

5Gサービスを支える 光ネットワーク技術

Optical Network Technologies for Enabling 5G Services

● 小田 祥一郎 ● 斉藤 卓 ● 西村 和人 ● 早川 明憲

あらまし

5G(第5世代移動通信システム)が、2020年頃の実用化に向けて開発が進められている。5G時代では、高精細動画の配信、低遅延性が必須である自動運転、IoTによって多種多様な機器をつないだデータの利用など、新技術を活用したサービス(5Gサービス)が展開される。5Gサービスを支える社会基盤となる光ネットワーク(5G光ネットワーク)においても、様々な技術を用いる必要がある。そこで、富士通は大容量データを効率良く低遅延に伝送する技術や、複雑なネットワーク運用を自動化する技術などを開発している。

本稿では、5G光ネットワークの課題を述べ、課題の解決に向けて富士通が開発した技術を紹介する。

Abstract

The development of the fifth generation (5G) mobile network system is underway, with commercialization expected around 2020. The 5G era anticipates services based on new technologies (5G services), including the distribution of high-definition videos, autonomous vehicles enabled by low-latency connections, and IoT-based multi-device connections and data sharing. Being part of the social infrastructure that will support 5G services, optical networks (5G optical networks) will also require an array of technologies. Therefore, Fujitsu is developing a technology to efficiently transmit large volumes of data with low latency, a technology to automate complex network management, and so on. This paper outlines the challenges pertaining to 5G optical networks and describes the technologies that Fujitsu has developed to address these challenges.

ま え が き

第4世代移動通信システムの実現とスマートフォン、タブレットなどの端末の普及により、ビデオチャットや動画・音楽のストリーミングが提供されるようになった。また、データセンター（DC）上で実現されるクラウドサービスの普及に伴い、様々なサービスを短時間で実装し、提供することが可能となった。これらを背景に、データトラフィックは年率130%程度で増加し続けている。このトラフィック需要に応えるために、都市間やDC間を接続する幹線系の光ネットワークでは、1波長あたり100 Gbpsクラスの光伝送装置が稼働している。

一方、5G（第5世代移動通信システム）が、2020年頃の実用化に向けて開発が進められている。5G時代では、高速性が求められる高精細動画の配信や、VR（Virtual Reality）によるサービス、低遅延性が必須となる自動車の自動運転や工作機械の遠隔操作、多種多様な機器を接続するIoTといった新技術を活用した新しいサービス（5Gサービス）が展開される。これらの5Gサービスを支える社会基盤となる光ネットワーク（5G光ネットワーク）では、主に以下の三つの技術が求められる。

- (1) 爆発的に急増するデータトラフィック需要に対して、効率良く大容量通信を行うための光送受信器技術。
- (2) 自動車の自動運転や工作機械の遠隔操作などのアプリケーションを実現する低遅延ネット

ワーク技術。

- (3) 様々な5Gサービスを効率的に提供するための、フレキシブル光ネットワーク技術および光ネットワーク運用の簡易化・自動化技術。

富士通では、5Gサービスの普及に貢献するため、上述した光ネットワーク技術の研究開発を推進している。

本稿では、まず5G光ネットワークの課題を述べ、それに必要とされる技術に対する富士通の取り組みを紹介する。

5G光ネットワークの課題

5Gにおける光ネットワーク（以下、5G光ネットワーク）の概要を図-1に示す。従来の光ネットワークでは、通信事業者はアクセス網においてスマートフォンに代表されるモバイルサービスや、一般家庭向け有線サービスを提供している。地域内を接続するメトロ網のエッジノードは、これらのサービスを多重化することで、100～200 Gbpsクラスの高ビットレート信号に集約している。更に、大都市間やDC間を接続するコア網において、長距離大容量通信のサービスを提供している。

一方、5G時代では、高精細動画の配信、自動車の自動運転、多数のセンサーによるIoTサービスを提供するため、膨大な量のデータがDCに蓄積される。したがって、エンドユーザーからDCの間だけではなく、DC間の光ネットワークを流れるデータトラフィックが急増すると予想される。

