

デジタル信号処理によるフォトニックネットワークの新たな展開

Next-Generation Photonics Transport Network Using Digital Signal Processing

● 青木泰彦 ● 中島久雄 ● 小田祥一郎 ● Paparao Palacharla

あらまし

100 Gbps級の高速インタフェースの長距離伝送技術として、デジタル信号処理を用いるコヒーレント光ファイバ通信技術の研究開発が活発に行われている。さらなるネットワークの大容量化に向けては、送受信ノード間の伝送距離や必要となる信号速度に応じて、最適な変調方式、信号処理アルゴリズムを適用する適応変調技術を用いることで、周波数利用効率の高い柔軟なフォトニックネットワークの運用が期待されている。このような複数の変調方式、信号処理アルゴリズムを用いるシステムにおいては、実運用時における最適な変復調方式を用いた送受信器間での通信経路の設定や研究開発段階において、各変調方式、信号処理アルゴリズムでの光伝送特性を実環境下に近い条件で模擬して評価することが重要となる。

本稿では、複数の変調方式に対応可能な光送受信器を用いた際のネットワーク容量の効果について、シミュレーション結果によりその有効性を議論する。また、著者らが開発した様々な信号処理アルゴリズム、光伝送特性を評価可能な、FPGAベースの受信器、PMD/PDLエミュレータと周回伝送実験系を統合した伝送評価プラットフォームを紹介し、実環境下での伝送劣化要因を模擬した周回伝送実験系における、112 Gbps偏波多重QPSK信号の伝送特性評価について報告する。

Abstract

Coherent optical fiber transmission system that uses digital signal processing technology is attractive for 100 G and beyond-100 G long-haul transmission systems. One of the key features of such transmission systems is the flexibility of the modulation format, which can be adaptively changed depending on the transmission distance and bit rate between the ingress and egress node. This feature means it can provide higher frequency utilization compared with the conventional fixed-modulation format and bit rate system. To realize such a flexible photonic network, it is essential to assign wavelength paths based on the transmission characteristics of each modulation format and to evaluate the transmission characteristics of signal processing algorithms under a quasi-field environment. In this paper, we first discuss the effects of flexible modulation format transmitters and receivers and the feasibility of such a flexible network. Then, we show an evaluation platform for digital coherent systems that integrates an FPGA-based receiver, PMD/PDL emulators, and a recirculating loop, and which emulates the real conditions in the field to evaluate digital signal algorithms and transmission characteristics.

ま え が き

デジタル信号処理を用いる光通信システムについては、100ギガビットイーサネットなど100 Gbps級高速信号の長距離伝送技術の研究開発が活発に行われている⁽¹⁾。今後、データセンター内で用いられるサーバやネットワーク機器などのI/O高速化に対応するため、光通信システムには、400 Gbps、さらには1 Tbpsへの伝送速度の高速化が必要となると考えられる。そのため、次世代の光伝送システムでは、高速信号に対する伝送距離の長距離化と、システム容量の制限となりつつある光増幅器の増幅帯域を有効に活用する、高い周波数利用効率の両立が大きな課題の一つとなる。上記の課題を克服する手段として、送受信ノード間での伝送距離や、要求されるビットレートに応じて、最適な変調方式、信号処理アルゴリズムを採用する適応変調技術が有望であると考えられる。無線通信などでは既に一部採用されている適応変調技術を、光通信システムに適用する上での課題としては、運用時における光伝送特性を考慮した最適な変復調方式による、送受信ノード間での通信経路、周波数帯域の設定が考えられる。そのため、各変調方式における送受信ノード間での伝送可否判定に用いるシステムパラメータを設計する段階においては、様々な伝送路状態を想定し、実環境下に近い信号劣化要因を模擬した状態で光伝送特性を評価することが、適応変調運用時での伝送品質保証を行う上で重要となる。

