

膨張する幹線トラフィックに対応する 超高速トランスポート

Ultra-High-Speed Core Transport to Handle Rapid Growth in Traffic

● 塩田昌宏

● 横田 泉

● 菅谷 靖

● 斉藤成明

● 荻原裕史

あらまし

近年、モバイルトラフィックの高速化や光アクセスの普及、クラウドサービスなどによるデータセンター間を代表とする通信の高速化と大容量化により、コア系ネットワークへ流入するトラフィックの容量膨張への対応は、喫緊の課題となっている。

国際海底網を含め、コア系ネットワークは既に40 Gbpsから100 Gbpsへの光多重方式へ軸を移しつつある中、富士通は従来技術より飛躍的な周波数利用効率向上に期待されていたデジタルコヒーレント技術の実用化に成功した。

本稿では、超高速トランスポートシステムに導入したデジタルコヒーレント技術、および本技術を適用した陸上向けFLASHWAVE 9500と海底向けFLASHWAVE S660について述べる。また、今後の持続的なトラフィックの容量膨張への課題に期待される技術展望についても俯瞰する。

Abstract

There has recently been a speed up of mobile traffic, spread of optical access, and increase in speed and capacity of communication between data centers for purposes such as cloud services. This has caused a rapid increase in traffic in the core transport network and handling it is becoming an urgent challenge. Including international submarine networks, the core transport network is transitioning from 40 Gb/s to 100 Gb/s WDM. In these circumstances, Fujitsu has successfully developed digital coherent technology which is expected to dramatically improve the efficiency of wavelength usage compared to existing technology. This new technology has been applied to an optical transport system for terrestrial FLASHWAVE 9500 and submarine FLASHWAVE S660, and released as a product. This paper gives an overview of technology that is expected to help solve problems caused by the continuous increase in the amount of traffic.

まえがき

クラウドサービスやスマートデバイスを支える光ネットワークの高度化や、LTE (Long Term Evolution) などのブロードバンドサービスの普及により、幹線トラフィックの需要は年率30%を超える爆発的な増加傾向にある。更に、幹線トラフィックの需要増大に伴い、コアネットワークの中核を担うルータにおいても100 GbE化が急速に進展しつつある。商用敷設ファイバにおける2010年度の1ファイバあたりの伝送容量は、陸上基幹網で1.6 Tbps (40 Gbps×40波長)、海底超長距離網で1.2 Tbps (10 Gbps×120波長) 程度であるが、これらの伝送容量では今後のトラフィック需要に応えることができないことは明白である。これまでの大容量化の手段として、DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing: 高密度波長分割多重) による波長多重数の増加があった。この手法は確実ではあるが、装置規模の増大を伴うために消費電力の増加は避けられず、昨今の地球温暖化に対する低消費電力化の要求に応えることは難しい。

以上のような背景から、富士通では2012年を目標に2010年比で3倍以上の伝送容量を持った超高速トランスポートシステムの実現に向けて、1信号あたりの情報量を増やすデジタル信号処理技術にいち早く着目して技術研究開発に当たってきた。

本稿では、超高速トランスポートシステムに導入したデジタルコヒーレント技術、および本技術

を適用した陸上向けFLASHWAVE 9500と海底向けFLASHWAVE S660について述べる。

技術パラダイムシフト

一般に伝送速度の向上を図るには、伝送路から受ける波形歪 (群遅延) の補償や雑音耐力の改善が課題となる。光ファイバを用いた伝送システムでは、波長によって伝搬速度が変わることで生じる波長分散や、光ファイバに応力がかかることで生じる偏波モード分散の影響を受ける。これらの影響を受けた光信号は波形歪が生じ、受信側でエラーを起こす原因となる。また、波形歪の影響は伝送速度が高くなるにつれて顕著になる。例えば、伝送速度を40 Gbpsから100 Gbpsへ上昇させるには4 dBの雑音耐力改善が必要であり、光学的に性能改善を行う従来の手法は、使用する光部品が増加することで体積、およびコストの問題も顕在化し、限界に達している。