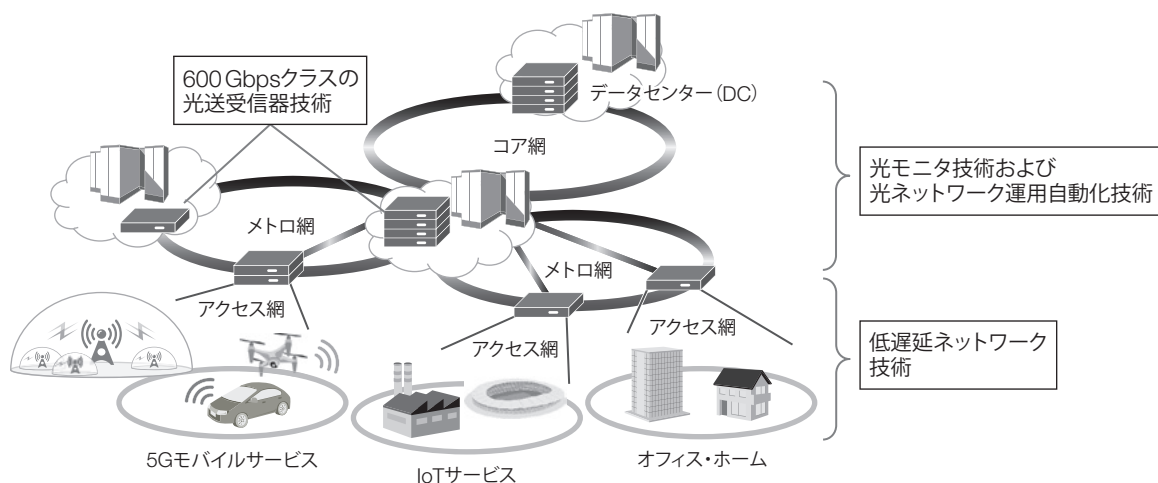


図-1 5G光ネットワークの全体像

このデータトラフィックの需要に対して、効率良く大容量通信を行う光送受信器に関する技術が重要となる。また、限られた通信局舎スペースに大容量化に対応した通信装置を収容するためには、光送受信器の小型化や低消費電力化も大きな課題である。

更に、自動車の自動運転や遠隔医療といった超低遅延性を求められるアプリケーションが検討されている。その一方で、製造業や農業などの分野ではセンサー情報を活用したIoTサービスも加速度的に増加すると考えられる。このように、様々な要件を持ったトラフィックを効率的に収容するためには、有線・無線を統合した新しいアクセスパケットネットワークの構築が必須である。特に、超低遅延性をいかに実現するかが重要な課題となる。

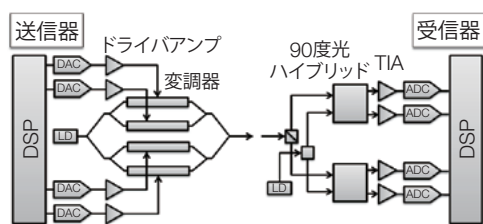
また、多様な5Gサービスの需要に対応するためには、フレキシビリティの高い光ネットワーク機器を配置し、効率的なネットワーク制御を行うことが不可欠と考えられる。つまり、このようなフレキシブルな光ネットワークを実現するためには、ネットワークの状態をモニタし、その状態に適したネットワーク構成に自動で機器設定を変更する技術が求められる。

以下の章では、上記で述べた課題を解決するために富士通が開発した、600 Gbpsクラスの光送受信器技術、低遅延ネットワーク技術、光モニタ技術、および光ネットワーク運用自動化技術について述べる。

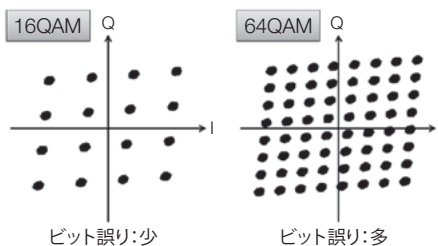
600 Gbpsクラスの光送受信器技術

富士通では、多値化と補償技術による通信の大容量化と、集積フォトニクス技術による高密度化、低消費電力化により、5Gサービスを支える600 Gbpsクラスの光送受信器の開発を進めている。600 Gbpsクラスの光送受信器では、従来よりも高い変調速度（Baud rate）と、従来よりも変調多値度の高い変調方式が必要となる。例えば、1波長あたり200 Gbpsの光送受信器と比べると、変調速度は32 Gbaudから64 Gbaudへと2倍に増加し、変調多値度は8 bit/symbolから12 bit/symbolへと1.5倍に増加する。

