Beyond 100G 光トランスポート用 デジタル信号処理回路(DSP)

本格的なビッグデータ社会の基盤となる光トランスポートネットワーク には、さらなる高速化・大容量化および経済化が求められています.本稿 では、大容量光トランスポートネットワークの発展を支える100 Gbit/s超 級(Beyond 100G)デジタルコヒーレント光伝送技術とその主要機能を実 現するデジタル信号処理回路(DSP)について紹介します.

きさか	よしあき	とみざわ	まさひと
木坂	由明	/富澤	将人
みやもと	ゆたか		
宮本	裕		

NTT未来ねっと研究所

デジタルコヒーレント光伝送技術 の現状と課題

近年のFTTH (Fiber To The Home) やスマートフォンの普及に加えて,超 高速モバイルアクセスを可能とする第 5世代モバイル通信システム (5G) やすべてのモノがインターネットを介 してつながるIoT (Internet of Things) の実用化による本格的なビッグデータ 社会の到来が予期されています.その ため,さまざまな通信サービスの基盤 となる光トランスポートネットワーク には、さらなる高速化・大容量化およ び経済化が求められています.これら の要求にこたえるため、デジタルコ ヒーレント光伝送技術が近年注目され ており、コヒーレント検波により受信 感度と周波数利用効率を向上させると ともに、従来は困難であった長距離光 ファイバ伝送時の波形歪み補償をデジ タル信号処理により実現します^{(1),(2)}. 1波長当り100 Gbit/s級の大容量光ト ランスポートシステムにおいて、デジ タルコヒーレント光伝送技術は実用化 され、総容量 8 Tbit/sの波長多重光ト

ランスポートシステムが商用導入され ています.

現在,400 Gbit/sイーサネット信号 の標準化も進められており,100 Gbit/s 超級(Beyond 100G)光トランスポー ト技術の実用化が期待されています. デジタルコヒーレント光伝送用のデジ タル信号処理技術の開発の方向性を 図1に示します.現行の100 Gbit/sで 適用されている技術に対して,高性能 化と低消費電力化の2つの方向性があ ります.

ここでは、Beyond 100Gの長距離伝





送に向けた高性能化の課題について説 明します.ファイバ当りの伝送容量を 増やすためには周波数利用効率を高め る必要がありますが、そのためには変 調多値数を上げることが効果的です. しかしながら、変調多値数を上げると 所望の符号誤り率を達成するために必 要な光信号対雑音比(OSNR: Optical Signal to Noise Ratio)*¹が大きくな りますが、送信パワーを上げると光 ファイバの非線形光学効果*2による 符号間干渉が顕在化し、伝送距離が制 限されます. そのため, Beyond 100G 光トランスポートシステムでは、伝送 性能のマージンに応じて適応的に変復 調方式を選択する適応変復調技術、非 線形光学効果を補償する非線形補償技 術、より高い符号化利得の前方誤り訂 正 (FEC: Forward Error Correction) 技術などが必要となります.

また,周波数利用効率の向上には, 波長多重の隣接チャネル間の周波数間 隔を狭める方法も有効です.このため には光信号の周波数スペクトルを狭窄 化する必要があり,送信側のデジタル 信号処理により、最小限の信号品質劣 化で光信号スペクトルの狭窄化が可能 なナイキストフィルタリング技術が不 可欠となります. Beyond 100G 光トラ ンスポートシステムの実用化には、こ れらの信号処理機能を現実的な消費電 力で実現することが重要となります.

デジタルコヒーレント光伝送技術

デジタルコヒーレント光伝送技術の 概要について図2に示します。従来の 光伝送システムでは、デジタル信号の1、 0をそのまま光信号のON/OFFに対応 させて強度変調し、その強度を受光素 子 で 直 接 検 波 す るOOK(On-Off Keving) 方式が主流でした. しかしな がら、伝送速度100 Gbit/sでOOK方式 を適用すると、光信号が光ファイバ伝搬 中に受けるさまざまな波形歪みによる伝 送品質劣化が顕在化し、伝送距離が数 km程度に制限されます. そのため, 100 Gbit/s光トランスポートシステムでは, デジタル信号処理により. 光の強度だ けでなく、波としての性質である位相・ 偏波を用いて高効率かつ安定な長距離