本稿では、将来の大規模かつ柔軟なフォトニックネットワークを実現するために、適応変調送受信器を用いたネットワークでのシステム容量拡大に対する効果についてシミュレーションを行い、適応変調技術のフォトニックネットワークへの有効性を検証する。また、著者らが開発した、様々な変調方式、信号処理アルゴリズムを実装して評価することが可能な、FPGA (Field Programmable Gate Array) をベースとしたデジタルコヒーレント受信器⁽²⁾を用いた伝送評価プラットフォーム⁽³⁾について紹介するとともに、伝送劣化要因を模擬した周回伝送実験系における112 Gbps偏波多重QPSK (DP-QPSK: Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying) の伝送特性評価⁽⁴⁾を報告する。

デジタル信号処理を用いる
フォトニックネットワークの構成

現在、広く実用化されている波長多重技術を用いる光通信システムでは、ITU-T勧告G.694.1で規定される50 GHzもしくは100 GHz間隔に配置された周波数グリッドに対して、特定の変調方式、ビットレートの光信号を多重する装置構成となっている。変調方式、ビットレートが固定されていた理由としては、主に光送信器、光受信器内で用いる光部品の特性が、固定のビットレート、変調方式に最適な特性となっているためである。

一方、デジタル信号処理を用いる光通信システムは、送信器側では、DAC (Digital to Analog Converter) を用いて光変調器を駆動し、受信側では、信号光と局発光のビート信号から得られる光電界情報をADC (Analog to Digital Converter) を用いて、デジタル信号に変換後に信号処理、復調を行うことを特徴としている。これにより、送受信器内で用いる光部品を変更することなく、送受信器端でのデジタル信号処理部における信号処理アルゴリズム、パラメータを変更することで、任意の変調方式に対する光信号生成、再生が可能となる。

現在用いられている、固定ビットレート、固定変調方式によるフォトニックネットワークの構成と、伝送距離、通信要求によって、変調方式を可変とする適応変調を用いたフォトニックネットワークの構成例を図-1に示す。100 Gbpsを超える高速信号を効率良く収容するために、複数の変調方式の中から、伝送距離や要求されるビットレートに応じて、送受信器間で最適な変調方式、信号処理アルゴリズムを採用し、それに伴ってチャンネル配置を可変させる適応変調技術が有効な手段となる。適応変調技術により、比較的短距離の通信経路には、変調多値度 (bit/symbol) の高い変調方式を採用することで、周波数利用効率の向上を図り、また、比較的長距離の通信経路においては、多値度の低い変調方式を採用することで、再生中継器を用いることなく送受信ノード間での通信を行うといった、光ファイバ伝送路、装置配置に応じた、柔軟なフォトニックネットワークの運用が可能となる。