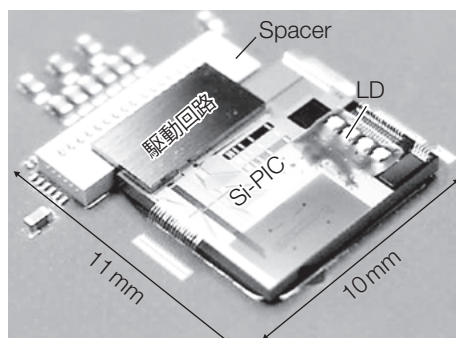
光送受信器の基本的な構成を図-2（a）に示す。光送受信器で高い変調速度と高い変調多値度を有する信号を取り扱う上では、デジタルアナログ（DA）コンバーターおよびアナログデジタル（AD）コンバーターの高速度化、デバイスの広帯域化など、



(a) 光送受信器の基本構成



(b) 16QAM(左)および64QAM(右)の信号コンスタレーション



(c) 16チャネル集積フォトニクス光送受信試作機

DAC : Digital-to-Analog Converter
ADC : Analog-to-Digital Converter
DSP : Digital Signal Processor
LD : Laser Diode
TIA : Trans Impedance Amplifier
QAM : Quadrature Amplitude Modulation

図-2 600 Gbpsクラスの光送受信器技術の概要

各構成要素の進化がまず前提となる。これに加えて、波形歪や雑音などによって引き起こされる特性劣化を補償する技術に対して、より一層の進化が求められる。

例えば、64QAMのような高次多値変調においては、わずかな波形の歪みがビット誤り率（BER：Bit Error Ratio）を著しく劣化させる。図-2（b）は信号コンスタレーションと呼ばれ、変調信号のシンボル位置関係を、複素平面上にプロットしたものである。シンボル間距離が近い場合、わずかな波形の歪みによって隣接するシンボルとして誤判定されてしまうため、ビット誤りが生じやすい。そのため、わずかな波形の歪みさえも生じないように、高い精度で補償する技術が求められる。

コヒーレントデジタル信号処理（DSP）回路は、波長分散や偏波変動など、伝送路で生じる様々な伝送負荷を補償する機能を備えている。これに加えて、送信器と受信器で生じる劣化を補償する役割も担っている。

その一つとして、線形歪を補償するための線形等化器（Linear Equalizer）が送信側と受信側に具備されている。これはタップ付遅延線などで実装され、信号と各タップとの畳み込み演算を行うことで、所望の波形へ近づくように等化を行うものである。タップ係数の導出では、例えば、測定信号と参照信号の2乗誤差を最小にするMMSE（Minimum Mean Square Error）と呼ばれるアルゴリズムが用いられる。本等化技術を適用することで、高品質な600 Gbpsクラスの光信号の送受信が可能となる。

続いて、光送受信器の小型化につながる集積技術について説明する。前述したとおり、通信局舎のスペースは限られているため、通信装置の小型化も重要な課題である。富士通では、現在開発中の600 Gbpsクラスの光送受信器の小型化、低消費電力化を目指して集積フォトニクス技術を開発している。

従来の光送受信器は、LiNbO₃変調器（LN変調器）や集積波長可変レーザーモジュールといった個別のサブモジュール・部品をケース内に組み込むことによって構成されている。このような構成では、各部品の性能、信頼性を個別に担保できるため、モジュール全体の設計面において有利である。一

方、サブモジュールの大きさや、サブモジュール間の電氣的・光学的な接続が光送受信器のサイズや消費電力を制限している。例えば、サブモジュール間の信号伝送では信号の高速化に伴う電力の増大が、モジュール内の光学系では光学部品のサイズや点数が大きな問題となっている。

これらの問題解決に向けて、シリコン（Si）基板をプラットフォームとした、Siフォトニクス技術をベースに、半導体レーザー光源や光変調器、受光器といった光デバイスをSi基板上に集積したSi光集積回路（Si-PIC：Silicon Photonic Integrated Circuit）とする集積フォトニクス技術を開発している。Si-PICを用いた集積フォトニクスには、以下の特長がある。

- （1）Si光導波路の高い屈折率差による各光デバイスの小型化、Si-PICへの高密度集積化。
- （2）Si光導波路による各光デバイス間の光学接続と、それによる光学系の簡略化・小型化。
- （3）Si製駆動回路とのフリップチップボンディング接続による高密度実装と、電気配線長の短尺化、電気信号品質、電源品質の向上。

