

超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術

本稿では、ブロードバンドネットワークの今後の発展を支える超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術を紹介します。本技術は、超高速デジタル信号処理を光ファイバ通信方式に適用することにより、光伝送性能を飛躍的に向上させることができ、光ファイバ1心で10 Tbit/sを超える大容量化の実現が期待されています。

みやもと ゆたか さの あきひで
宮本 裕 / 佐野 明秀
よしだ えいじ さかの としかず
吉田 英二 / 坂野 寿和

NTT未来ねっと研究所

超大容量デジタルコヒーレント光伝送技術

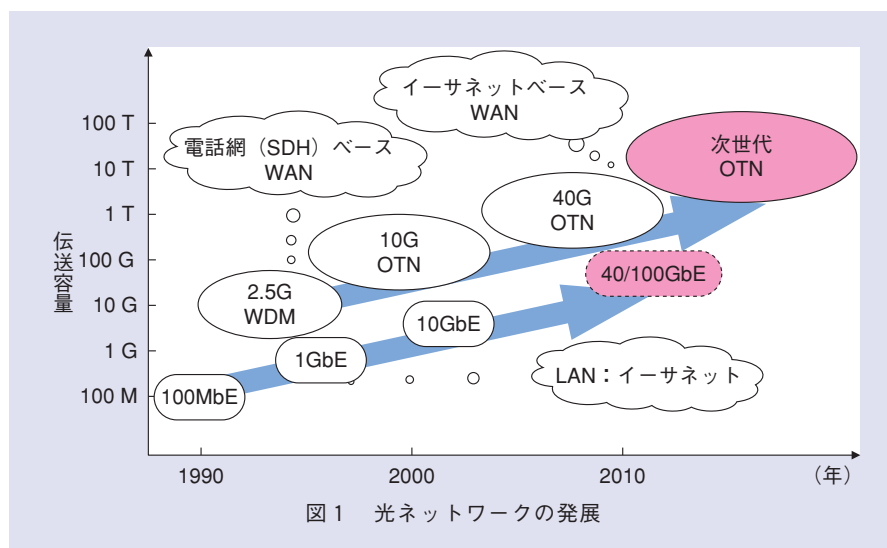
デジタルコヒーレント光伝送技術は、光通信に超高速デジタル信号処理を積極的に取り入れ、光ファイバ伝送性能を飛躍的に向上する基盤技術です。光ネットワーク（OTN: Optical Transport Network）において、2010年度に標準化が完了した100Gイーサ（100GE）などの多様な超高速クライアント信号を1波長100 Gbit/s以上の超高速波長チャンネルに多重収容し、高信頼な長距離大容量伝送を実現します。

大容量光ネットワークにおける超高速チャンネル伝送の技術課題

将来のOTNでは、1波長（1搬送波）当り最大100 Gbit/s級のラインレートで、100波長程度の信号をキャリア（搬送波）周波数間隔50/100 GHzで高密度多重することにより、1本のファイバで10 Tbit/s級の大容量光ネットワークの実現が期待されています⁽¹⁾（図1）。さらに途中の中継ノードに光スイッチを駆使した多方路ROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer）^{*1}ノードを挿入することにより、光ネット

ワークの拡張性を格段に向上することが可能となります。NTT先端技術総合研究所（研究所）では、2006年に、100GE信号をトランスペアレントに収容可能な現在国際標準化されたラインレート1波長111 Gbit/sにおいて、RZパルス化4値差動位相変調・遅延検波方式（RZ-DQPSK-DD: Return to Zero-Differential Quadrature Phase Shift Keying-Direct Detection）を用いた多重数140チャンネルの14 Tbit/s波長多重伝送実験に成功し、10 Tbit/s級のOTNの実現可能性を初めて示しました⁽²⁾。今後、100 Gbit/sのシリアル信号を高密度多重し、従来のシステムと中継間隔の互換性を維持しつつ高信頼な波長多重伝送を実現するためには、以下に述べるいくつかの技術課題を解決する必要があります。

