

信頼性と柔軟性を兼ね備えた 「知覚する光ネットワーク」

“Conscious Optical Network” with Reliability and Flexibility

● 野津靖子

● 青木泰彦

● 小牧浩輔

● 岡野 悟

あらまし

従来、通信キャリアネットワークでは、高速・大容量・長距離・高信頼が光ネットワークに対する最も重要と考えられる要求事項であった。近年は、コンテンツプロバイダーなどの様々なサービスプロバイダーが登場し、アプリケーションの多様化に伴って、運用の容易さ・柔軟性・効率化の重要度が急速に増している。このような要求の変化に対応するため、富士通は光ネットワークの状態を従来よりも高い精度でモニタリングし、状態に応じて最適な制御を行う「知覚する光ネットワーク」の実現に取り組んでいる。これは、簡易かつ迅速なサービスの立上げ、電力や信号品質の最適化制御、障害予兆検出・予防保守などを実現することで、光ネットワーク管理の煩雑さからの脱却とグリーン化を目指すものである。

本稿では、「知覚する光ネットワーク」の実現に向けた富士通独自の光DSP(Digital Signal Processing)独自技術であるライトプローブ技術とその効果について紹介する。

Abstract

The most important requirements in optical networks have been the high speed, large bandwidth, long transmission distance and reliability of optical fiber communications. In recent years, however, simplicity, flexibility and efficiency of network operation have been rapidly becoming more important as a wide range of applications are offered by emerging providers of content and other services. In order to respond to changing demand, Fujitsu is developing a conscious optical network that monitors the optical fiber communications at an unprecedented level of precision and optimizes the network operation accordingly. It aims to facilitate and speed up the service provisioning, optimization of power and signal quality, and early failure detection and protection/maintenance, thus relieving the optical network of complicated operations and making it environmentally more efficient. This paper introduces Fujitsu's unique light probe technology in the field of optical digital signal processing (DSP), and describes its effectiveness for the realization of the conscious optical network.

ま え が き

高速モバイル端末の急激な普及やインターネットユーザーの世界的増加により、通信トラフィックは年平均成長率約23%で増加している⁽¹⁾。この急激な通信トラフィックの増加に対応するため、基幹系の光ネットワークの高速・大容量化が進展し、現在は1波長あたり100 GbpsのDWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) 光伝送システムが商用化されている。今後も通信トラフィックの継続的な増加が予想されており、光ネットワークの更なる高速・大容量化の要求は今後も高まっていくと考えられる。また、光ファイバーあたりの伝送容量の増加は、障害発生時の波及規模が大きくなることも意味しており、今まで以上に光ネットワークの高信頼性が重要となる。

一方、サービスプロバイダーの動向としては、従来から通信サービスを提供している全国規模のネットワークを保有する通信キャリアに加え、Over The Top (OTT) と称されるコンテンツプロバイダーがサービス事業者として通信キャリアと競合するようになってきている。それに伴い、光ネットワークを自ら構築するプロバイダーや、他社の通信インフラを用いて通信サービスを提供するVNO (Virtual Network Operator) などのネットワーク運用形態も多様化が進んでいる。そのため、従来の高速・大容量・高信頼性といった光ネットワークの要求事項に加え、構築・運用の容易性、柔軟性・効率性の重要度が急速に増している。

従来のDWDM装置では、波長や経路はあらかじめ決められた固定ポートに接続することで設定していた。それに対し、遠隔から任意に波長や経路を設定できるCDC-ROADM (Color-less/Direction-less/Contention-less Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer) や、光ネットワークの制御基盤を提供するSDN (Software Defined Networking) は、光ネットワークの柔軟性を高め、サービス提供の迅速化をもたらす技術として開発・製品化が進められている。

従来の光ネットワークは、事前設計によりあらかじめ伝送品質を保証できるネットワーク構成で固定的に運用することにより、高い信頼性を担保してきた。一方、上述の技術を用いることで、光

伝送信号の経路変更が頻繁に行われると、光ネットワークの状態は絶えず変化することになる。そのため、今後はサービス提供のスピードを損なわず、信頼性と柔軟性を同時に維持することが大きな課題となる。

富士通では、柔軟な光ネットワークの提供とともに、ネットワーク全体を常に把握・分析・制御することにより、いかなるネットワークの状態でも最適な信号品質を維持できる光ネットワークの実現を目指している。これが「知覚する光ネットワーク」である。