これらの特長を持つ光送受信器を図-2（c）に示す。集積フォトニクス技術を用いて25 Gbps、16チャネルの光送受信器を高密度集積したSi-PICに、フリップチップボンディングで駆動回路を接続することで、363 Gbps/cm²（10×11 mm²のフットプリントで400 Gbps）の高密度化を達成した^{（1）}

また、個別の光デバイスの小型化を実現するだけでなく、集中定数駆動による光変調器の省電力動作^{（2）}や、低静電容量による受光器の高速動作といったデバイス特性の向上も期待できる。

低遅延ネットワーク技術

現在、従来の基地局（eNB：e-Node B）が基地局機能（CU：Centralized Unit）と無線アンテナ機能（DU：Distributed Unit）に分離され、MFH（Mobile Front Haul）網で接続されるC-RAN（Centralized Radio Access Network）構成化が進められている（図-3）。

富士通では、5Gサービスを提供するアクセス網は、上述したC-RANも包含した有線・無線統合型パケットネットワークに進化していくと考えている。このような統合型ネットワークでは、様々な

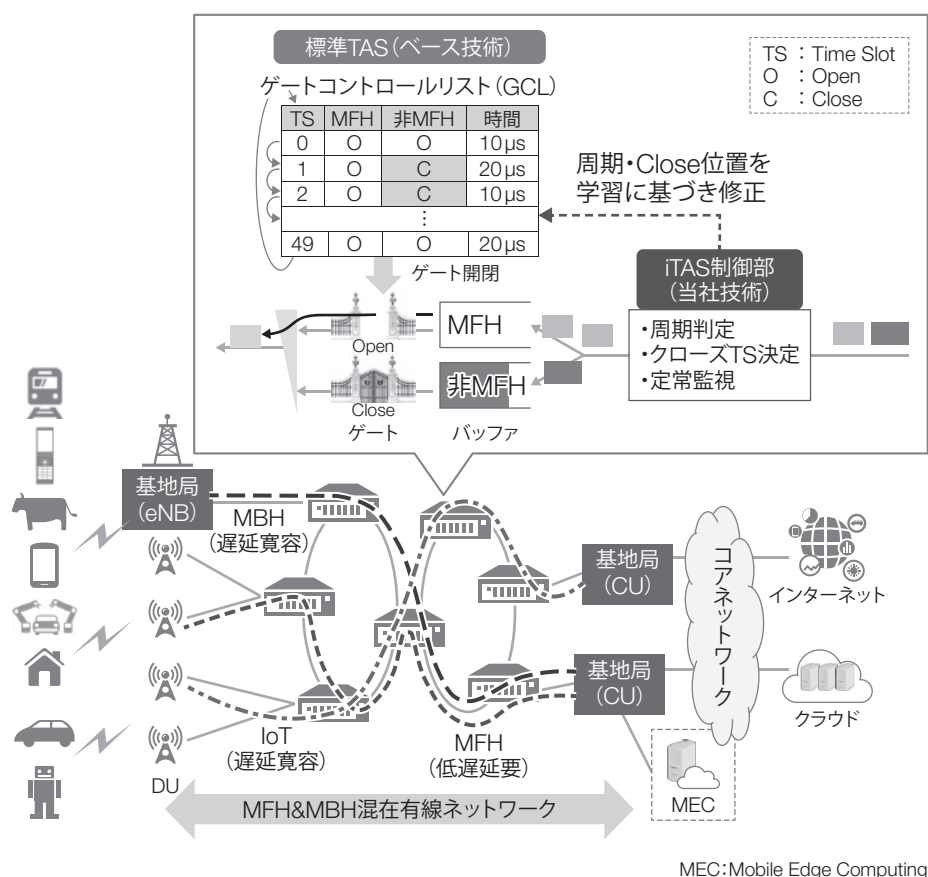


図-3 5Gモバイルアクセス網におけるiTAS方式

特性や要件を持つトラフィックが同一ネットワーク上を流れることになる。このため、パケットネットワークにおいて低遅延を実現できる IEEE 802.1TSN（Time Sensitive Networking）⁽³⁾ という標準に注目している。

IEEE 802.1TSN とは、TSN Task Group によって検討されている標準の集合体であり、同期関連、キューイング関連、帯域予約関連など、広い分野において超低遅延と高可用性を目的とした仕様化を行っている。IEEE 802.1TSNにおいて、MFHの低遅延化に直接的に関与している標準は、802.1CM（TSN for Fronthaul）であり、MFH網要件の収集、ほかのTSN標準のどれを取り込むかなどが検討されている。