- ・信号対雑音比（SNR: Signal to Noise Ratio^{*2}）と周波数利用効率の向上
- ・波長分散・偏波モード分散耐力



*1 ROADM：波長多重方式とパス管理の技術を組み合わせ、超高速・大容量の伝送ネットワークをうまく運用するための技術。

*2 SNR：信号量と雑音量の比。SNRが高ければ伝送における雑音の影響が小さくなります。

向上

- ・光ノードによる帯域制限耐力の向上
- ・光非線形耐力の向上

伝送容量を拡大するためには、周波数利用効率を上げることが必須であり、無線通信と同様多値符号化は有効です。しかしながら、4 値以上 ($m \geq 4$, m は多値数) の多値符号化を進めると、図2に示すとおり、一定の符号誤り率 (BER: Bit Error Rate) を実現するための所要SNRが増加し、中継距離が短くなってしまいうため、SNRを向上するための新たな技術が必要となります。このため、光コアネットワークの大容量化、スケーラビリティの拡大を実現する1つの方向性として、偏波多重や直交周波数多重等の新たな多重分離技術を多値符号化技術と併用することにより、SNR向上と周波数利用向上の両立を実現していく必要があります。

デジタルコヒーレント光伝送技術の概要と利点

光通信分野にデジタル信号処理を導入する利点としては、以下の3点が挙げられます。

- ① 搬送波の周波数や位相に情報を載せ、高感度受信可能なコヒーレント検波方式が適用できます。これにより、従来の光強度に情報を載せる光強度変調直接検波方式に比べ3 dB程度SNR改善が実現でき、長距離化が可能となります。
- ② 従来では送受信回路内では困難であった強力な波形等化機能が実現でき、すべての波長分散 (CD: Chromatic Dispersion) 補償を送受信機内でデジタル的に