デジタルコヒーレント技術⁽¹⁾では、これらの性能改善を全てシリコン、つまりデジタル信号で処理することが可能になり、光伝送において技術パラダイムシフトとも言うべき革新をもたらした。代表的な技術革新として、DP-QPSK (Dual Polarization-Quadrature Phase Shift Keying) (図-1) のデジタル信号処理アルゴリズムの確立⁽²⁾がある。DP-QPSKは、光の偏波特性を生かした偏波多重と4値位相変調の二つの技術の組合せにより、ボーレートを伝送レートの25%まで低減する。100 Gbps信号のボーレートは25 Gbpsとなる

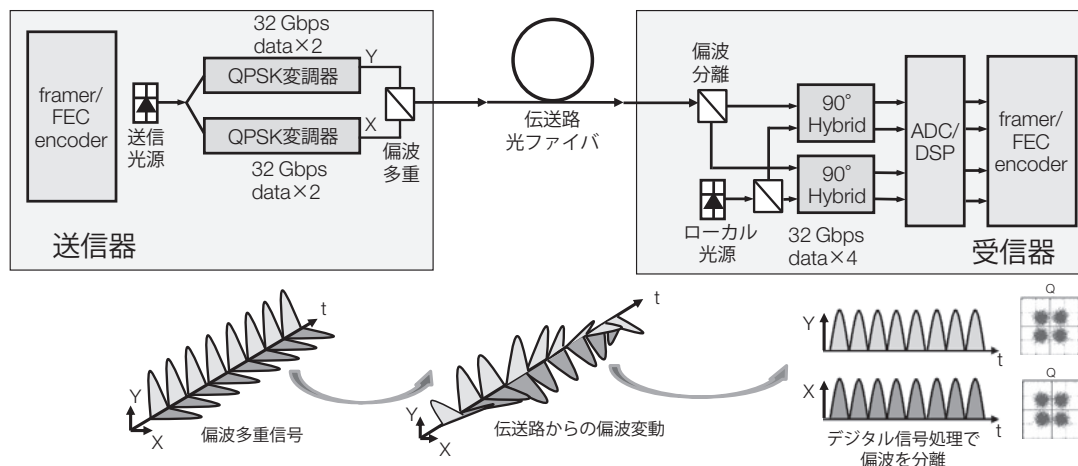


図-1 デジタルコヒーレント送受信器の構成

ため、既存の50 GHz間隔のWDM伝送装置にも対応可能であり、かつ最先端のCMOS回路での動作を可能とした⁽³⁾

偏波多重技術の実用化には、偏波変動への追従が大きな課題であった。商用敷設ファイバには振動などによる数十kHzオーダーの偏波変動の存在が知られており、光の領域で追従することは困難とされていた。デジタルコヒーレントでの信号処理技術では、リアルタイムで偏波の状態をモニタ、補正できるようになり、商用運用面でも偏波変動に耐え得る十分な性能が得られるようになった。

4値位相変調技術は、周波数軸上でのスペクトルの広がり度を低減した。これにより、周波数利用効率が改善され、従来の40 Gbpsよりも狭帯域での波長多重が可能となり、1ファイバあたりの更なる大容量化を可能にした。

更にデジタル信号処理によって、陸上メトロネットワークを十分にカバーできるレベルの波長分散（数万ps/nm）の補償も合わせ実用化となり、光学的な分散補償器を有することなく波形歪による伝送品質の劣化を抑えることが可能となった。

デジタルコヒーレント技術がもたらす効果

富士通は、デジタルコヒーレント技術を超高速トランスポートシステムへ導入することにより、1ファイバあたりの伝送容量は陸上幹線網では2010年度比で5倍の8.8 Tbps（100 Gbps×88波長）、海底超長距離網では3倍の3.6 Tbps（40 Gbps×90波長）を達成し、膨張し続ける幹線トラフィックの需要に応えることが可能となった。