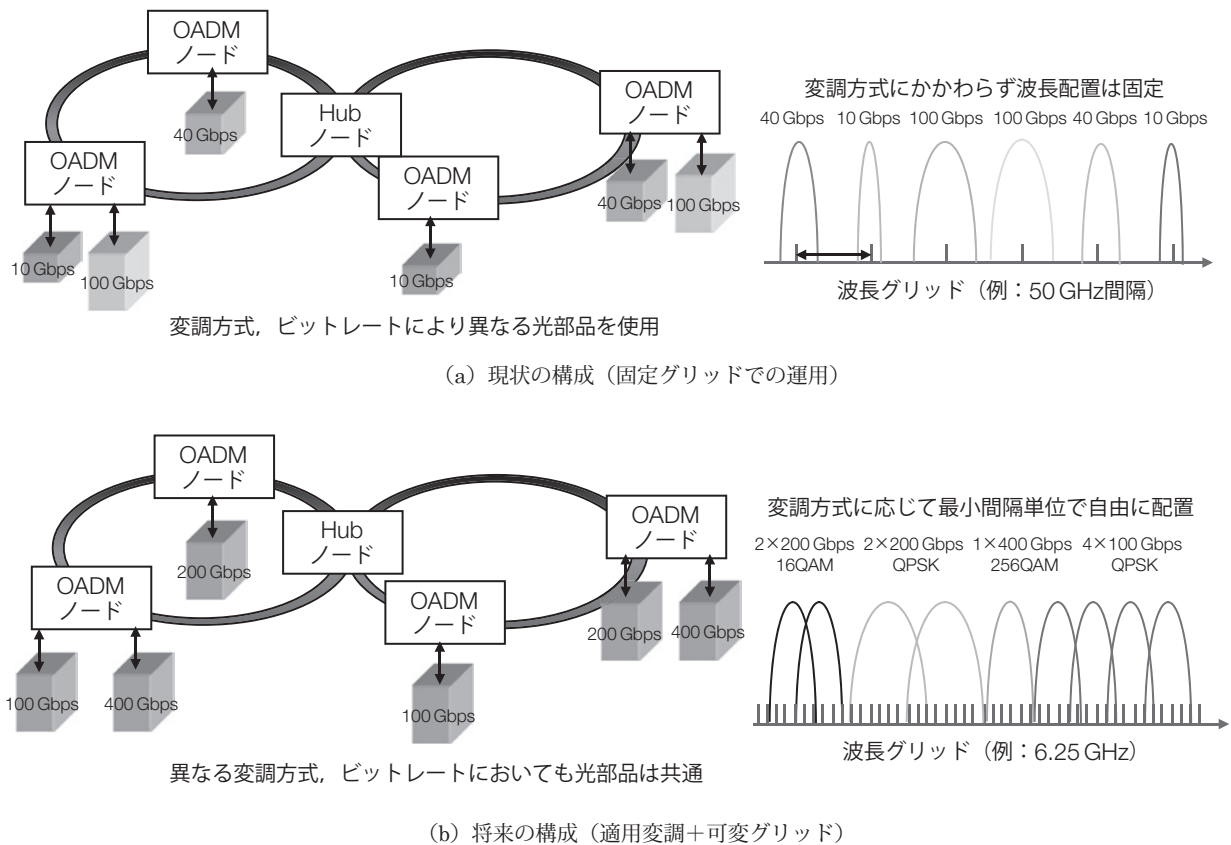


図-1 デジタル信号処理を用いるフォトニックネットワークの構成
Fig.1-Photonic network architecture using digital signal processing.

適応変調によるフォトニックネットワークのネットワーク容量の向上

適応変調を用いるフォトニックネットワークの有効性をシミュレーションを行って検証した。

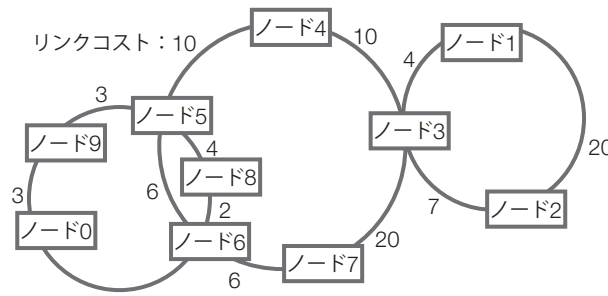
(1) 構成・条件

図-2 (a) に示す10ノードから構成されるマルチリングネットワークでの検討を行った。各ノード間でのトラフィック要求はメッシュ状であり、ノード間距離は、図中のリンクコストで定義されている。伝送レートとして100 Gbpsの固定ビットレートを想定し、適応変調に用いる変調方式として、DP-QPSK, DP-16QAM (Quadrature-Amplitude Modulation), DP-64QAMを用いた。それぞれの変調方式で、伝送可能距離に対しては、受信時に必要とされる光信号対雑音比 (OSNR: Optical Signal to Noise Ratio) を選定時の指標とした。また、必要とされる信号帯域についてはシンボルレート (DP-QPSK: 25 Gbaud, DP-16QAM: 12.5 Gbaud, DP-64QAM: 8.3 Gbaud) からそれぞれ