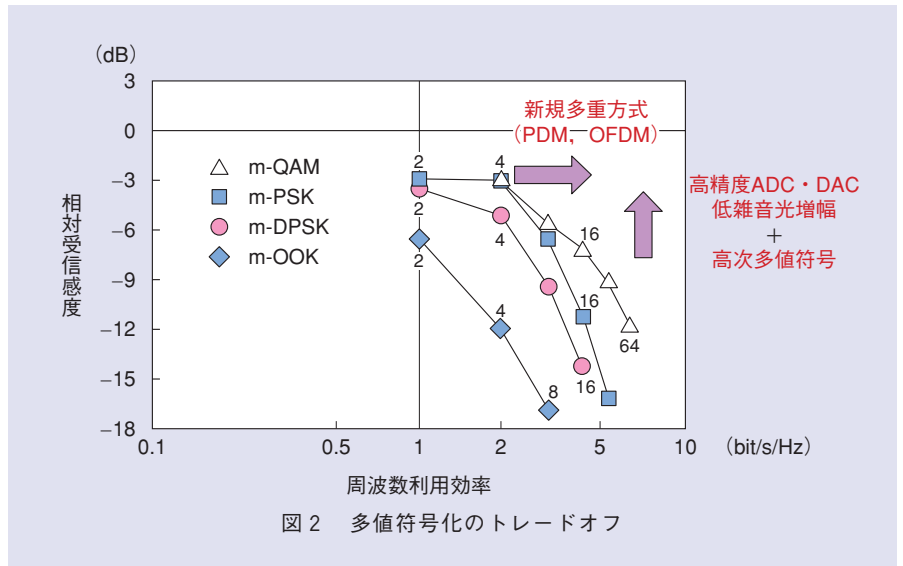


図2 多値符号化のトレードオフ

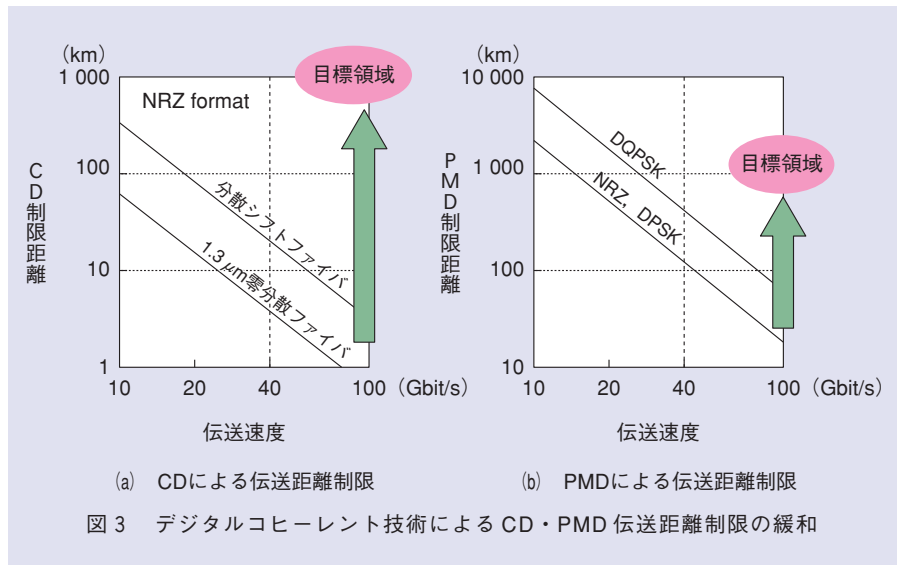


図3 デジタルコヒーレント技術によるCD・PMD伝送距離制限の緩和

行うことで光増幅中継系の構成が大幅に簡素化できます。

- ③ 高信頼な偏波多重分離 (PDM: Polarization Division Multiplexing) が実現でき、従来の波長多重システムの周波数利用効率を2倍以上に向上でき大容量化に有効です。

光信号の伝送速度と、波形歪の原因となるCDと偏波モード分散 (PMD: Polarization Mode Dispersion) による伝送距離制限の関係を図3に示します。CDによる伝送距離

の制限は、光周波数による群速度の変化 (分散) により生じる波形歪に起因しており、伝送可能な距離は伝送速度の2乗に反比例して減少します。例えば図3(a) のようにもっとも一般的な2値NRZ (Non Return to Zero) 強度変調信号の場合、100 Gbit/sの伝送速度では、伝送距離が10 km以下に制限されます。PMDは、ケーブル敷設や保守運用時、また温度変化などによる光ファイバにかかる応力変化や、製造時の真円形状からのばらつき等に起因します。光信号が光ファイバに入

射する偏波の向きにより主偏波軸の2つの光信号成分間に遅延時間差が生じ、入射偏波の変動によって高速に波形が歪み、伝送劣化を引き起こします。特に、伝送速度40 Gbit/s以上の光信号において波形劣化は顕在化します。この解決のため、40 Gbit/s波長多重システムでは、RZ-DQPSK-DD方式を採用することにより、シンボル速度が従来の2値符号の半分に低減されています。結果としてPMD耐力の向上と同時に、周波数利用効率を2値符号と比較して2倍の0.4 bit/s/Hzに向上でき、現在、ファイバ1心で1.6 Tbit/s、再生中継距離約500 kmの伝送システムが実用化されています⁽³⁾。