本標準ではMFH網に対して100 μ s以下の遅延性能が要求されている。また、パケットスイッチの遅延削減に直接効果のある標準として、802.1Qbu、802.3br（Preemption）や802.1Qbv（TAS：Time Aware Shaper）といったキューイング関連の標準

が存在する。

PreemptionとTASは、いずれも従来技術では回避できなかったパケットの衝突による遅延を低減することを目的とした技術であるが、一長一短があり適材適所による使い分けが肝要である。しかし、TASは単に機能を実装しただけでは低遅延を実現できない。

図-3を用いてこの理由を簡単に説明する。標準のTASは、クラスごとのゲートとその開閉タイミングを規定するゲートコントロールリスト（GCL）により構成される。これを用いて、低遅延トラフィック（MFH）が到着するタイミングで、それ以外（非MFH）のゲートをクローズとすることで、パケットの衝突を回避しようというものである。しかし、これを実現するためにはCUやDUから送出されるMFHトラフィックの周期・タイミングをあらかじめ把握し、GCL上に適切にOpen/Close設定しなければならない。

また、それはMFHの経路上の全てのスイッチに

において実施する必要がある、更にはノードの増減があった場合、全てのタイミングを設定し直さなければならない。これらを人手で事前に設定することは極めて難しく、TASはその実現性において大きな課題があった。

そこで、事前の細かい設定を必要としない運用後スイッチが自律的にMFH到着タイミングを学習し、GCLを修正するIntelligent TAS (iTAS) 方式を考案した(図-3)⁽⁴⁾。これは、以下の三つのフェーズにより機能するものである。

- Time Slot (TS) ごとのMFHトラフィックの到着量を観測し、自己相関性を利用して周期を導出しGCL長を修正。
- 1周期内のどのTSにMFHが到着しているかを学習し、そのTSの非MFHクラスをクローズ。
- 運用中に誤差などによるずれを検出しClose位置を修正。

このiTASを富士通の1FINITY S100スイッチにソフトウェア実装し評価した。その結果、1秒周期のMFH模擬トラフィックの周期とタイミングを正確に検出し、GCLを適切に修正することにより、40 μ s程度の遅延を8 μ s程度まで低減できることを確認できた。前述のとおり、MFH網の遅延要求は100 μ s以下であるため、1ノードで40 μ s要してしまうとネットワークを構築することが事実上不可能になる。しかし、本技術を適用することにより、複数ノードを経由しても100 μ sという遅延規定を満たせるため、5Gサービスにおける低遅延アプリケーションの実現が期待できる。

光モニタ技術および光ネットワーク運用自動化技術

多様な5Gサービス需要を満たすフレキシブル光ネットワークを実現するため、深層ニューラルネットワーク(DNN: Deep Neural Network)を用いた光モニタ技術⁽⁵⁾および対向送受信器間での自動化技術⁽⁶⁾の開発を行っている。

研究開発を進めているデータ測定部にデジタルコヒーレント受信器、データ処理部にDNNを用いる光モニタ方式の概要を図-4(a)に示す。本方式では、デジタルコヒーレント技術により光受信帯域内の全物理量を含むデータを大量に取得し、DNNに対して学習を行い、伝送品質パラメータ推定を行う。データ処理部にDNNを用いることに

よって、光ネットワークの伝送路状態や光送受信器の特性を事前にモニタリングすることなく、入力データから自動的に信号処理部の設計を行えるという特長を持つ。

提案するDNNを用いたモニタ技術の実証実験を行った。ここで推定パラメータとして、基本的な伝送路状態の指標の一つである光信号対雑音比(OSNR: Optical Signal Noise Ratio)を採用した。まず、16 GbaudのDP-QPSK信号を生成した。ASE雑音付加を行うことでOSNRを10 dBから28 dBへと変化させ、コヒーレント検波の後、信号とのクロック同期を取ることなく40 GSa/sでアナログデジタル変換し、計50万個のDNNへの訓練データを生成した。本実証では、DNNの実装アーキテクチャとして、三つの畳み込み層と二つのプーリング層、二つの全結合層を持つ畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)を用いた。⁽⁷⁾

