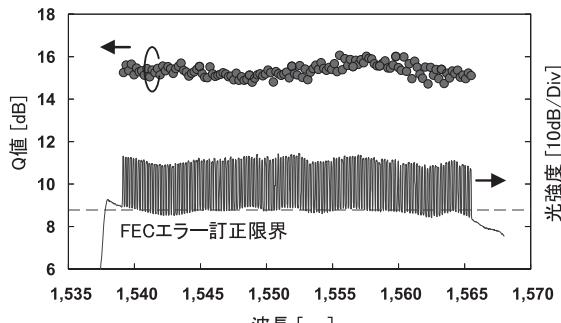
光海底中継器の限られた信号帯域においては多重できる信号波長数に上限が存在するため、更なる伝送容量の増加を図るには信号の高ビットレート化が有効な手段です。近年、陸上通信網において40Gbps伝送システムの普及が進んでおり、光海底ケーブルシステムの分野においても40Gbps伝送システム導入への期待が高まっています。NECはこの市場の期待に応えるため、40G光海底ケーブルシステムの実用化に向け、10Gbps長距離伝送システムで適用されているRZ-DPSK変調方式に加えて、更なる大容量化のためにRZ-DQPSK (Return-to-Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying) 変調方式を適用した40Gbps波長多重伝送方式の開発を行っています。

3.1 RZ-DPSK及びRZ-DQPSK変調方式

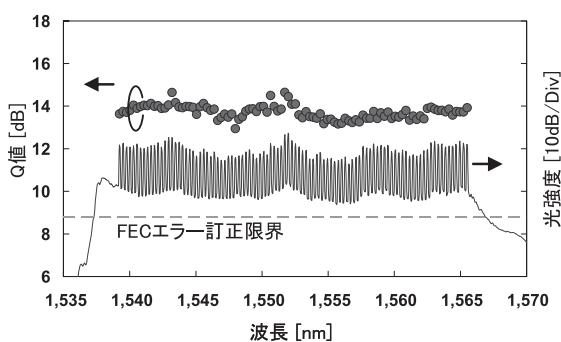
図3にRZ-DPSK変調方式とRZ-DQPSK変調方式のコンスタレーション (複素電界分布) を示します。RZ-DPSK変調方式が情報データを2値の位相情報を重複しているのに対し、RZ-DQPSK変調方式は、 $\pi/2$ シフトした4値の位相情報を重複することで1シンボル当たり2ビットの情報を伝送することが可能であり、ビットレートは40Gbpsでありながらシンボルレートは20Gbpsに抑えられます。25GHzの波長間隔を適用した10Gbps伝送システムと同じ信号帯域を使用すると仮定した場合、シンボルレートが40GbpsであるRZ-DPSK変調方式では波長間隔が100GHzに制限されるため伝送容量は同じになりますが、シンボルレートが半分になるRZ-DQPSK変調方式では、



(a) 10Gbps-132波 伝送実験構成



(b) 10Gbps-132波 6,450km伝送特性



(c) 10Gbps-99波 9,675km伝送特性

図2 10Gbps 132波 6,450km及び99波 9,675km伝送特性例

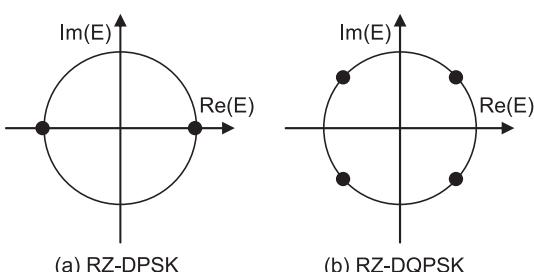


図3 RZ-DPSK / RZ-DQPSK変調信号のコンスタレーション

波長間隔を50GHzまで狭くすることができるため、2倍の伝送容量を達成できます。

3.2 40Gbps RZ-DPSK/RZ-DQPSK変調方式の伝送特性例

RZ-DPSK変調方式とRZ-DQPSK変調方式、それぞれの適用最適化を図るために、長さ4,300kmの伝送路を用いて両変調方式の伝送特性評価を行った結果について紹介します。

図4に100GHz間隔で波長多重された40Gbps RZ-DPSK変調信号と50GHz波長間隔40Gbps RZ-DQPSK変調信号の伝送距離対Q値の特性を示します。横軸は伝送距離、縦軸はQ値を表しています。伝送路には43km中継器間隔のDMFストレート伝送路を使用し、最適な伝送特性を得るためにそれぞれの変調方式でシステムの平均分散値を調整しています。この図からすべての伝送距離においてRZ-DPSK変調信号の方が高い伝送特性が得られていることが分かります。これはRZ-DPSK変調方式がRZ-DQPSK変調方式に比べ、高い非線形耐力と位相雑音による波形劣化に対する耐力を有しているためと考えられます。

図5に4,300km伝送後の両変調方式の長期安定性の測定結果を示します。横軸は測定開始時間を基準とした経過時間、縦軸はQ値を表し、連続取得したQ値をプロットしています。安定性の指標である標準偏差はRZ-DPSK変調信号、RZ-DQPSK変調信号でそれぞれ0.15dB、0.07dBであり、シンボルレートが40GbpsであるRZ-DPSK変調信号の方がわずかに大きな変動を示していますが、両変調方式とも商用システムとしては十分な安定性を有していると考えられます。

以上のように、伝送後のQ値特性の観点ではRZ-DPSK変調方式に、伝送容量の観点では前述したようにRZ-DQPSK変調

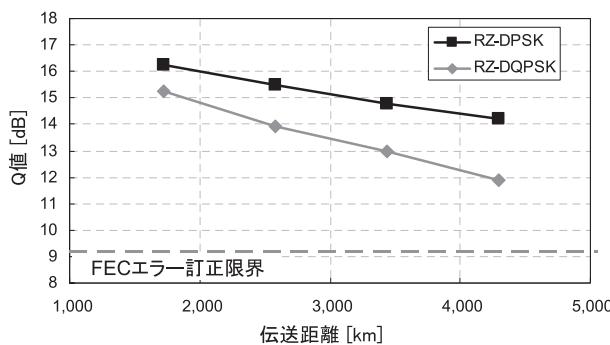


図4 40Gbps信号の伝送距離対Q値

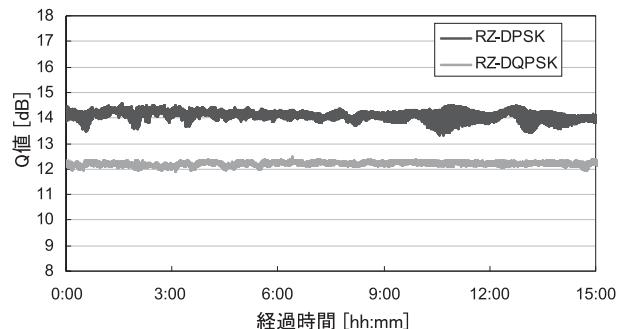


図5 40Gbps信号の4,300km伝送後長期安定性

方に優位性があり、システムごとの要求条件を考慮し、それぞれの変調方式の特徴を生かした最適なシステムの提供を行っていきます。

4. おわりに

NECは10Gbps波長多重方式による伝送容量1Tbps以上の光海底ケーブルシステムを実用化しています。今後、グローバルネットワークの更なる大容量化に向け、40Gbps以上の超高速光伝送技術の実用化開発を進めていきます。

執筆者プロフィール

井上 貴則
ブロードバンドネットワーク事業本部
海洋システム事業部
主任