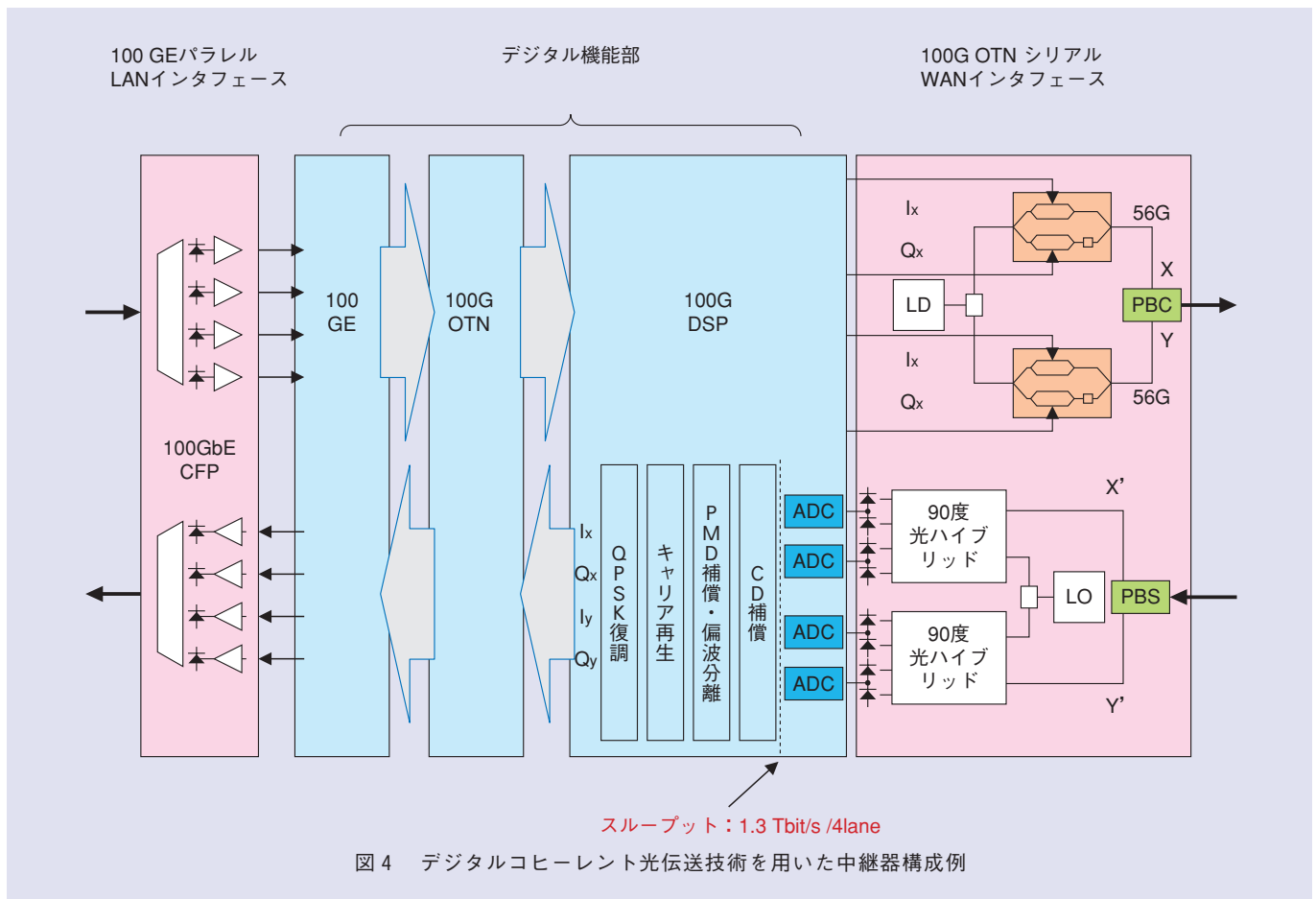
しかしながら、図3(b)に示すよう

に、伝送速度が100 Gbit/s以上になるとRZ-DQPSK-DD方式を用いてもPMDによる伝送距離制限が顕在化し100 km以下まで制限されます。以上のような課題を克服する有力な方式として、無線通信分野で実用化されているデジタル信号処理(DSP: Digital Signal Processing)を積極的に光通信に応用し、光の波として性質をフルに利用するデジタルコヒーレント伝送技術が近年注目されています。超高速DSPを用いたデジタルコヒーレント受信技術は、1波長当り100 Gbit/s以上の超高速信号伝送において、CD、PMD等による波形歪が原因で生じる伝送距離制限を飛躍的に緩和し、波長多重伝送の周波数利用効率を向上することが可能となります。さ

らに、ファイバ1心で10 Tbit/s以上、再生中継距離1 000 km以上の長距離伝送の可能性を有します。

基本的な構成を図4に示します。コヒーレント光通信方式では、無線のホモダイン検波^{*3}、ヘテロダイン検波^{*4}と同様に、受信側で局発光源(LO)を具備し、受信光信号とのビート信号を、ベースバンドあるいは中間周波数帯に変換し受信等化波形の識別再生を行います。これによって高感度受信や、中間周波数帯での光ファイバの固定的な分散補償(遅延等化)などが

- *3 ホモダイン検波：光搬送波の周波数と局発光の周波数が等しいときの干渉を利用することで信号を抽出する位相変調方式による検波技術。
- *4 ヘテロダイン検波：信号光と局発光を干渉させ、中間周波数帯の電気信号に変換する検波技術。



可能であるため、20年ほど前まで精神的に研究されていました。最近注目されているデジタルコヒーレント伝送方式では、DSPを積極的に取り入れることにより、従来のコヒーレント光通信方式のもっとも大きな技術課題の1つであった送信信号と局発光の周波数・位相の物理的な同期と光段での偏波トラッキングが不要となり、電気段でのデジタル信号処理によってリアルタイムに誤差を補正することで光位相同期が可能となりました。また、DSPによるデジタルフィルタによる適応的な分散補償が可能となるため、光ファイバの偏波モード分散や波長分散による遅延特性を適応的に補償し、超高速信号伝送で課題となるこれらの線形な歪特性による距離制限を飛躍的に改善できます。さらに、光信号の位相情報を保持して受信が可能となるため、時間領域以外の偏波、周波数、位相の自由度を用いることで、シンボル速度を低減でき、超高速信号伝送で課題となる電子デバイス、光デバイスの超高速動作特性を緩和できます。