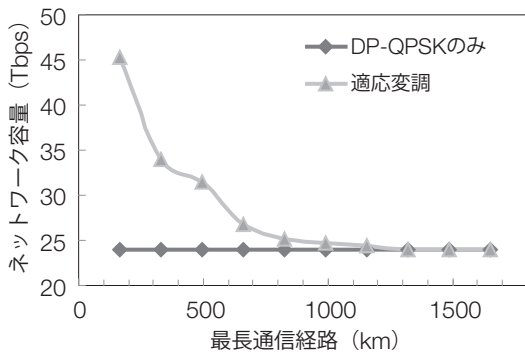
れの変調方式で必要となる周波数帯域を基に、送受信ノード間での通信経路への帯域割当てを行った。通信経路割当て時には、周波数利用効率の最も高い64QAMにおいて、送受信ノード間での3R再生中継器なしでの伝送可否判定を行い、伝送不可の場合では、16QAM, QPSKでの伝送可否判定を段階的に行い、未使用の周波数グリッドに信号を割り当てるアルゴリズムを採用している。

(2) 結果

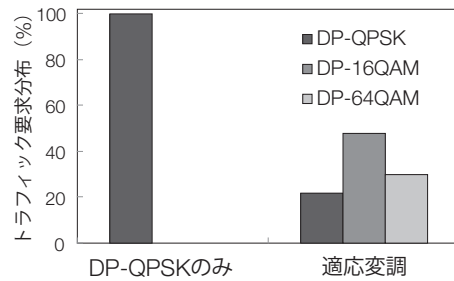
図-2 (a) 中に示されるリンクコストを、ノード間距離の相対値としてネットワークの規模を変化させた際の、ネットワーク内での最長伝送距離とネットワーク容量の関係を図-2 (b) に示す。比較として、DP-QPSKのみを用いる場合と、三つの変調方式から適切な変調方式を選択して、経路設定を行った際のネットワーク容量を示している。この際、縦軸で示されるネットワーク容量は、全送受信ノード間における、トラフィック要求に対して設定可能な通信経路数に、転送レートである



(a) シミュレーションモデル
(10ノード、マルチリングネットワーク)



(b) ネットワーク容量とモデルネットワークでの最長伝送距離の関係



(c) 各変調方式に対するトラフィック要求の分布 (最長伝送距離: 600 km)

図-2 適応変調技術によるフォトニックネットワークのネットワーク容量
Fig.2-Characteristics of photonic network system capacity using adaptive modulation technology.

100 Gbpsを掛け合わせたものに相当する。上述したアルゴリズムを、経路・周波数割当てに採用することにより、多値度の高い64QAMが有効に使える、比較的ネットワーク規模に小さい数100 km程度のメトロ圏におけるネットワークにおいて、50%～90%といった、顕著なネットワーク容量の向上が確認された。また、最長伝送距離が600 kmの場合の各変復調方式で伝送されるトラフィックの比率を図-2 (c) に示す。縦軸が送受信ノード間に発生しているトラフィック要求のうち、それぞれの変調方式に対して、割り当てられているトラフィックの比率を示しており、従来では、すべての距離においてQPSKを用いて伝送していたものが、伝送距離に応じて、それぞれ三つの変調方式が適切に選択されており、QPSKのみと比較して、ネットワーク容量として、最長伝送距離が600 kmのネットワークにおいて、11%の改善が見られている。以上の結果から、フォトニックネットワークに対して、適応変調技術を適用した際の、ネッ