本稿では、「知覚する光ネットワーク」の実現方法とその提供価値について述べる。

知覚する光ネットワーク

「知覚する光ネットワーク」とは、光ネットワークの状態を、従来よりも高い精度でリアルタイムに把握・分析し、様々なユーザーポリシーに基づいたネットワークの最適化制御を自立的に行うネットワークである。「知覚する光ネットワーク」のアーキテクチャーを図-1に示す。

従来の光伝送装置および光ネットワークには、各チャネルの光強度を測定する光チャネルモニタや受信機でのエラーレート用のモニタなどが具備されていた。しかし、OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) などの信号品質に関する詳細なパラメーターや伝送路に関する特性をモニタリングするには、光スペクトラムアナライザーなどの高価な測定器が必要である。また、実サービスでの高い精度での測定は、波長パス配置などの制約により困難であった。

富士通の独自技術であるライトプローブは、伝送路の物理パラメーターやノードの実特性、更には信号品質とその要素パラメーターを測定するモニタをCDC-ROADMノードに具備している。これにより、ライトプローブ用の測定信号や、実サービス中の光信号をモニタすることで、実時間でのネットワーク状況を安価に高精度に測定できる。

ライトプローブによりモニタリングされたデータをネットワークレベルで蓄積し、SDNコントローラーおよびその上位アプリケーションによって、光の物理特性や経時的なネットワーク運用状態を加味しながら分析する。これにより、実際の伝送

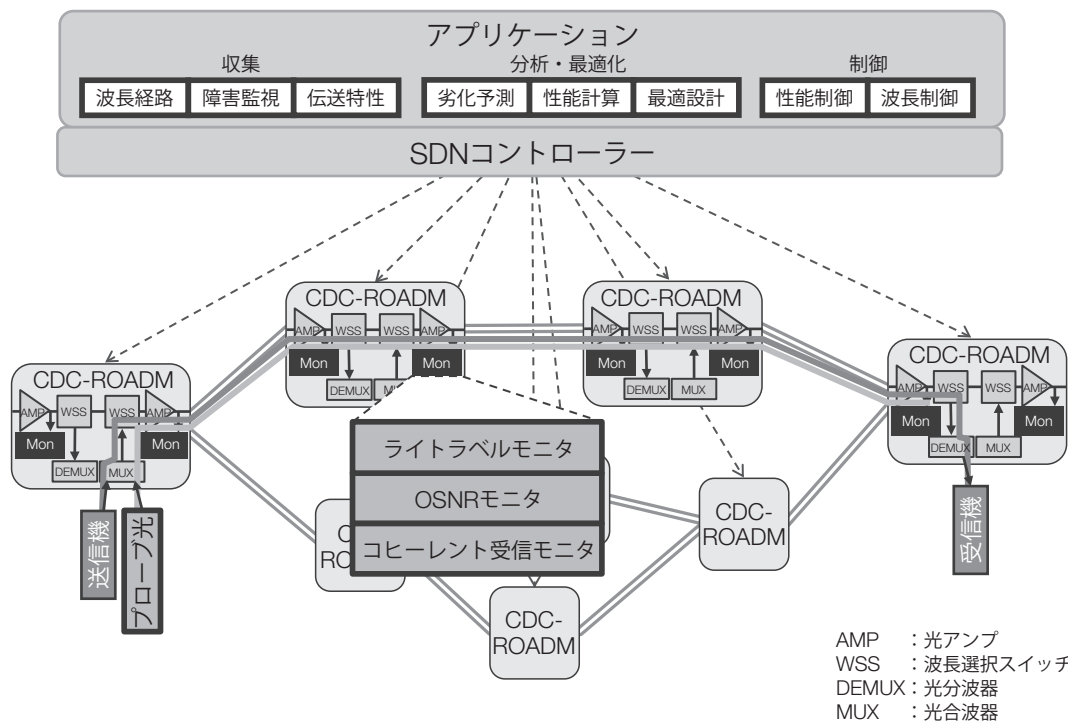


図-1 知覚する光ネットワークのアーキテクチャ例

路の物理パラメーターやノードの特性を特定できる。また、各種信号品質パラメーターの時間的変動や相関関係などを分析・抽出することで、例えば、信号品質劣化の要因と箇所を特定したり、劣化の傾向から今後の運用品質を推定したりすることで、発生した障害の切り分けだけでなく、予兆保守も可能となる。