デジタルコヒーレント光伝送技術の要素技術

上述したデジタルコヒーレント伝送方式を実現するうえでもっとも重要な技術課題の1つは、電気段でデジタル信号処理を行うための、高速のA/D、D/Aコンバータとリアルタイム動作が可能なDSPの実現です。例えば、112 Gbit/sデジタルコヒーレント方式の一例として偏波多重QPSK^{*5}方式を考えます。112 Gbit/s偏波多重QPSK光信号は、同じ搬送波（波長）のX、

Yの2つの偏波軸の各々に、独立な56 Gbit/sQPSK信号を変調し伝送します。このため、シンボルレートは28 Gsymbol/sとなります。送信側では、QPSK光信号は、DQPSK-DD方式と同じ構成のベクトル変調器で発生できます。独立に変調した56 Gbit/s QPSK信号を偏波ビーム結合回路(PBC: Polarization Beam Combiner)で各偏波軸に偏波多重し112 Gbit/s偏波多重QPSKシリアル光信号として出力されます。光ファイバ伝送路では、偏光状態は保持されず伝搬し、光ファイバケーブルにおける歪や温度の変化等により、時事刻々、直線偏光や楕円偏光等のさまざまな各偏波状態に変化しながら、デジタルコヒーレント光受信部に入力されます。このとき光ファイバ伝送路では、CDにより受信波形は波形歪を受けるとともに、PMDなどにより、各主偏波軸間に動的な遅延が付加される場合もあります。

受信側では、偏波ビーム分離回路(PBS: Polarization Beam Splitter)でまず、2つのQPSK信号がまじりあったまま、X'、Y'の2つの偏波成分に分離されます。これらの光信号は、90度光ハイブリッド回路を介して局発光と干渉し、各偏波軸(X', Y')のそれぞれに対して、同相成分と直交成分に分離されます。このため112 Gbit/sのシリアルの受信信号は、4レーンの28 Gsymbol/s相当の電気信号としてA/D変換器を介して取り込まれます。DSP部では、受信信号光と局発光との同期、波長分散による線形歪の除去、偏波軸間のカップリングを除去して偏波分離ならびに偏波モード分散による線形歪の除去を行った後、キャリア信号の再生が行われ、各偏波軸のQPSK信号が復調されます。

このときのDSPに必要な信号処理のスループットは1.3 Tbit/s以上となります（例として、各レーンの28 Gsymbol/sの受信波形を、量子化ビット数6 bit、サンプリングレート2 Sample/symbolでサンプリングすると1レーン当りのスループットは336 Gbit/s、4レーン全体で1.344 Tbit/sのデジタル信号を処理する必要があります）。100 Gbit/s級デジタルコヒーレント方式を実現するためには、このような超高速DSPの実現が必須です。従来の学会報告では、固定試験信号をリアルタイムオシロスコープなどを介してメモリに取り込んだ後、計算機上で信号処理するオフライン処理で、100 Gbit/s級動作の原理確認を行っている例がほとんどです。近年、100 Gbit/s級の飛躍的な伝送性能の革新を実現するためのリアルタイムDSP技術の研究開発が世界的に進んでおり、今後の進展が期待されます。研究所では、本分野における100 GbEならびに100 Gbit/s級の超高速リアルタイムデジタル信号処理のための要素技術を確認するNICT（情報通信研究機構）委託研究⁽⁴⁾や、これらの要素技術を統合化した100 Gbit/s級のリアルタイムデジタル信号処理基盤技術の確立に向けた総務省委託研究⁽⁵⁾を受け、デジタルコヒーレント光伝送技術の研究開発を加速しています。

100 Gbit/sデジタルコヒーレント方式を用いたフィールド実験

本方式の実現性を確認するために、研究所では、敷設された分散シフトファイバ(DSF)を用いた100 Gbit/sチャンネルを80波長多重した総伝送容量8 Tbit/s現場実験を行いました⁽⁶⁾。