伝送容量向上の実現と同時に、受信信号のデジタル処理により伝送路で発生する光信号歪を電気信号のレベルで補正可能とした結果、ネットワーク運用面においても、以下に述べる新たな効果をもたらすことが可能になった。

先般の東日本大震災以降、重要性が見直されているのがネットワークの柔軟性と持続性である。回線障害発生時に、オペレータの手を介さずに短時間で回線が復旧することが不可欠な要件となりつつある。デジタルコヒーレント技術では伝送路で発生する光波長分散量を自動的に推定し補償する機能を有しており、障害発生時の敷設ファイバルート切替による波長分散値の急激な変化に対しても、msオーダーで分散補償値の最適化を行い、迅速な信号復旧が可能となった（図-2）。

これまでルート切替による分散補償の差分がネックとなっていたリルートに対する制限も緩和され、ネットワーク設計の自由度を高めることができる。このネットワーク設計の自由度の向上は、従来ネットワークに導入する際に必要であった伝送路の厳密な特性管理を不要にし、管理コストの削減およびネットワーク構築工期の短縮を可能にした。

更に、従来の高速トランスポートシステムではネットワーク上に分散補償ファイバ（もしくは補償器）やその損失を補償するための光アンプが設置されていた。デジタルコヒーレント技術を有する超高速トランスポートシステムでは、これらの設備数を劇的に削減し、光ネットワークシステムにより簡易な構成への構造変革をもたらし、トー

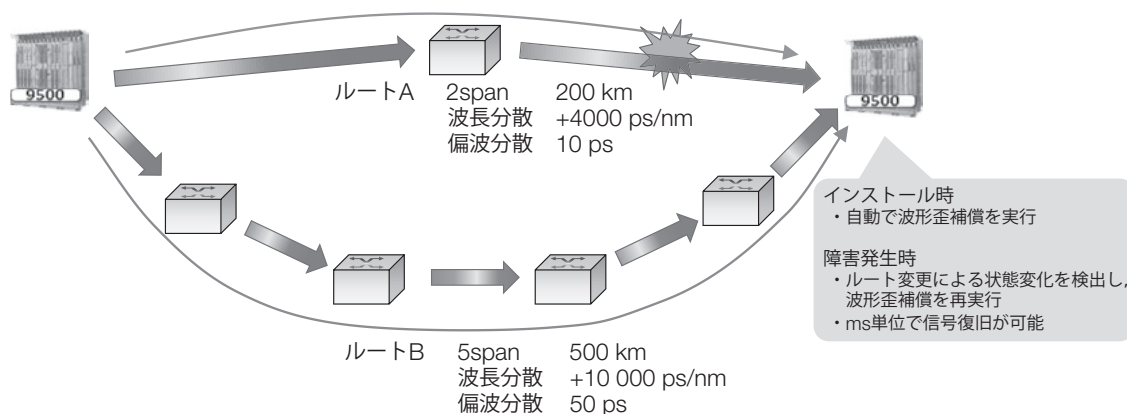


図-2 デジタルコヒーレント技術の運用上の利点

タルコストの削減を可能とした。

製品開発

富士通は、これらデジタルコヒーレント技術を実用化し、超高速トランスポートシステムの製品開発を行った。

● メトロネットワーク向けFLASHWAVE 9500

FLASHWAVE 9500 (図-3) は、既存ネットワークと次世代ネットワークの融合を効率的に実現するパケット統合光システムの製品コンセプトに基づいて設計・開発され、既存のIP (Internet Protocol) ネットワーク・SONET/SDH (Synchronous Optical Network/Synchronous Digital Hierarchy) ネットワーク・DWDMネットワークに対して、用途に応じて各機能ブロックを組み合わせることによって最適なシステムを提供することが可能である。これによって、既存のネットワークを存続させたまま、より高速・大容量の次世代ネットワークへシームレスにマイグレーションが可能となるだけでなく、IP, SONET/SDH, DWDMにまたがる複雑な回線運用管理の簡素化とネットワークを構成する機器の整理・統合による省スペース・省エネルギーを実現する。