また、ライトプローブによる光伝送特性に関するモニタ情報と、ノード消費電力、遅延、波長使用状況といった情報とを組み合わせることで、一定の信号品質を保ちつつ、ユーザーやサービスにより異なる要件（例えば、伝送性能、伝送容量、消費電力、遅延など）に応じた信号経路や変調技術などの最適化制御が可能となる。

ライトプローブ技術は、ライトラベル、インバンドOSNRモニタ、コヒーレント受信モニタの大きく三つからなる。詳細は、以降の「ライトラベルによる光パストレース技術」「サービス運用中の光信号品質モニタ」「デジタルコヒーレントを利用したモニタ」の章で記載する。

知覚する光ネットワークの提供価値

「知覚する光ネットワーク」を適用することで、

以下に示すような様々な価値をお客様へ提供し、安心・安全かつ経済的なネットワークを構築・運用いただくことが可能になる。

(1) 障害予兆検出および予防保守による障害の撲滅

モニタ情報を常時収集して品質変化の傾向を分析することで、障害予兆と障害箇所を予測し、ネットワーク全体の信号品質が最適になるようにルート変更などの予防保守を行う。これにより、ユーザーサービスへの影響を最小化するだけでなく、計画的な保守による運用コストの削減を提供する。

(2) 迅速なサービスの立上げと簡易なネットワークの管理・運用

ネットワーク構築時に送信端を特定するライトラベル情報をモニタリングすることで、ファイバーの誤接続や誤設定を自動で検出できる。また、光信号品質モニタにより光パス接続の確認が可能となる。これらにより、初期立上げ時間を短縮できる。

(3) 伝送性能・伝送容量の最適化制御による機器コストの最小化

モニタ情報を収集・分析することで伝送路やROADMの実特性を特定し、設計パラメーターとして自動フィードバックする。これにより、余剰

なマージンを排除した高精度な設計が可能となり、ネットワークの機器コストを最小化する。

(4) 低消費電力化

光信号品質情報と併せて消費電力モニタ情報を収集・分析することで、ネットワーク全体として信号品質に影響しないよう光特性を制御し、消費電力の効率化を実施する。

ライトラベルによる光パストレース技術

柔軟な波長パスの設定が可能なCDC-ROADMノードとそれらを用いたネットワークにおいて、同一波長が光分岐挿入用スイッチの隣接するポートから動的に設定されるようなケースを想定する。この場合、既存の装置に導入されている光チャネルモニタ機能（光強度モニタ）では、ROADMノード内での誤接続の原因や障害発生箇所の切り分けを遠隔点で行うことが困難である。筆者らはDAC (Digital to Analog Converter) を具備したユニバーサルランシーバ⁽²⁾により、デジタル信号処理部においてライトラベル信号（低速な周波数変調信号）を主信号に重畳する方式と、主信号を終端することなく重畳された信号のみをCDC-ROADMノードでモニタする光パストレース技術を提案し

ている⁽³⁾。その重畳原理を図-2に、復号原理を図-3に示す。周波数変調信号の主信号への重畳は、送信側DSP (Digital Signal Processing) でのキャリア周波数変調処理によって行われ、DSPにより生成された信号を基にDACによって光IQ変調器を駆動することにより、周波数変調に応じた主信号スペクトルの偏移 (Δf) が生じる。また、周波数変調信号は、各CDC-ROADMに配備されるライトラベル受信機における、光フィルターの波長選択性、およびフィルター透過スペクトルと主信号スペクトルの各中心周波数のオフセットの関係から、周波数偏移量が強度偏移量に変換されることによって、強度変調信号として受信される。

サービス運用中での光信号品質モニタ

ユーザーの要求に応じて、CDC-ROADMを介して動的に経路設定を行う場合の伝送品質モニタとして、筆者らはインバンドOSNRモニタを提案した。本モニタは、前章で示した光パストレース受信機と同様な構成である、波長可変フィルターとPD (Photo Detector), DSPから構成される。その原理図を図-4に示す⁽⁴⁾。図では、二つのサブキャリアで構成されるスーパーチャネル信号のOSNR