実験系の構成を図5に示します。本

*5 QPSK：搬送波の4つの位相に4値を対応させ、1回の変調（シンボル）で2bitを伝送する多値変調方式。

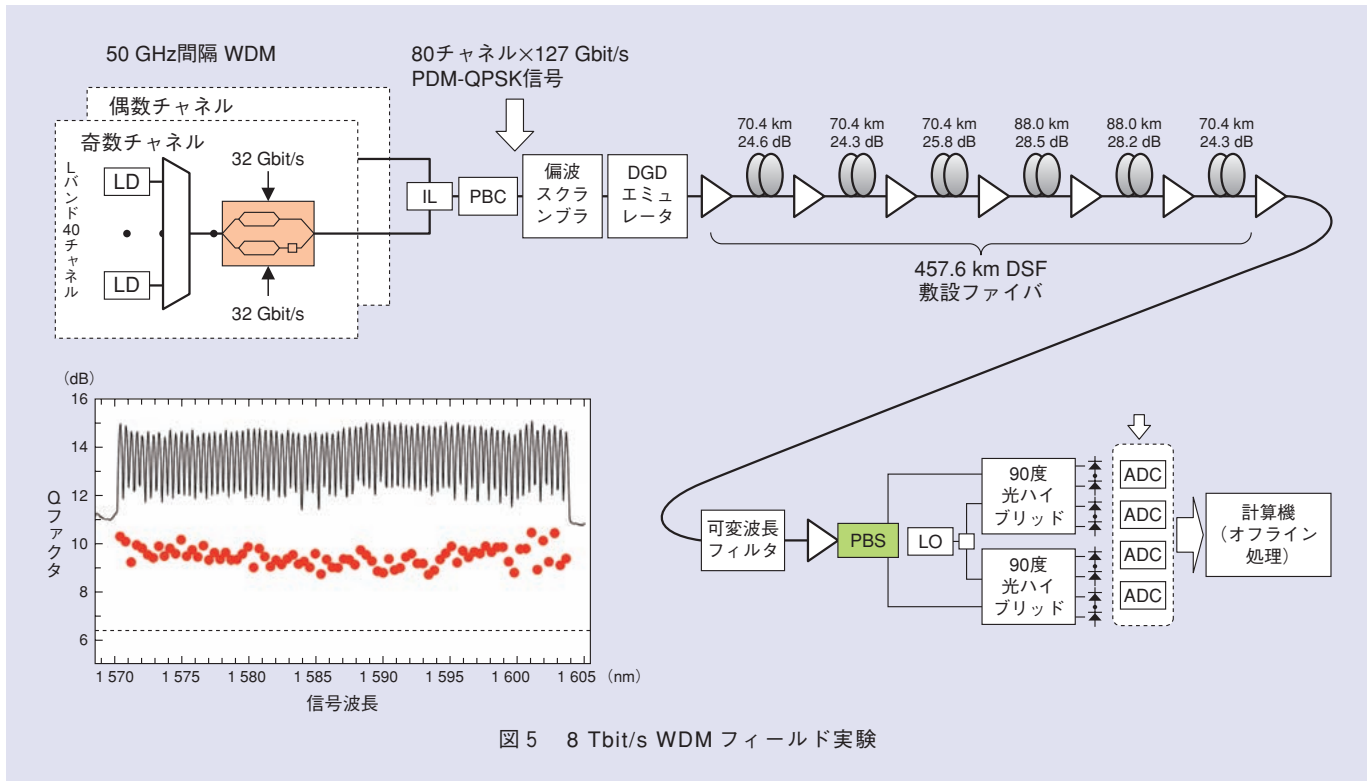


図5 8 Tbit/s WDM フィールド実験

実験では、光信号対雑音比（OSNR: Optical Signal to Noise Ratio）耐力を向上するために、20%の冗長度を持つUFEC（Ultra FEC）を前提に1波長当りの伝送速度を127 Gbit/sとしました。50 GHz間隔で波長多重されたLD光源からの連続発振光は、各々偶数チャンネルと奇数チャンネルが別々のベクトル変調器を32 Gbit/sの擬似ランダム信号で変調し、64 Gbit/s QPSK光信号が生成しました。その後、インタリーバ（IL）と偏波多重部（PDM）により波長多重・偏波多重することにより、127 Gbit/s PDM-QPSK信号が50 GHz間隔に80チャンネル波長多重された8 Tbit/s試験信号を発生しています。さまざまな偏波状態とPMDを模擬するために、送信端に偏波スクランブラと微分群遅延差（DGD: Differential Group Delay）エミュレータを配置しました。