本システムのDWDM機能部は最大88波長をサポートし、任意の波長をAdd/Drop可能なROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)

であり、最大8方路へのハブ接続をサポート、最大24ノード構成により、1200 km伝送を実現する。また、SONET/SDHネットワークでのTDM (Time Division Multiplex: 時分割多重) スイッチングとIPネットワークにおけるL2 (レイヤ2) スイッチングを同一システムの中で併せ持つハイブリッドスイッチ方式を採用し、SONET/SDHネットワークを存続させながら新たにIPネットワークを構築する場合やEthernetサービスをより効率的にEoS (Ethernet over SONET) 伝送またはDWDM伝送することができる。

スマートフォンやLTEに代表されるモバイルサービスの普及・大容量化に伴って、通信キャリアはコスト効率の良い容量拡張ソリューションと同時に伝送ビット単価の抑制も求めている。既存キャリアネットワークの多くは、10 Gbps信号ベースのDWDMで構築されており、帯域需要の激増に対応するための高価なオーバレイネットワークは不要で、ネットワーク帯域を10倍に拡大することができる100 Gbpsトランスポンダとマックスポンダを2012年より本格的に導入している。

FLASHWAVE 9500の100 Gbpsトランスポンダとマックスポンダに採用されている最新のデジタルコヒーレント光伝送技術によって、従来はネットワーク構築時に必要となっていた分散補償設計が不要となり、既存のネットワークに対して一切

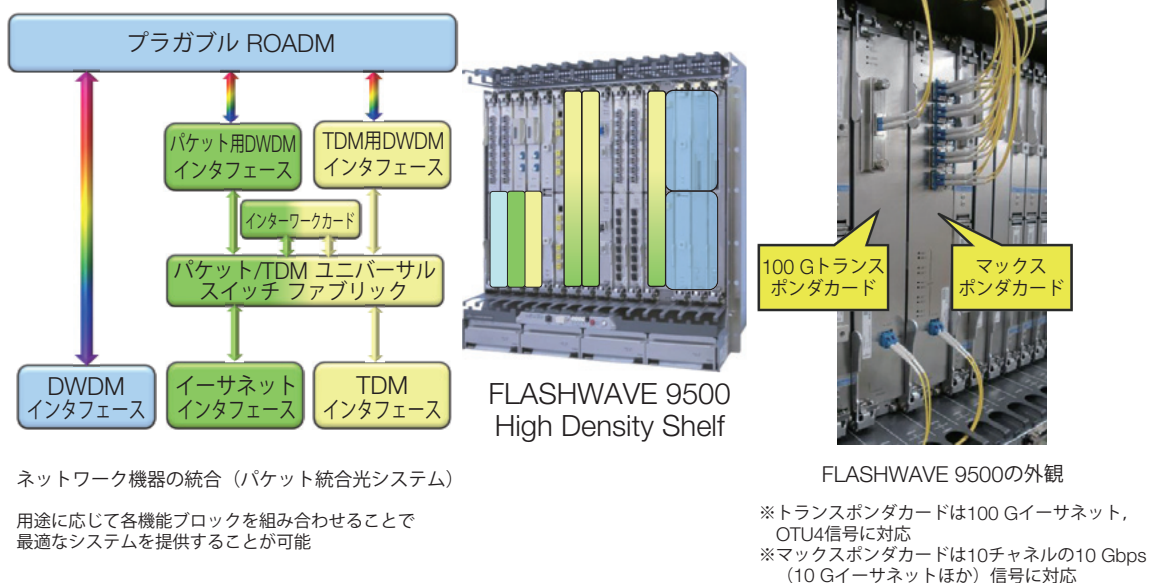


図-3 FLASHWAVE 9500の基本コンセプトと外観

の手を加えることなく100 Gbps信号へのアダプテーションが可能になった。また、中継回線のファイバ特性の測定や分散設計が不要となるため、建設コスト、保守運用コストの削減が可能となる。