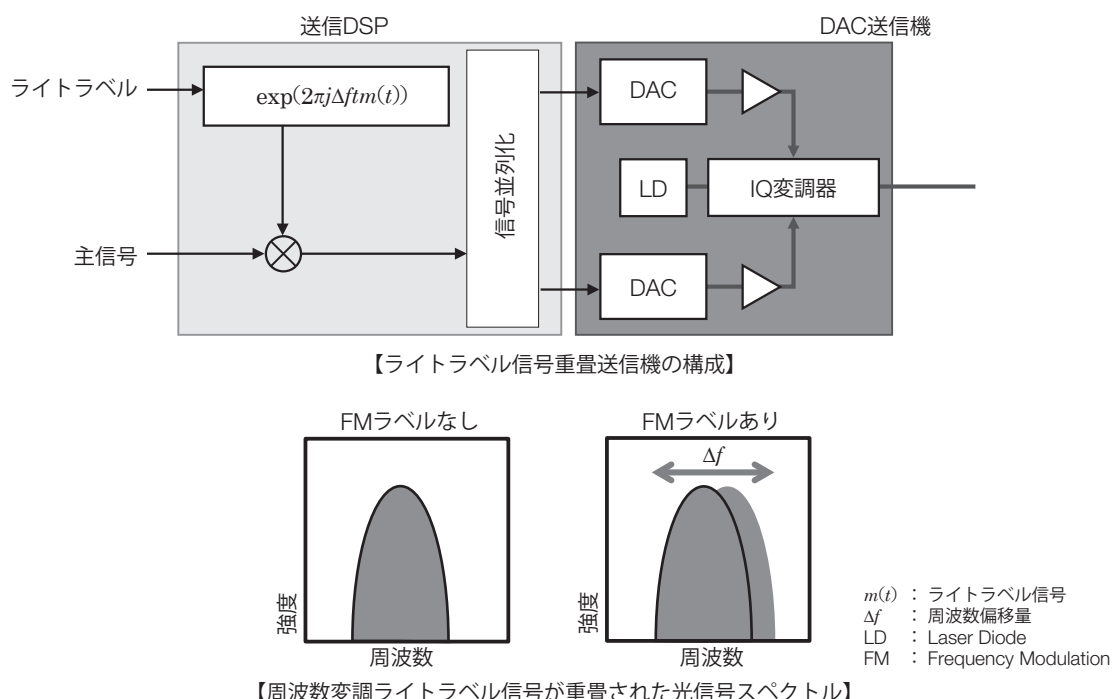


図-2 ライトラベル信号の重畳原理

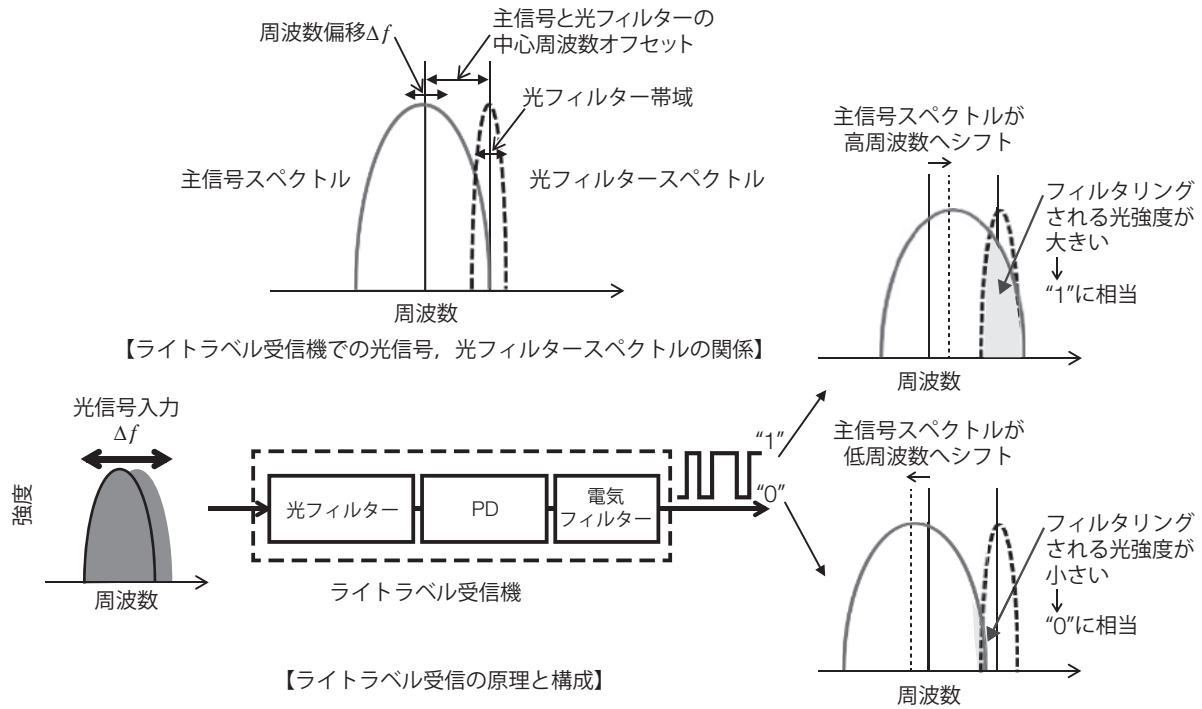