実験に用いた伝送路は、NTT横須賀研究開発センタとNTT東日本横須賀支店間に敷設された8.8 km 100心スロットコアケーブルをコネクタ接続することにより構成し、70.4 km 4区間と88.0 km 2区間をLバンドEDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）により光増幅中継し、全長457.6 kmとしました。試験波長は、1570.4 nmから1603.6 nmであり、CDは1.4～4.2 ps/nm/km、PMD係数は0.2 ps/km^{0.5}以下で、各光増幅中継器では、各スパンの損失（24.3～28.5 dB）のみを補償しました。

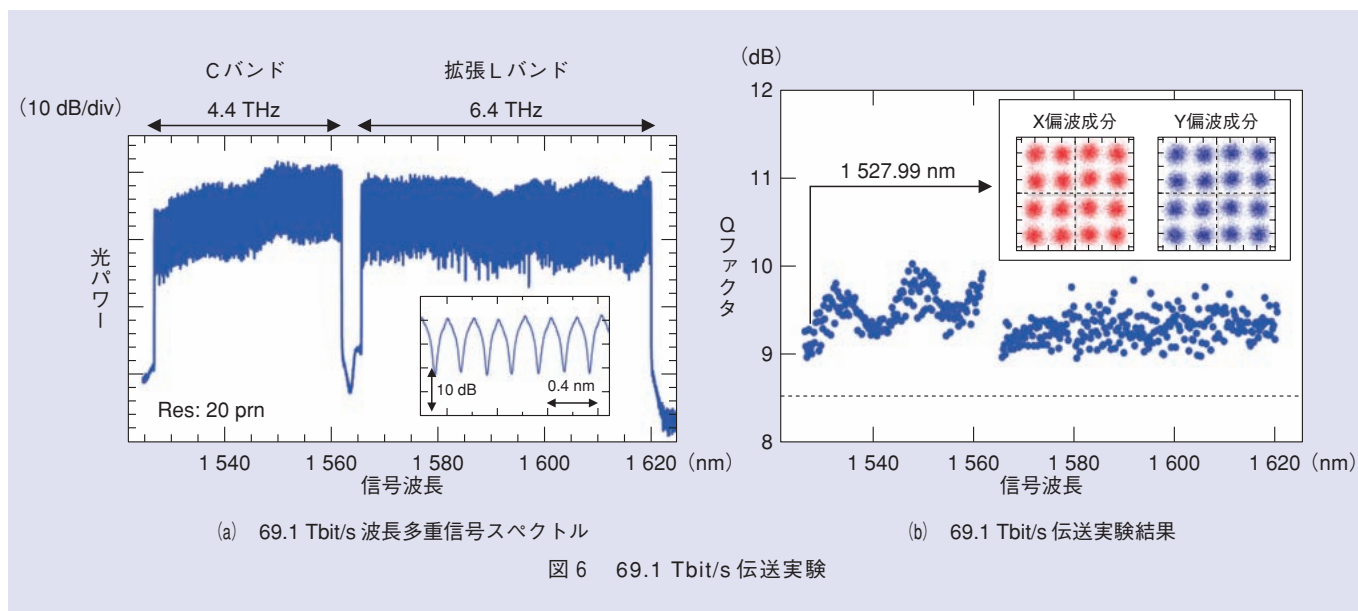
受信端では、線幅100 kHzの可変波長光源をLOとして用いたデジタルコヒーレント受信器を構成し、デジタル信号処理は、コンピュータとリアルタイムオシロを用いたオフライン処理を適用しました。伝送路の累積波長分散ならびにPMDは、受信回路内のデジタル信号処理で完全に補償し、各光増幅中