トワーク容量の増加に対する効果が示された。

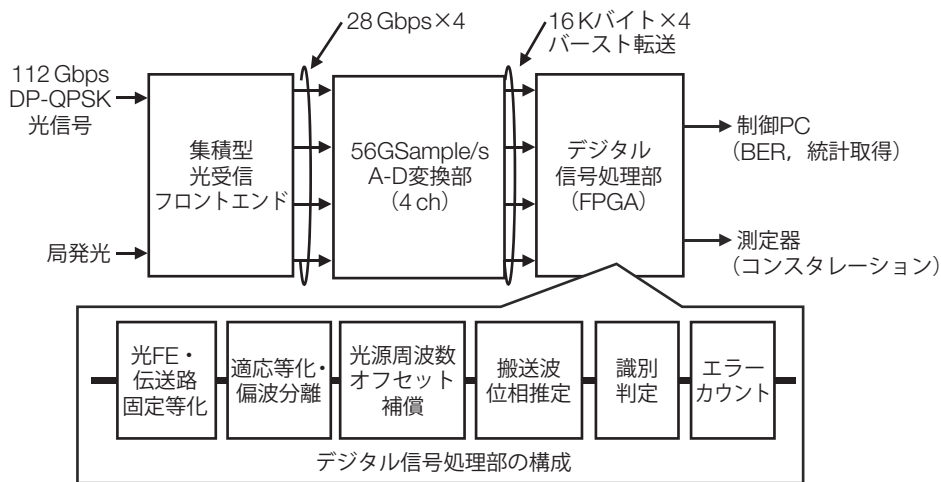
FPGAをベースとするデジタルコヒーレント受信器

適応変調技術を採用し、効果的に変調方式を切り替えるためには、各変調方式での伝送性能を正確に把握する必要がある。その際、適用するデジタル信号処理アルゴリズムの検証や、それらを用いたシステムの伝送特性の評価には、光ファイバ伝送路中での信号劣化を、実環境下に近い特性で模擬し評価を行うことが重要となる。とくに、伝送路中においてランダムに状態が変化する光信号の偏波状態に依存して生じる偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) および偏波依存性損失 (PDL: Polarization Dependent Loss) による信号劣化に対する耐性や、伝送路中における非線形光学効果による信号劣化、またそれらが複合して生じる特性劣化の影響を設計段階で網羅的に評価することが、適応変調運用時での各変調方式に対して伝送品質保証を行う上で重要となる。デ

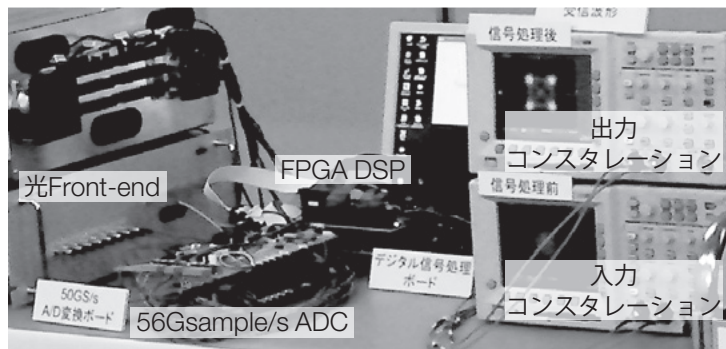
デジタル信号処理アルゴリズムの検証には、光信号受信後にDSO (Digital Storage Oscilloscope) でアナログ-デジタル変換された信号を、外部PCで信号処理を行うオフライン処理が主に採用されている。しかし、そのような評価環境においては、伝送路中でのPMD, PDLのような、ランダムに変化するパラメータに対して、想定されるすべての偏波状態の検証を行うことは、時間的な制約などによって困難である。

そこで、このような検証を可能とする評価ツールとしてFPGAをベースとしたコヒーレントレシーバを開発した。本レシーバは、伝送評価として一般的に用いられている周回伝送実験系との整合を考慮し、バースト的にデータの取得、および信号処理を可能とする構成となっている。その構成と外観を図-3に示す。試作した光受信器は、

- (1) 偏波分離素子, 90度ハイブリッド, 受信PD, TIAが集積された集積型光受信フロントエンド (OFE : Optical Front-End) モジュール
- (2) 56GSample/sのサンプリング速度を有するADC部⁽⁵⁾
- (3) FPGA上に実装されるデジタル処理部から構成されている。FPGAに実装する信号処理アルゴリズムを各変調方式に対応したものに変更することで、同一のプラットフォームで様々な変調方式の評価を行うことが可能となる。後述する、112 Gbps DP-QPSK信号処理に用いたデジタル信号処理部としては、OFE特性のポート間ばらつき補正, 伝送路による波形歪みの補正, 偏波分離, 送受信端光源間での周波数オフセットの補償, 位相推定を行い, 信号コンスタレーションを復元したのち, 差動デコード処理, 識別判定, エラー



(a) コヒーレント受信器, 信号処理部の構成



(b) コヒーレント受信器の外観

図-3 FPGAをベースとしたデジタルコヒーレント受信器
Fig.3-FPGA-based digital coherent receiver.