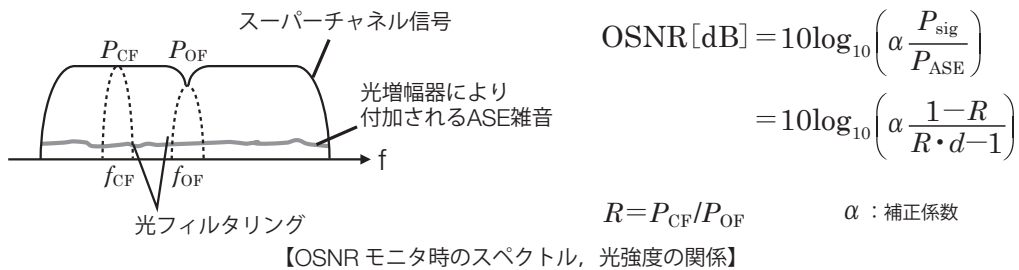
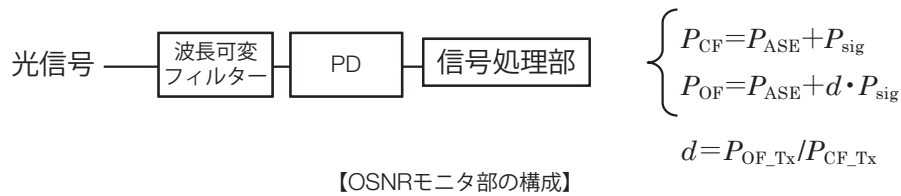