伝送を実現するデジタルコヒーレント光 伝送方式が採用され、実用化されてい ます. 100 Gbit/s光伝送において主流と なっている変調方式は、光信号を4つ の異なる位相で変調し、さらにX偏波と Y偏波に異なる信号を乗せる偏波多重 4 値位相変調 (DP-QPSK: Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keving)*³です. 受信光信号と受信側の 局発光を干渉させて干渉信号を検出し て受信光信号の強度と位相の情報を検 出するコヒーレント検波を用いることに より, 高い受信感度が実現でき, 偏波 多重信号を受信側デジタル信号処理に より分離することが可能となります. DP-QPSK方式により、OOK方式と比 較して4倍の周波数利用効率向上を実

- *1 OSNR:光信号強度と光雑音強度の比.受 信OSNRが低くなると、光雑音の影響が大 きくなり、伝送品質が低下します.
- *2 非線形光学効果:光ファイバに入力される 光信号の電界の大きさに比例しない現象の 総称.代表的な現象として、光信号の強度 に依存して光信号自身の光位相が変化する 自己位相変調があります.
- *3 QPSK: 搬送波(光通信の場合は光)の4 つの異なる位相にデジタル信号の4値を対応させて、1回の変調(シンボル)で2ビットを伝送する多値変調方式.



図3 デジタルコヒーレント光送受信器の構成

現しています.

また,光ファイバの波長分散*4,偏 波モード分散*5, 偏波信号間のクロス トークなどにより発生する波形歪みをデ ジタル信号処理により、受信端で一括 補償することで、分散補償用光ファイ バなどの光学補償媒体なしで1000 km以 上の光ファイバ伝送が可能となります. Bevond 100 Gbit/s光伝送システムで は、さらなる大容量化に対応するため、 光変調信号の多値化が必要となります。 光の強度と位相の両方を用いる偏波多 重16直角位相振幅変調 (DP-16QAM: Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation)*6などの高多値 度変調方式も適用されます. デジタル ーアナログ (D/A) 変換により. 送信 信号を生成するため、同一ハードウェア 構成で複数の変調方式に対応すること ができ、必要なチャネル容量や伝送距 離に応じて,最適な変調方式を選択す ることが可能となります.

Beyond 100G 光トランスポー ト用デジタル信号処理回路(DSP)

NTT未来ねっと研究所では情報通

信研究機構(NICT)委託研究や総務 省委託研究を受けて,複数組織参画の オープンイノベーション方式によりデ ジタルコヒーレント光伝送用リアルタ イムデジタル信号処理回路(DSP: Digital Signal Processer)の研究開 発を行いました^{(3),(4)}. デジタルコヒー レント光伝送方式における光信号の変 復調処理,波形歪み補償などはDSP で行われます.

デジタルコヒーレント光送受信器に おける主要機能のブロック構成を図3 に示します. ここでは, 200 Gbit/s光 信号の送受信処理の一例を説明します. 送信側では、フレーマにおいてLAN側 から入力される2つの100 Gbit/sイー サネット(100GbE) 信号をWAN側 の2つのOTN (Optical Transport Network)*7 $\mathcal{D}\mathcal{V} - \mathcal{A}\mathcal{D}\mathcal{A} - \mathcal{P}\mathcal{V}$ (OTU4 信号)に変換後,DSPに入力されます. DSPでは、強力な誤り訂正能力を持 つ冗長度20%もしくは25%の軟判定誤 り訂正符号化処理⁽⁵⁾が行われた後,直 交2偏波(X偏波・Y偏波)それぞれ の直交位相(I位相・Q位相)の4レー ンに信号マッピングされ、OSNRなどの

伝送路状況を推定するためのパイロッ ト信号が付加されます.光信号スペク トルの狭窄化などのデジタルフィルタ 処理が行われた後,D/A変換され,光 送信部にて200 Gbit/s DP-16QAM信 号に変換されて送信されます.

