

3-1 アクセス系伝送技術

Access Network Technologies

寺田 純

Abstract

光アクセス技術は、超広帯域の光ブロードバンドサービスを実現するための経済的光伝送技術として進展されてきた。本稿では、光アクセス技術の技術動向を解説するとともに、移動体通信システムでの光アクセスの役割を紹介し、これを支えるアクセス系伝送技術として、光伝送容量削減に向けた取組み、経済化のための PON 技術適用時の低遅延化技術について述べる。また、更なる光アクセス技術の高度化に向けて、ソフトウェア技術の活用やオープン化などの取組み、デジタルコヒーレント技術の適用についての取組みを紹介する。

キーワード：PON，モバイルフロントホール，低遅延，ソフトウェア技術，デジタルコヒーレント

1. はじめに

アクセスネットワークは、通信キャリアの局舎から家庭やオフィスまでの間のネットワークを指す。その中でも光ファイバを家庭まで引き込む FTTH (Fiber To The Home) は、超広帯域の通信が可能な光ブロードバンドサービスである。TVをはじめとする高精細映像サービスの普及や、インターネットショッピング、クラウドサービスなど多様なサービスの登場に加え、Wi-Fiなどの無線技術も手軽に使える環境も整い、我が国においては2,000万をはるかに超えるユーザがFTTHサービスを楽しんでいる⁽¹⁾。FTTHが広く普及した要因の一つに、PON (Passive Optical Network) 技術が挙げられる。PON技術は、1本のファイバを複数のユーザで共有する経済的光アクセスシステムである。現在広く用いられているPON技術は、総帯域がおおむね1 Gbit/sであるが、更なる広帯域化に向けた検討が進められているほか、第5世代移動通信網 (5G)をはじめ

とする次世代の移動体通信システムを支える光アクセス技術として活用することを目的とした研究開発が活発化している。また、様々なサービスのアクセスネットワークに対する要件を迅速かつ柔軟に対応するための研究開発や、更なる広帯域化・長延化への挑戦も進められている。

本稿では、2. で光アクセス技術の技術動向を、PON技術とその標準化を中心に解説し、3. にて移動体通信システムの動向とそれを支える光アクセス技術について述べる。4. では、更なる将来を見据えた新しい光アクセス技術の取組み例を紹介し、5. にてまとめる。

2. 光アクセスの技術動向

本章では、主にFTTH向けに進化してきた光アクセス技術としてのPONシステムについてその技術概要と標準化動向について解説する。

2.1 PON

光アクセスネットワークで最も普及しているシステムがPONである。PONは、光信号を複数に分岐し、一芯の光ファイバを複数ユーザで共有する。ファイバの分岐には給電不要の受動 (Passive) 素子である光スプリッタが用いられ、経済的なネットワークを実現でき

寺田 純 正員：シニア会員 日本電信電話株式会社 NTT アクセスサービスシステム研究所

E-mail terada.jun@lab.ntt.co.jp

Jun TERADA, Senior Member (NTT Access Network Service Systems Laboratories, NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION, Yokosuka-shi, 239-0847 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.100 No.8 pp.777-782 2017年8月

©電子情報通信学会 2017

る。PONの構成を図1に示す。PONは局舎に設置されるOLT (Optical Line Terminal) とユーザ宅に設置されるONU (Optical Network Unit), 及び局舎からユーザ宅まで敷設された光ファイバと、光ファイバを分岐する光スプリッタにて構成され、一つのOLTに複数のONUが接続される⁽²⁾。PON構成は、ユーザ局舎内の装置設置スペースを小さく抑えられ、低電力化が可能というメリットもある。

OLTと複数のONUがPONを用いて通信をするためには多重技術が必要であり、時分割で伝送するTDM (Time-Division Multiplex) 技術や波長で多重するWDM (Wavelength Division Multiplexing) 技術などがある。現在広く用いられているPONシステムでは、複数ONUの信号の多重にはTDM技術が使われており、TDM-PONと呼ばれる。OLTからONUへの下り信号とONUからOLTへの上り信号の多重にWDM技術が用いられている。上り信号の多重では、複数のONUからの信号が伝送路上で衝突することのないよう制御するTDMA (Time-Division Multiplex Access) 技術が使われている。ONUの上り信号の帯域割当には、固定帯域割当と動的帯域割当の2通りの方法がある。固定帯域割当はONUごとに帯域を固定的に割り振る方法である。この方法は、制御が簡単である一方で、通信量の少ないONUに対しても固定の帯域を割り当てるため、未使用