カウントを行う構成を実装している。周回伝送実験系と連動してバースト的に信号処理を行うために、デジタル信号処理部からADCに対してデータ取得のトリガ信号を送出し、その信号を基に、112 Gbps DP-QPSK信号のAD変換（4 ch：X, Y 偏波, I, Q channel）、およびADCボード上に実装されたメモリ（16 Kバイト×4 ch）からのデータ転送、デジタル信号処理部での信号処理を逐次的に行う構成となっている。

評価プラットフォームによる伝送特性評価

伝送路中におけるPMD, PDL, 非線形光学効果による信号劣化、またそれらが複合して生じる特性劣化を評価するため、前述したFPGAベース受信器と、実環境下を模擬した周回伝送系において、伝送特性評価を行った。

(1) 実験系

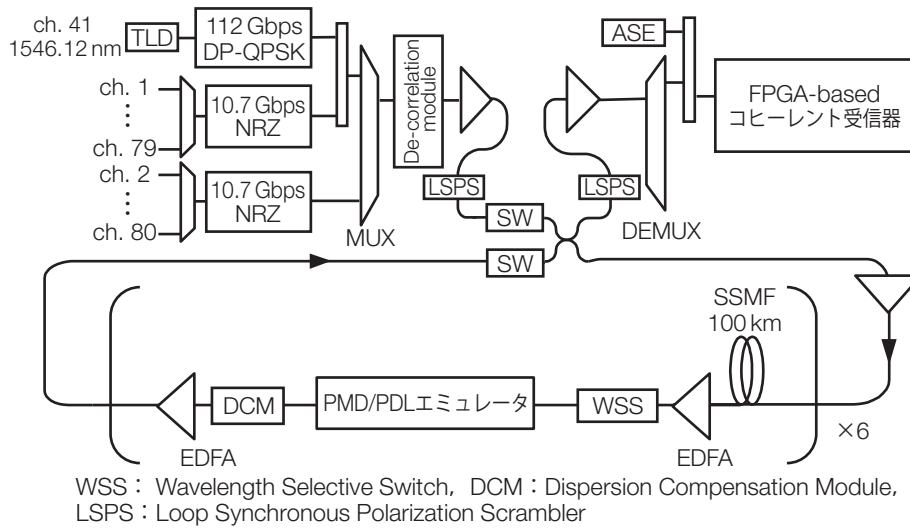
伝送実験系を図-4 (a) に示す。システム評価においては、112 Gbps DP-QPSK変調信号と10.7 Gbps NRZ (Non-Return to Zero) 変調信号が混載した伝送システムにおいて、検証を行った。Cバンド（1530.33-1561.83 nm）に周波数間隔50 GHz, 80波の光源を配置し、そのうち、中心波長1546.12 nmの1波を112 Gbps DP-QPSK方式で変調し、残りの79波を偶数, 奇数チャンネルに分け、それぞれ独立に10.7 Gbps NRZ方式で変調した。伝送路は6スパンのSMF (Single Mode Fiber) (ファイバ長：100 km, ファイバ損失：約20 dB) で構成された1周600 kmの周回伝送系であり、各ノードにエルビウム添加光ファイバンプ (EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier) の利得等化、および光分岐挿入装置 (ROADM: Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexing) ノードを模擬するための波長選択スイッチ (WSS: Wavelength Selective Switch) を挿入している。WSSの出力には、高次PMDおよびPDLを模擬するためPMD/PDLエミュレータ {図-4 (b)} が挿入されている。PMD/PDLエミュレータは、二つの周回同期偏波スクランブラ、PMD素子、およびPDL素子で構成されており、PMD, PDL素子間に配置された周回同期偏波スクランブラを周回切替えタイミングと同期させて動作させ、そのタイミングに合わせてFPGA basedレシーバで信号を受信し、処理を