現在、富士通ではTDMとIPのハイブリッドスイッチに加えて、次世代ネットワークで主流となると予想されているOTN（Optical Transport Network）スイッチのサポートと、スイッチの大容量化（TDM:960 G, Packet:1.2 T, OTN:2.4 T）の開発を行っており、今後更なるネットワークコストの削減に向けて取り組んでいく。

● 海底長距離伝送向けFLASHWAVE S660

FLASHWAVE S660は、従来装置であるFLASHWAVE S650の特徴を引き継ぎ、9000 kmを超える超長距離伝送、および大容量伝送を可能とし、高信頼で運用・メンテナンスが容易な海底端局装置である。

デジタルコヒーレント技術を適用した40 Gbpsの光信号を最大90波長まで収容することで、1本のファイバで3.6 Tbpsまでの大容量伝送を可能にし、高信頼性を実現するために信号品質に影響を及ぼす主要な構成部を冗長構成としている。90波長ものWDM信号の長距離伝送を可能にするためには、波長ごとに異なる伝送路の波長分散を個別に補償する必要があり、これまでは光学的な波長分散補償器を用いて波長ごとに最適化を行っていた。デジタルコヒーレント技術の適用により、受信側信号処理部での波長分散補償が可能となった。これにより、波長ごとの光学的波長分散補償の最適化が不要となり、機器構成・制御が簡略化された。

海底システムは長寿命であることから、初期導入時の運用回線が少ないケースも多々ある。仮に信号光が1波長の場合でも安定した高品質な伝送を実現するために、信号光の代わりとなるDummy Light機能も装備している。

9000 kmにもなる海底ケーブルにおいては、伝送路で減衰した光信号を増幅するための海底光増幅中継器が百台以上接続されている。各中継器の利得の波長依存性が累積することにより、受信したWDM信号では大きなレベル偏差を持つことになる。その偏差を補償するために、送信側で信号ごとに送信レベルを微調整するPre-Emphasis（プリエンファシス）機能も有している。

クライアント側のインタフェースはマルチレート構成であり、OTNをはじめとして、IP、SONET/SDHなどの様々な信号に対応できる。先に紹介したFLASHWAVE 9500との親和性も高く、海底・陸上システムを統合したシームレスなネットワークの構築が可能である（図-4）。

また、本装置は国際間の金融取引などで重視されている伝送遅延の少ないシステムの実現に貢献している。

今後の展望

今後、更に大容量化を目指した技術展開として、更なる多値変調技術、スペクトル帯域制限策の二つの技術軸（周波数利用効率向上策）がある（図-5）。

更なる多値変調技術としては、既に実用化されているDP-QPSK（2偏波×4値）から、更に無線通信の高度な変調技術の光通信への転用を進め、16QAMなどのように位相軸、振幅軸、偏波軸をフル活用して多値化していく方法がある。多値化は、信号あたりのスペクトル幅の拡大を抑え、周波数利用効率を上げるために極めて有効な技術である。

スペクトル帯域制限策としては、各信号スペクトルをナイキストフィルタ（シンボル干渉を軽減しつつスペクトル形状を狭帯域化する技術）で帯域制限することにより、各信号の占有帯域を狭めて信号間の間隔を圧縮し、高密度化する方法がある。また、これらがサブキャリアチャネルとなり、例えば、100 Gbps×4 chで400 Gbpsや、200 Gbps×5 chで1 Tbpsといったいわゆるスーパーチャネルを作り出す手法も提案されている。⁽⁴⁾ この高密度チャネル配置の運用を実現するには、グリッドレス化した新型の光挿入分岐装置（OADM）の開発が必須である。

上記のような周波数利用効率向上技術は、一般的に伝送距離性能とトレードオフの関係にもあり、コストを抑えた大容量化を実現するためには、これまで運用してきた伝送容量のチャネルでの伝送距離性能を維持・向上する手段が必須である。例えば、誤り訂正技術の向上による受信性能改善、非線形補償アルゴリズム適用による伝送波形劣化補償のような技術適用が近い将来に期待されている。