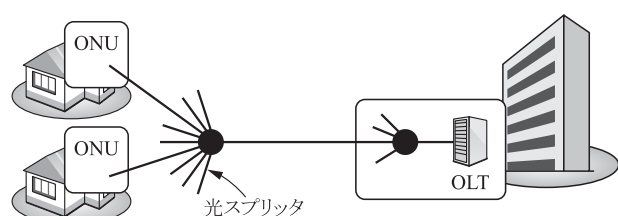


図1 PONシステムの構成 PONシステムはOLT, ONU, 光ファイバ, 光スプリッタから構成される。

帯域が増えるという課題がある。動的帯域割当 (DBA: Dynamic Bandwidth Allocation) では、ONUからの送信要求と、他のONUの通信状況等を加味して、OLTがONUの送信タイミングとデータ量を割り当て、通知する方法である。ONUは通知されたタイミングに割り当てられたデータ量を送信する。この方法は、統計多重効果としてPONの総帯域を最大限有効活用できる一方で、上り信号のOLT到達までの遅延が大きくなる。

一般的な光通信では、安定した通信を行えるよう、データを送信していないときはアイドル信号を送信し、常に何らかの信号を送受しているが、PONにおいては、ONUは自身に割り当てられた時間のみ上り信号を送信し、その他の時間は、他のONUからの信号に影響を与えないよう光出力を止める必要がある。そのため、ONUには、送信時に光出力を瞬時に安定させ、データ送信後は瞬時に消光するバースト光送信機能が、OLTには、距離差の違うONUからの光強度と位相の異なる信号を正しく受信するため、瞬時に利得を調整して同期・再生するバースト光受信機能を持っている。

2.2 PONの標準化動向

ここでは、PON技術の標準化動向を紹介する^{(2)~(5)}。PONの標準化は、図2に示すように、ITU-TとIEEEの二つの標準化団体で行われている。ITU-Tでは、ラインレートが上り155 Mbit/s, 下り622 Mbit/sのB-PON (Broadband PON, G.983 series), 上り1.25 Gbit/s, 下り2.5 Gbit/sのG-PON (Gigabit-capable PON, G.984 series), 上り2.5 Gbit/s, 下り10 Gbit/sのXG-PON (10Gigabit-capable PON, G.987 series)と標準化された。また、XG-PONはNG-PON1 (Next-Generation PON1)とも呼ばれおり、更にその次の標準として、NG-PON2 (G.989 series)が策定された。NG-PON2ではWDMが取り入れられ、送受とも1波長当たり2.5 Gbit/sまたは10 Gbit/sで、4波のWDMにより、