図-3 ライトラベル信号の復号原理

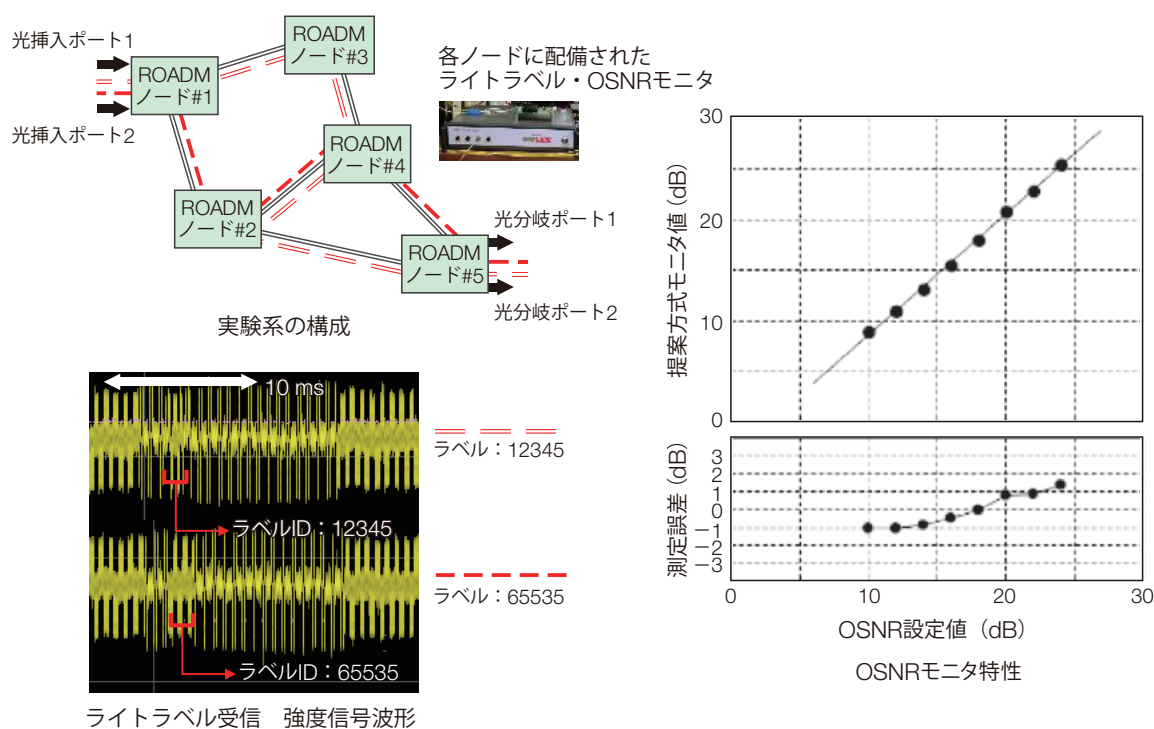


- P_{sig} : 信号光の光強度
- P_{ASE} : 光増幅器により付加されるASE (Amplified Spontaneous Emission) 雑音光の強度
- P_{CF} : OSNRモニタでのサブキャリア中心周波数 (CF: Center Frequency) f_{CF} の強度
- P_{OF} : OSNRモニタでのサブキャリアオフセット周波数 (OF: Offset Frequency) f_{OF} の強度
- P_{CF_Tx} : 光送信機におけるサブキャリア中心周波数 (CF: Center Frequency) f_{CF} の強度
- P_{OF_Tx} : 光送信機におけるサブキャリアオフセット周波数 (OF: Offset Frequency) f_{OF} の強度

図-4 OSNRモニタの動作原理

モニタ法を示している。入力光信号は、サブキャリアの中心周波数 f_{CF} 、およびサブキャリア間の中心からオフセットした周波数 f_{OF} において、それぞれ波長フィルターを透過する。そして、信号光強

度 P_{CF} と光増幅器により付加されるASE (Amplified Spontaneous Emission) 光強度 P_{ASE} の成分を含む P_{CF} 、 P_{OF} がそれぞれモニタされ、その比率 R と信号のスペクトル形状に依存するパラメーター d 、補



「Demonstration of Integrated Optical Path Monitoring Sub-system in CDCG-ROADM Network」⁽⁵⁾で掲載の図を基に作成

図-5 ライトラベル信号、OSNR統合モニタシステム評価

正係数 α からOSNR値が算出される。

上述したパストレース機能、およびOSNRモニタの検証のため、5台のCDC-ROADMノードによって構成されるテストベッドを用いて実験を行った⁽⁵⁾。その構成と受信ライトラベル信号波形、およびOSNRモニタ測定精度の結果を図-5に示す。送信ROADMノード1の装置内で隣接する挿入ポートから異なるファイバー経路およびROADMノードを通過して、受信ROADMノード5での隣接する分岐ポートで受信される112 Gbps DP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying) 信号の異なる波長パスに対して、10 kbpsの通信速度で異なる二つのライトラベル（ラベル=12345, 65535）を含む128ビット長の周波数変調信号を重畳した。この際に、全ての中継ROADMノードでの伝送路入出力モニタポート、および受信ROADMノード5でのドロップポートにおいて、ライトラベルをエラーフリーで検出した。また、各ノードに配備されるOSNRモニタでのモニタ値に関しても、設定した値に対して誤差1.5 dB以下を実現している。