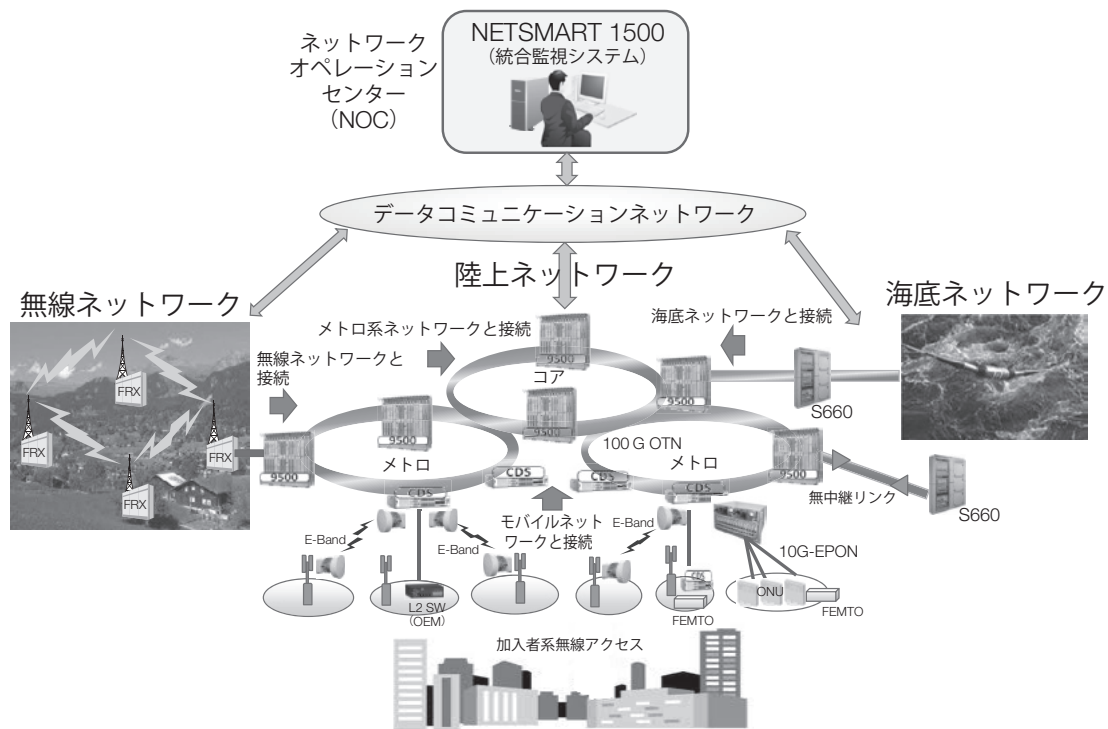


図-4 富士通の陸上・海底シームレスネットワーク

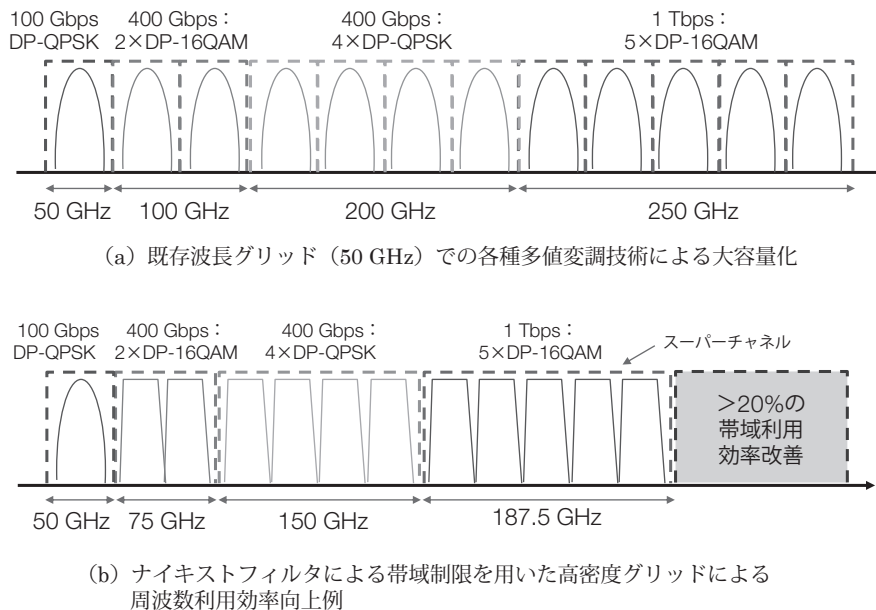


図-5 周波数利用効率の向上

また、更に将来には、伝送路ファイバのマルチコア化による空間多重、マルチモード化によるモード多重など、光ファイバ帯域をはるかに超えたエクサビットレベルの光通信インフラの実現に向けた高度な多重化伝送技術⁽⁵⁾が研究レベルで検討さ

れている。

以上のように、既に100 Gbps伝送技術を商用化し、更にネットワーク規模の飛躍的な拡大に直面している現在、次の伝送容量拡大技術を早期に確立して、実用化へと進めていくことが肝要である。

む す び

コア系ネットワークへ流入するトラフィックの容量膨張が喫緊の課題である中、富士通はデジタルコヒーレント技術の実用化を行い、陸上用として100 Gbps、海底用として40 Gbpsの超高速トランスポートシステムの製品化を行った。デジタルコヒーレント技術は光伝送において技術パラダイムシフトとも言える革新をもたらした。大容量化のみならず、ネットワークの劇的な運用向上とトータルコスト削減を可能とした。

今後、持続的に膨張し続けるトラフィックに対して、国内展開としてレイヤ統合装置の開発推進や海底システムへの100 G超高速トランスポートシステムの導入を図る。また、更なる周波数利用効率を追求し、400 G/1 Tbpsといった次世代に求められる大容量ネットワーク構築に向けた開発を進めていく計画である。

なお、本稿で紹介した富士通のデジタルコヒーレント伝送技術は、総務省委託研究「超高速光伝送システム技術の研究開発」、「超高速光エッジノード技術の研究開発」の技術開発成果を使用している。

参考文献

- (1) K. Kikuchi : Phase-Diversity Homodyne Detection of Multilevel Optical Modulation With Digital Carrier Phase Estimation. *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, Vol.12, No.4, p.563-570 (2006).