OSNR推定結果を図-4(b)に示す。横軸は光スペクトルアナライザで測定されたOSNR値、縦軸は、本モニタで測定されたOSNR値である。丸型のシンボルが訓練データを推定した結果であり、菱形のシンボルがテスト用のデータである。本結果より、過学習を抑制しながら高精度なOSNR推定ができていることが分かる。本モニタ技術を光ネットワークに導入することにより、信号品質劣化要因の特定、最適変調方式の推奨支援といったサービスを提供でき、高信頼、高効率なフレキシブル光ネットワークの実現に貢献できる。

次に、開発を進めている自動制御アーキテクチャの概念を図-4(c)に示す。本アーキテクチャは、対向する送受信器間に閉じて自動制御を行うことを特長とし、二つの技術で構成されている。一つ目は、対向間で直接制御信号をやり取りするための周波数重畳による制御信号通信技術である。二つ目は、信号品質をモニタし、光ネットワークの状態の変化または異常を検出し、制御のトリガとするための光モニタ技術である。

本アーキテクチャを採用することで、光モニタで検知された品質劣化やその予兆を監視制御チャンネルで対向送受信器に通知できる。通知されたモニタ情報に基づいて対向送受信器が動作することで、光ネットワーク運用の自動制御が可能に

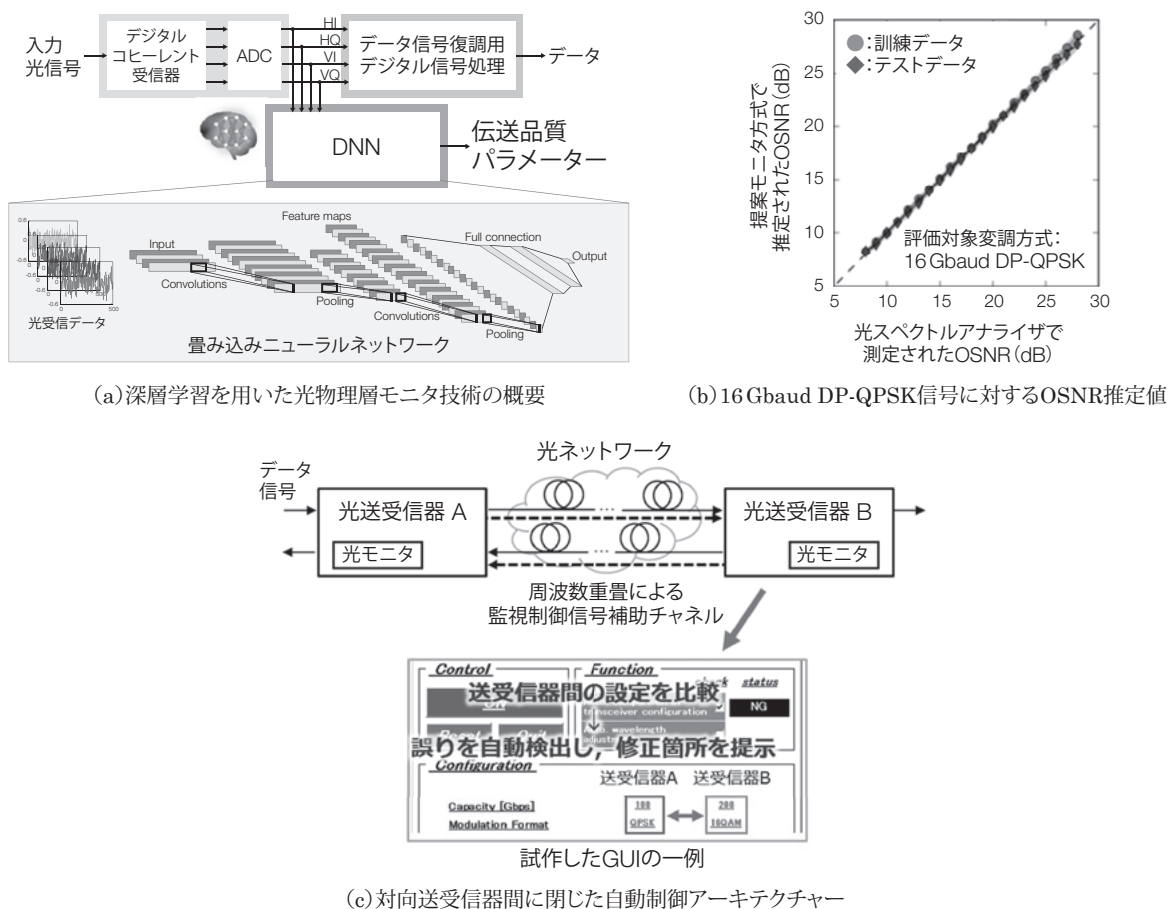


図-4 光モニタ技術および光ネットワーク運用自動化技術の概要

なる。

提案アーキテクチャの有効性を検証するため、商用の光送受信器に設定パラメータの自動誤設定検出機能をプロトタイプ実装した⁽⁸⁾ ユースケースとして、局舎で送受信器のインストール作業を行う際に、対向する送受信器間で異なるパラメータを誤設定してしまうことを想定した。本機能で対向する送受信器の設定値を自動照合して、誤設定されたパラメータを検出した。