これらの光モニタ技術を駆使することで、特に400 G, 1 T級のスーパーチャネル伝送技術におい

て、スーパーチャネル内の各サブキャリアの光信号品質をOSNRモニタによって知覚し、最適化⁽⁶⁾することで、更なる伝送距離の長延化が可能になる。

デジタルコヒーレントを利用したモニタ

デジタルコヒーレント方式の受信部では、局発光、光位相ハイブリッド、光電変換器で構成された光フロントエンドから抽出された光電界情報をAD変換し、伝送路で発生する歪み^{ひず}に対してデジタル信号処理を行うことにより、受信信号を等化・復調している。このデジタル信号処理部に用いられている適応等化フィルターのタップ係数を解析することで、光ファイバー、およびCDC-ROADMノード中で発生する歪みの要因であるPMD (Polarization Mode Dispersion), PDL (Polarization Dependent Loss) などのリアルタイムでのモニタリングが可能となる。図-6は、シングルモードファイバーで40 km×15 spanの伝送路系において、100 Gbps DP-QPSK信号を処理しているLSIの適応等化フィルター係数によりPMD、およびPDLをモニタした実験結果である。伝送路系に入れたPMDとPDLの発生量に対して、モニタ

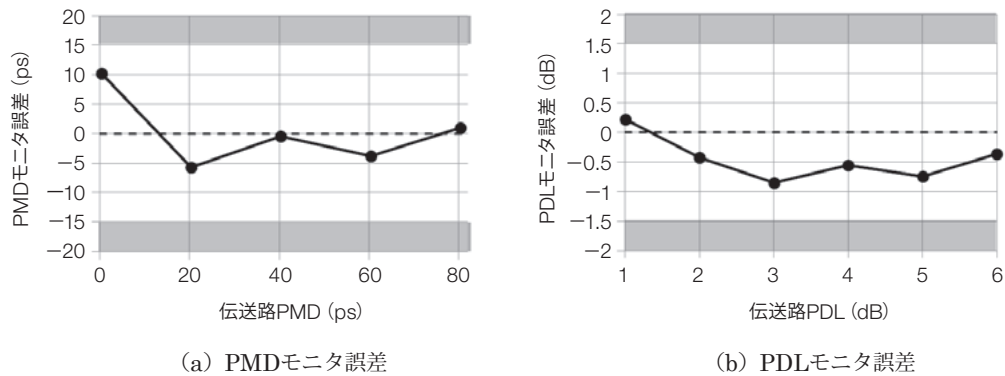


図-6 PMDモニタ誤差とPDLモニタ誤差の実測値

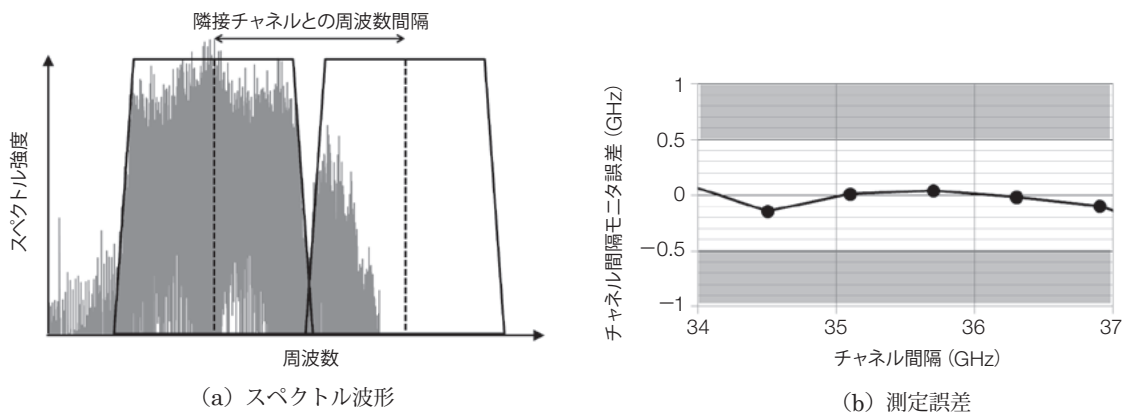


図-7 波長間隔モニタのスペクトル波形と測定誤差

精度はそれぞれ、PMDは ± 10 ps (ピコ秒)、PDLは ± 1.0 dBであることが明らかになった。これらの伝送品質を劣化させるファイバー歪みの原因を直接モニタし、OSNRモニタと組み合わせることでマージンを排除した高精度な伝送設計が可能となる。