受信側では、光受信部にて信号光は 局発光とミキシングされてコヒーレン ト検波され、送信側と同様に4レーン のアナログ信号に変換されます. DSPでは、アナログーデジタル (A/D) 変換によってデジタル信号に変換さ れ、デジタル信号処理により、光ファ イバの波長分散や非線形光学効果など

- *4 波長分散:光の光ファイバ伝搬遅延が波長 により異なる現象.光パルスが光ファイバ を伝搬するうちに、パルス幅が広がり、伝 送品質を劣化させます.
- *5 偏波モード分散:光の光ファイバ伝搬遅延 が偏波状態により異なる現象.光パルスが 光ファイバを伝搬するうちに,パルス幅が 広がり,伝送品質を劣化させます.
- *6 16QAM:搬送波(光通信の場合は光)の光 信号の強度と光位相の16種類の組み合わせ にデジタル信号の16値を対応させて、1回 の変調(シンボル)で4ビットを伝送する 多値変調方式.
- *7 OTN:国際標準化機関ITU-Tで規定される 通信規格.波長多重技術を前提として,多 様なクライアント信号を柔軟に収容して高 信頼にデータを転送する光ネットワーク です.

による波形歪みの補償処理^{(6).(7)},適応 等化処理,16QAM信号の復調処理, 誤り訂正復号化処理などが行われ,2 つのOTU4信号が復元されます.適応 等化処理では,偏波多重信号の分離, 偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion)等による波形歪み 補償などが行われます.

また、伝送路推定部は、受信OSNR や伝送路の波長分散を高速推定し、最 適な変調方式選択⁽⁸⁾や高速な信号復 旧^{(1),(2)}を実現します.全体機能制御部 では、DSPの機能ブロック間の連携 動作を制御します.デフレーマでは、 2つのOTU4信号は2つの100GbE信 号に変換されてLAN側に出力されま す.さらに、変調方式として、DP-QPSKを用いる場合には、転送レート が100 Gbit/sとなり、1つの100GbE 信号が収容されます.

400 Gbit/s/chリアルタイム フィールド伝送実験

リアルタイムDSPを用いて,JGN-X フィールド敷設ファイバにおいて実施

した400 Gbit/s/chリアルタイム適応 変復調実証実験[®]について紹介しま す.JGN-Xテストベッドを用いた フィールド実験系構成を図4に示しま す、3つのフォトニックノード(#1、2、 3)を構成し、ノード間をJGN-Xフィー ルド敷設ファイバ (SMF 216 km) と 実験室ファイバ (SMF 3030 km) で 接続しました. JGN-Xフィールド敷 設ファイバは小金井一つつじヶ丘局間 (18 km) を折り返しで構築しました. C帯75 GHz間隔で波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) されたLD光源からの連続発振光を偶 数チャネルと奇数チャネルで別々に変 調し、偏波多重した後、ノード#1で 合波することで、C帯37.5 GHz間隔で 112波長 (1529.114~1562.283 nm) の DP-16QAM信号もしくはDP-QPSK 信号を生成しました。リアルタイム光 送受信器では、ナイキストフィルタリ ングにより光信号スペクトルを狭窄 化して、2つの波長を近接配置した 400 Gbit/sもしくは200 Gbit/sの スーパーチャネルを構成し. ノード

#1において波長多重光信号の2波 (λ_{2n-1} , λ_{2n}) と置き換える分岐挿入 構成としました.リアルタイム送受信 器は、パイロット信号によるOSNR推 定機能⁽⁸⁾を有しており、伝送距離に応 じて変化する受信光信号のOSNRを推 定し適切な変復調方式を選択する適応 変復調動作が可能です. 特

本実験では、ノード#2内の光ス イッチで伝送距離を切り替えて適応 変復調伝送を実施しました.総容量 22.4 Tbit/sの112波WDM信号での実 験結果を図5に示します、本実験では、 DP-16QAMの伝送可能判定しきい値 としてOSNR 20 dBに設定しました. 216 km伝送後の推定OSNRは伝送可 能判定しきい値の20 dBより大きいた め、DP-16QAMでの伝送が可能です. 測定した全チャネルの誤り訂正前のQ 値が約6dBであり, 誤り訂正後はエ ラーフリーであることを確認しました. 3246 km伝送後は推定OSNRが20 dBよ り小さいため、DP-QPSKが選択され ます. この場合の誤り訂正前のQ値は 6 dB以上であり、誤り訂正後はエラー





フリーとなることを確認しました.本 実験により,推定OSNRを用いた適応 変復調動作が可能であることを実証し ました.