行うことにより、様々な偏波モード結合状態下での特性評価が可能である。本実験では、0.5 dBのPDL値を持つ素子を挿入し、このときの12スパン伝送後の平均PDLは約2 dBであった。一方、平均PMD値はPMD素子を交換することにより12スパン伝送後で、0, 14, 24 psと可変にした。12スパン伝送後の光信号に自然放出光 (ASE: Amplified Spontaneous Emission) 雑音を付加し、FPGAベースコヒーレント受信器に入力した。このとき、OSNRは17 dBに固定した。

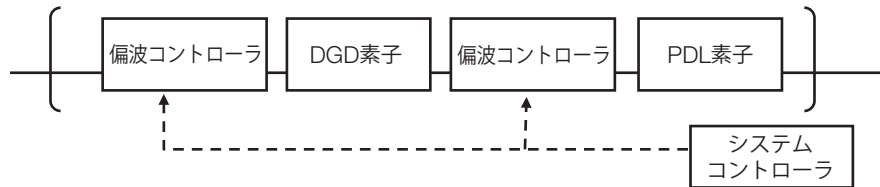
(2) 実験結果

本評価では異なる偏波モード結合状態で100点BER (Bit Error Rate) 測定を行い、それらを平均したQ値で評価した。0 dBm/ch, Single channel伝送および50 GHz間隔波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 伝送時の、平均PMD値に対する平均Q値を図-4 (c) に示す。図中のエラーバーは平均Q値を中心にして±30%の分布を示している。Single channel伝送時の結果を見ると (図中白丸), 平均Q値は平均PMD値に依存せずほぼ一定である。これは、コヒーレント受信器が平均PMD値=24 psまでペナルティなくPMD補償可能であることを示している。また、PMDと非線形との相互作用が生じていないことを示唆している。一方、WDM伝送時 (図中黒丸) では、平均PMD値が増加するに従いQ値が改善し、平均PMD値=24 psにおいて0.8 dBのQ値改善が得られた。これらはPMDによる10.7 Gbps NRZ信号のデポラリゼーションがチャンネル間非線形ペナルティを低減したため、Q値が改善したと考えられる。

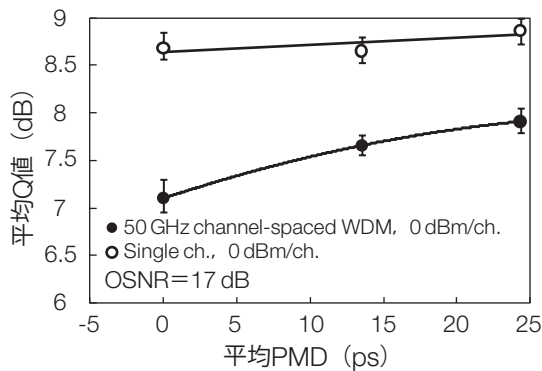
つぎに、+2.5 dBm/ch, 100 GHz間隔WDM伝送時の結果を図-4 (d) に示す。Single channel伝送時 (図中白四角) において、平均PMD値=14 psまでQ値は一定であったが、平均PMD値=24 psにおいて0.4 dBのQ値劣化を観測した。PMDが引き起こす波形歪みとチャンネル内非線形との相互作用が劣化を生じさせた理由として考えられる。一方、WDM伝送時 (図中黒四角) では、0 dBm/ch, 50 GHz間隔WDM伝送時において見られたようなQ値改善は得られず、Q値は平均PMD値に対してほぼ一定であった。PMDによるチャンネル間非線形ペナルティの低減とPMDとチャンネル内非線形との相互作用による性能劣化が互いに打ち消し合い、