光送受信器AおよびBそれぞれに100 G DP-QPSK信号、200 G DP-16QAM信号を設定し、本機能を動作させた場合、対向する光送受信器間で変調方式が誤っているためデータ信号は疎通できない。一方、本機能を用いることで、双方の変調方式の誤設定が検出され、その結果がGUIに表示されていることが分かる {図-4 (c)}。本実証実験により、提案する自動制御アーキテクチャが、光ネットワーク運用の自動化に有効であることが

確認できた。

今後、上述したDNNを用いた光モニタ技術を活用し、ハードウェアを変更することなく様々な信号品質劣化をモニタする技術に進化させ、モニタ情報に基づいた光ネットワークの運用自動化を推進していく。

む す び

本稿では、2020年頃に実用化予定の5Gサービスを支える社会基盤となる光ネットワークの課題を述べ、課題解決に向けた様々な富士通の取り組みを紹介した。

今後、富士通は本稿で紹介した技術の製品化適用に向けた研究開発を推進し、5Gサービスの普及に貢献していく所存である。

本稿には、総務省からの委託を受けて実施した「IoT機器増大に対応した有無線最適制御型電波有効利用基盤技術の研究開発」および「超高速・

低消費電力光ネットワーク技術の研究開発」の成果の一部が含まれています。また、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所（PETRA）が国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けて実施した「超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発」の成果の一部が含まれています。

参考文献

- (1) T. Aoki et al. : Low-Crosstalk Simultaneous 16-Channel×25 Gb/s Operation of High-Density Silicon Photonics Optical Transceiver. J. of Lightwave Technol, Vol.36, Issue 5, p.1262-1267 (2018).
- (2) S. Tanaka et al. : Ultra-Low-Power (1.59 mW/Gbps), 56-Gbps PAM4 Operation of Si Photonic Transmitter Integrating Segmented PIN Mach-Zehnder Modulator and 28-nm CMOS Driver. ECOC2017, Th.1.C.1.
- (3) Time-Sensitive Networking Task Group.
<http://www.ieee802.org/1/pages/tsn.html>
- (4) 西村和人ほか：モバイルフロントホールにおける低遅延レイヤ2スイッチアーキテクチャの検討. 信学技報, no.CS2017-8, p.37-42, Apr.2017.
- (5) 富士通：光ネットワークの構築・運用管理に必要な光伝送信号パラメーターの深層学習を用いた推定技術を開発。
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2018/03/12.html>
- (6) 谷村崇仁ほか：適応光ネットワークに向けた周波数変調重畳による制御補助チャネルの実現. 信学論(B), Vol.96-B, No.3, p.263-273 (2013).
- (7) T. Tanimura et al. : Data-analytics-based Optical Performance Monitoring Technique for Optical Transport Networks. OFC2018, Tu3E.3.
- (8) Y. Ge et al. : Autonomous and Real-time Controlled Transceiver Prototype with FSK Supervisory Signal and Performance Monitoring. ECOC2017, M.2.F.5.

著者紹介



小田 祥一郎 (おだ しょういちろう)

(株) 富士通研究所
フォトニクス研究センター
兼 富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
光ファイバー通信システムの研究開発に従事。



斉藤 卓 (さいとう たく)

富士通 (株)
共通開発本部
光ファイバー通信システムの研究開発に従事。



西村 和人 (にしむら かずと)

富士通 (株)
ネットワークプロダクト事業本部
5G有線アクセス網における低遅延スイッチの開発に従事。



早川 明憲 (はやかわ あきのり)

(株) 富士通研究所
フォトニクス研究センター
兼 富士通 (株)
AI基盤事業本部
兼 技術研究組合光電子融合基盤技術研究所 (PETRA)
集積フォトニクスデバイスの研究開発に従事。