ファイバーあたりの伝送容量を増大させるため、送信部のデジタルフィルタで帯域狭帯域^{きょうさく}を行うナイキストフィルタリングが提案されている。これは、帯域利用効率を高める手法であるが、正確にチャンネル間隔を設定しないとチャンネル間クロストークによる劣化が生じる。しかし、現在、標準化が進んでいるITLA (Integrated Tunable Laser Assembly) によると、レーザーの設定波長精度のマージンを確保した波長配置 (5 GHz以上) では、帯域利用効率が低下してしまう。この課題を解決する手段として、筆者らはデジタルコヒーレント方

式の受信部でキャプチャーされた主信号のデータをFFT (Fast Fourier Transform) 解析することで、隣接チャンネルとの間隔をモニタリングし、送信部へフィードバックする手法を提案した。図-7(a)は、本手法によりキャプチャーされたスペクトル波形である。スペクトルには隣接チャンネルのスペクトルデータも見えており、この間隔を読み取ることでチャンネル間隔をモニタすることが可能となる。図-7(b)は、本手法で取得されたチャンネル間隔モニタの実機検証結果である。ターゲットとしている周波数間隔でのモニタ精度は、0.5 GHzが実現できており、このモニタ結果を基に送信機側へのフィードバック制御を行うことで、本制御を行わない場合 (5 GHz) と比較して、およそ10%の帯域利用効率増加が実現できる。

これらのデジタルコヒーレントを利用したモニタは、ほぼ現状の送受信機の構成と同等である。

したがって、特別な測定器などがなくても各ノードに配備された送受信機を用いることで、ノードごとのリアルタイムでのモニタ値を示すことも可能となる。

む す び

本稿では、富士通の光ネットワークが目指す「知覚する光ネットワーク」とその提供価値について述べた。「知覚する光ネットワーク」は、富士通独自のライトプローブ技術により、迅速なサービス提供、信号品質の維持と障害撲滅といった価値を提供するアーキテクチャーである。

従来の光ネットワークは、物理特性の把握と最適制御には人手が必要であった。本技術は、その自動化を実現するものである。今後は、光特性の制御にとどまらず、伝送路の状態に応じて、ドメインの異なるほかのネットワーク（例：モバイル網、IP網）の帯域制御を併せて行うことで、よりネットワーク全体の可用性を高めるなど、広く適用可能な技術である。

本研究の一部は、国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）委託研究「大規模フラットネットワーク基盤技術の研究開発」により実施したものである。

参考文献

- (1) Cisco Systems : Cisco Visual Networking Index (VNI) : 予測と方法論, 2014 ~ 2019年.
http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/literature/pdf/white_paper_c11-481360.pdf
- (2) Y. Aoki et al. : Dynamic and flexible photonic node architecture with shared universal transceivers supporting hitless defragmentation. ECOC 2012, We.3.D.2, September 2012.
- (3) T. Tanimura et al. : Superimposition and detection of frequency modulated tone for light path tracing employing digital signal processing and optical filter. OFC2012, OW4G.4, March 2012.
- (4) S. Oda et al. : In-band OSNR Monitor Using An Optical Bandpass Filter and Optical Power Measurements for Superchannel Signals. ECOC2013, P.3.12, September 2013.
- (5) G. Nakagawa et al. : Demonstration of Integrated Optical Path Monitoring Sub-system in CDCG-ROADM Network. ECOC2014, P.4.1 September 2014.
- (6) O. Vassilieva et al. : Systematic Analysis of Intra-Superchannel Nonlinear Crosstalk in Flexible Grid Networks. ECOC2014, Mo4.3.6, September 2014.

著者紹介



野津靖子 (のづ やすこ)

ネットワークプロダクト事業本部プロダクトインテグレーション統括部 所属
現在、次世代光通信ネットワーク・光通信システムの企画開発に従事。



小牧浩輔 (こまき こうすけ)

ネットワークプロダクト事業本部第一オプティカルシステム事業部 所属
現在、400 G/1 Tを含む次世代送受信機基盤技術の開発に従事。



青木泰彦 (あおき やすひろ)

ネットワークシステム研究所
次世代光通信プロジェクト
兼 ネットワークプロダクト事業本部プロダクトインテグレーション統括部 所属
現在、次世代光ネットワークアーキテクチャーの研究に従事。



岡野 悟 (おかの さとる)

ネットワークプロダクト事業本部プロダクトインテグレーション統括部 所属
現在、次世代光システムアーキテクチャーの開発に従事。