- (2) H. Nakashima et al. : Novel Wide-range Frequency Offset Compensator Demonstrated with Real-time Digital Coherent Receiver. 34th European Conference on Optical Communication (ECOC2008), Mo.3, D.4, September 2008.
- (3) E. Yamazaki et al. : Fast Optical Channel Recovery in Field Demonstration of 100-Gbit/s Ethernet over OTN Using Real-time DSP. *OPTICS EXPRESS*, Vol.19, No.14, p.13179-13184 (2011).
- (4) M. Jinno et al. : Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies. *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.11, p.66-73 (2009).
- (5) H. Takara et al. : 1.01-Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) Crosstalk-managed Transmission with 91.4-b/s/Hz Aggregate Spectral Efficiency. 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2012), Th.3, C.1, September 2012.

著者紹介



塩田昌宏（しおだ まさひろ）

ネットワークプロダクト事業本部フォ
トニクスプロダクト開発センター 所属
現在、100 G/400 G超高速トランスポー
トシステム開発に従事。



斉藤成明（さいとう しげあき）

ネットワークプロダクト事業本部北米
ビジネス事業部 所属
現在、超高速トランスポート製品企画
に従事。



横田 泉（よこた いずみ）

ネットワークプロダクト事業本部フォ
トニクスプロダクト開発センター 所属
現在、海底100 Gトランスポートシス
テム開発に従事。



荻原裕史（おぎわら ひろし）

ネットワークプロダクト事業本部フォ
トニクスプロダクト開発センター 所属
現在、次世代超高速トランスポート開
発に従事。



菅谷 靖（すがや やすし）

ネットワークプロダクト事業本部フォ
トニクスプロダクト開発センター 所属
現在、次世代光伝送方式設計に従事。