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

● 小田祥一朗

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。) 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、それに応じてチャネ 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。



(b) 将来の構成(適用変調+可変グリッド)

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



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

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 アナログー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アンプ(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によるチャネル間非線形 ペナルティの低減とPMDとチャネル内非線形との 相互作用による性能劣化が互いに打ち消し合い、





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とチャネル内非線形およ びチャネル間非線形との相互作用は,チャネル間 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

- 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:ディ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。



小田祥一朗(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。