継器でのインライン分散補償を不要としました。また、デジタル信号処理部において偏波分離後、QPSK信号を復調しました。

伝送容量8 Tbit/s（127 Gbit/s×80チャンネル）WDM信号の457.6 km伝送後のWDMスペクトルと全チャンネルの誤り率（Qファクタ）を図5に示します。全チャンネルにおいて、8.5 dB以上のQファクタが得られ、本UFECの誤り訂正限界6.4 dB以上であることを確認でき、8 Tbit/s容量の安定な伝送の実現性を確認しました。

さらなる大容量化に向けたチャレンジ

デジタルコヒーレント光伝送技術は、無線通信と同様、デジタル信号処理を高度化し、4値を超える多値QAM（Quadrature Amplitude Modulation）変復調符号を適用することで、さらなる高密度化が期待できます。研



究所では、171 Gbit/s PDM-16QAM 符号を用いたデジタルコヒーレント伝送技術を用い、光ファイバ1心で69 Tbit/sの世界最大容量伝送に成功しました⁽⁷⁾。69.1 Tbit/s伝送実験結果を図6に示します。本実験では7%の冗長度を持つFECを仮定し、2つの光増幅帯域であるCバンド（1527.22～1562.03 nm）と拡張Lバンド（1565.91～1619.84 nm）の約10.8 THz帯域にわたり25 GHz間隔で波長多重伝送しました。ファイバ損失0.16 dB/kmの純シリカコアファイバを用いた80 km×3 スパンのEDFAと分布ラマン光増幅器によるハイブリッド光増幅中継により、システム全体の低雑音化を図り、多値化によるOSNR耐力の低下を補償しました。この結果、6.4 bit/s/Hzの高周波数利用効率で光増幅中継伝送することが可能となり、ファイバ1心で世界最大容量となる総容量69.1 Tbit/s、240 kmの伝送実験（オフライン処理）に成功しました。

まとめ

本稿では、ブロードバンドネットワー

クの発展を支える光ネットワークの実現に向け、デジタル信号処理を駆使した超大容量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、本技術が実用システムに耐える高信頼な基盤技術として役立つよう引き続き研究開発を進めていきます。

参考文献

- (1) 松岡：“経済的なコア・メトロネットワークを実現する超高速大容量光トランスポートネットワーク技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.8-12, 2011.
- (2) 宮本・佐野・増田・吉田：“10 Tbit/sを超える超大容量フォトニックトランスポート技術,” NTT技術ジャーナル, Vol.19, No.10, pp.30-34, 2007.
- (3) 松田・松岡：“東名阪基幹伝送路に導入した40G-DWDMシステムの開発,” NTT技術ジャーナル, Vol.20, No.4, pp.58-61, 2008.
- (4) 宮本・松岡：“ユニバーサルリンク技術の研究開発—LANとWANにおける100GbE信号転送のための電気信号処理技術—,” 信学技報, Vol.108, No.409, pp.5-10, 2009.
- (5) http://www.soumu.go.jp/main_content/000068987.pdf
- (6) T. Kobayashi, S. Yamanaka, H. Kawakami, S. Yamamoto, A. Sano, H. Kubota, A. Matsuura, E. Yamazaki, M. Ishikawa, K. Ishihara, T. Sakano, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Tomizawa, and S. Matsuoka: “8-Tb/s (80×127Gb/s) DP-QPSK L-band DWDM transmission over 457-km Installed DSF Links with EDFA-only amplification,” OECC2010, Sapporo, Japan, July 2010.
- (7) A. Sano, H. Masuda, T. Kobayashi, M. Fujiwara, K. Horikoshi, E. Yoshida, Y. Miyamoto, M. Matsui, M. Mizoguchi, H. Yamazaki, Y. Sakamaki, and H. Ishii: “69.1-Tb/s (432×171-Gb/s) C- and Extended L-Band

Transmission over 240 km Using PDM-16-QAM Modulation and Digital Coherent Detection,” OFC/NFOEC2010, San Diego, USA, March 2010.



(左から) 坂野 寿和/ 吉田 英二/
宮本 裕/ 佐野 明秀

デジタル信号処理 (DSP) 技術は、無線通信では広く実用化されていますが、最近のLSI技術の発展により、100 Gbit/s以上の超高速光通信においてもその適用が期待されています。研究所では本技術をさらに発展させ、今後の光ネットワークの大容量化の要求に応えていきたいと考えています。

◆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 046-859-3064
FAX 046-859-5541
E-mail miyamoto.yutaka@lab.ntt.co.jp