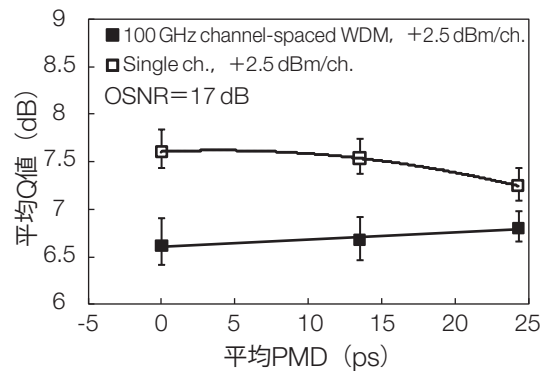
(a) 伝送実験系



(b) PMD/PDLエミュレータの構成



(c) 平均PMD値に対する平均Q値 0 dBm/ch., Single channel伝送, および50 GHz間隔 WDM伝送



(d) 平均PMD値に対する平均Q値 +2.5 dBm/ch., Single channel伝送, および100 GHz間隔 WDM伝送

図-4 112 Gbps DP-QPSK評価系と伝送特性
Fig.4-Experimental set-up of 112 Gbps DP-QPSK signal and transmission characteristics.

PMD依存性が見られなくなったと考えられる。

以上の結果より、PMDとチャンネル内非線形およびチャンネル間非線形との相互作用は、チャンネル間隔およびファイバ入力パワーにより、性能改善または劣化の異なる影響を与える可能性があることが明らかになった。

む す び

本稿では、デジタル信号処理を用いるフォトニックネットワークについて、適応変調を用いた際のネットワーク容量への効果について、その有効性をシミュレーションにより示した。また、著者らが開発した、様々な変調方式、信号処理アルゴリズムの検証に適用可能な評価プラットフォームに

ついて紹介し、112 Gbps DP-QPSK信号に対して、実環境下を模擬した伝送系での特性評価により、伝送特性に影響を与えるPMD, PDL, 非線形効果による複合効果の影響を明らかに評価した。

本研究の開発成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構 (NICT) からの委託研究「ユニバーサルリンク技術の研究開発」により実施したものである。

参考文献

- (1) T. Hoshida et al.: Network Innovations Brought by Digital Coherent Receivers. OFC/NFOEC 2010, Paper NMB4, 2010.
- (2) T. Tanimura et al.: FPGA-based 112 Gb/s

Coherent DP-QPSK Receiver and Multi-stage PMD-PDL Emulator for Fast Evaluation of Digital Signal Processing Algorithms. ECOC2010, Paper Tu.5.A.3, 2010.

- (3) 中島久雄ほか: デジタルコヒーレント伝送評価プラットフォーム ~周回伝送系・PMD/PDLエミュレータ・FPGAベース受信器の統合~. 電子情報通信学会 EXAT研究会 EXAT2010-10, 2010.
- (4) S. Oda et al.: Interplay between PMD and Nonlinearity in 112 Gb/s DP-QPSK Transmission with Co-propagating 10.7 Gb/s NRZ Channels. OFC/NFOEC2011, Paper OWO4, 2011.
- (5) I. Dedic: 56 Gs/s ADC: Enabling 100GbE. OFC/NFOEC 2010, OThT6, 2010.

著者紹介



青木泰彦 (あおき やすひこ)

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 兼 ネットワークプロダクト事業本部 所属
現在、デジタル信号処理を用いるフォトニックネットワークの研究に従事。



小田祥一郎 (おだ しょういちろう)

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 所属
現在、デジタル信号処理を用いるフォトニックネットワークの研究に従事。



中島久雄 (なかしま ひさお)

ネットワークシステム研究所フォトニクス研究部 兼 ネットワークプロダクト事業本部 所属
現在、デジタル信号処理を用いるフォトニックネットワークの研究に従事。



Paparao Palacharla

米国富士通研究所 所属
現在、フォトニックネットワーク、ノードアーキテクチャの研究に従事。