今後の展開

本稿では、本格的なビッグデータ社 会の基盤となる大容量光トランスポー トネットワークの実現に向けて重要な 技術であるBeyond 100Gデジタルコ ヒーレント光伝送技術の最新動向を紹 介しました.今後も本技術の高性能化 や適用領域の拡大に向けて研究開発を 進めていきます.

本研究成果の一部は,総務省委託研 究「超高速・低消費電力光ネットワー ク技術の研究開発」および情報通信研 究機構(NICT)委託研究「光トラン スペアレント伝送技術の研究開発(λ リーチ)」によるものです.

■参考文献

 鈴木・宮本・富澤・坂野・村田・美野・柴山・渋谷・福知・尾中・星田・小牧・水落・ 久保・宮田・神尾: "光通信ネットワークの 大容量化に向けたディジタルコヒーレント信 号処理技術の研究開発,"信学誌,Vol.95, No.12, pp.1100-1116, 2012.

- (2) E. Yamazaki, S. Yamanaka, Y. Kisaka, T. Nakagawa, K. Murata, E. Yoshida, T. Sakano, M. Tomizawa, Y. Miyamoto, S. Matsuoka, J. Matsui, A. Shibayama, J. Abe, Y. Nakamura, H. Noguchi, K. Fukuchi, H. Onaka, K. Fukumitsu, K. Komaki, O. Takeuchi, Y. Sakamoto, H. Nakashima, T. Mizuochi, K. Kubo, Y. Miyata, H. Nishimoto, S. Hirano, and K. Onohara: "Fast optical channel recovery in field demonstration of 100-Gbit/s Ethernet over OTN using real-time DSP," Optics Express, Vol.19, No.14, pp.13179-13184, 2011.
- (3) 米永: "400 Gbps級超高速・低消費電力デジタルコヒーレント光伝送技術," 信学ソ大, C-3-1, 2014.
- (4) 米永・尾中・丸太・杉原・田島・佐藤・鈴
 木: "光トランスペアレント伝送技術の研究
 開発(λリーチ)," 信学技報, OCS, Vol.110, No.441, pp.29-34, 2012.
- (5) K. Sugihara, Y. Miyata, T. Sugihara, K. Kubo, H. Yoshida, W. Matsumoto, and T. Mizuochi: "A spatially-coupled type LDPC code with an NGC of 12 dB for optical transmission beyond 100 Gb/s," Proc. of OFC/NFOEC 2013, OM2B.4, Anaheim, U.S.A., March 2013.
- (6) 野口・安倍・前田・福知: "スペクトルモニ タを用いた周波数領域等化適応制御による信 号帯域最適化,"信学総大, B-10-44, 2014.
- (7) T. Hoshida, L. Dou, W. Yan, L. Li, Z. Tao, S. Oda, H. Nakashima, C. Ohshima, T. Oyama, and J.C. Rasmussen: "Advanced and feasible signal processing algorithm for nonlinear mitigation," Proc. of OFC2013, OTh3C.3, Anaheim, U.S.A., March 2013.
- (8) S. Okamoto, K. Yonenaga, F. Hamaoka, and Y. Kisaka: "Field experiment of OSNRaware adaptive optical transmission with pilot-aided bidirectional feedback channel," Proc. of OFC/NFOEC 2016, Th2A.2,

Anaheim, U.S.A., March 2016.

(9) 米永・手島・星田・秋山・杉原・亀谷・野 ロ・柳町・佐藤・丸田・宮本: "JGN-Xテス トベッドにおけるダイナミック適応型フォト ニックノードを用いた400 Gbps/chリアルタ イムフィールド伝送実験," 信学総大, B-10-66, 2016.



(左から) 木坂 由明/ 富澤 将人/ 宮本 裕

NTT未来ねっと研究所では、光通信の発展におけるパラダイムシフトとなったデジタルコヒーレント光伝送技術をさらに発展させ、さまざまな通信サービスの基盤となる光トランスポートネットワークの大容量化、経済化、高機能化の実現に貢献していきます.

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所 フォトニックトランスポートネットワーク研究部 TEL 046-859-3011 FAX 046-859-5541 E-mail pt-hosa-mirai@lab.ntt.co.jp