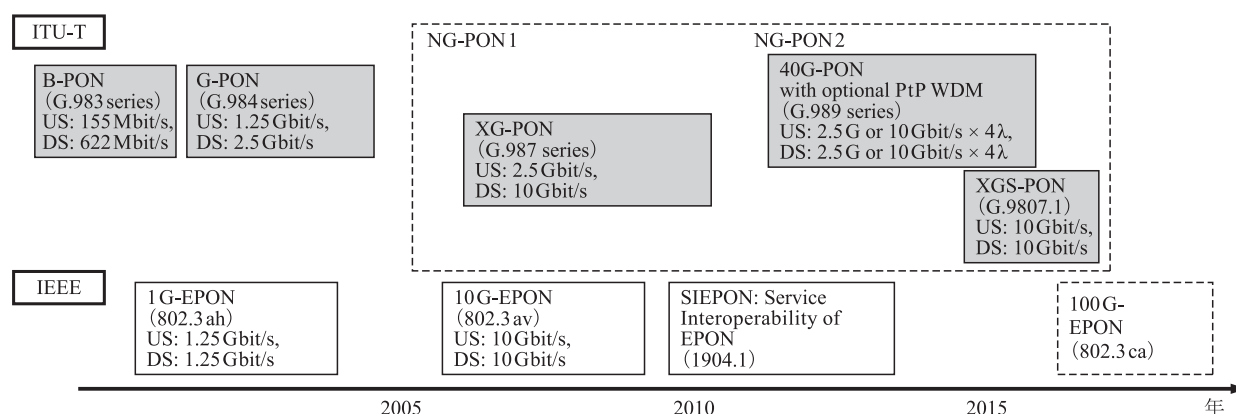


図2 PONシステムの標準化 ITU-TとIEEEで標準化されており、ITU-Tでは40G級の標準化が完了、IEEEでは100G級の標準化が開始された。

ラインレート 40 Gbit/s までをサポートする、NG-PON2 では、更に別の波長を占有して 1 対 1 通信を実現する WDM オーバレイも取り入れている。また、上り下りの伝送速度が非対称だった XG-PON を上下対称の 10 Gbit/s にした XGS-PON (10Gigabit-capable Symmetric PON, G.9807.1) も標準化された。一方、IEEE では、イーサネット技術をベースに標準化されており、上り下りとも 1.25 Gbit/s の GE-PON (Gigabit Ethernet PON, G.9807.3ah), 上下 10 Gbit/s の 10G-EPON (10-Gigabit Ethernet PON, G.9807.3av) が標準化された後、サービスインタオペラビリティに関して SIEPON (Service Interoperability of EPON, G.9807.3) が策定された。現在、G.9807.3ca として 100 Gbit/s 級の PON システムに関する議論が開始された。

3. 移動体通信システムへの適用

光アクセス技術は、主に FTTH 実現のための経済的な技術として進化してきた。近年では、この光アクセス技術を新たに、移動体通信システムに適用しようとする動きが活発化している。本章では、移動体通信システムの動向を簡単に解説し、そこに向けた光アクセスシステムの要件について述べる。

3.1 移動体通信システムの動向

移動体通信システムは、NTT ドコモが 2010 年 12 月に LTE (Long-Term Evolution) の商用サービスを開始して以降、現在では LTE の発展形である LTE-Advanced のサービスを提供している。LTE-Advanced は、移動体通信の標準化プロジェクトである 3GPP (3rd Generation Partnership Project) が策定した Release 10 から 13 を指す。近年のスマートフォン・タブレットや多様なアプリケーションサービスの普及に伴いトラフィックが大幅に急増しているが、更に 2020 年代には 2010 年に比べて 1,000 倍とも予測されている爆発的なトラフィックの増加と多種多様な新規サービスの出現へ対応する必要がある。そのため、LTE-Advanced に続いて、2020 年以降に導入が期待される第 5 世代 (5G) 方式においては、飛躍的な無線アクセスネットワークの能力向上が求められる^{(6), (7)}。それに対し、欧州の 5GPPP、中国の IMT-2020 (5G) Promotion Group、韓国の 5GForum など世界各国において 5G に関する検討が進められている。日本においては、第 5 世代モバイル推進フォーラム (5GMF) が 2014 年に設立され、無線ネットワーク、アプリケーションを含めて、5G の早期実現を図る活動を行っている。現在は、広域をカバーするマクロセルと、トラフィックの多いエリアにはスモールセルをオーバレイしてスループットの向上を実現しているが、5G における更なる超高速・大容量無線アクセス

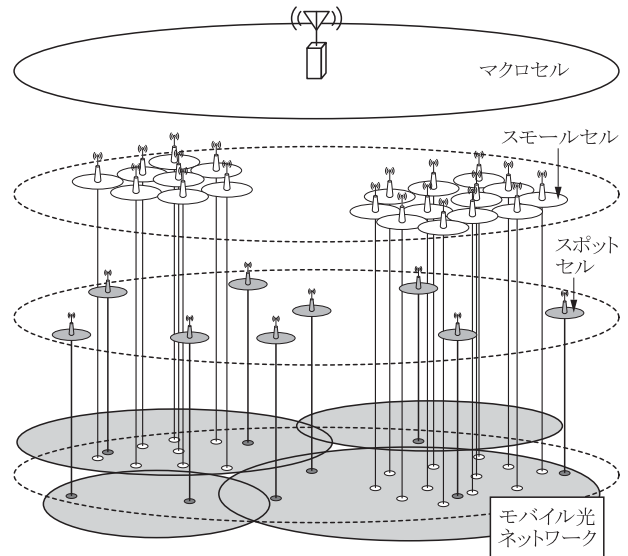


図3 モバイル光ネットワーク 様々な仕様のセルを用いたマルチ RAT を収容するため、モバイル光ネットワークには、RAT に応じた特性が必要となる。

に向けては、より高い周波数帯の活用と、多数のアンテナ素子を用いた Massive MIMO 技術の導入も期待されており、複数の無線システムを適材適所に配置するマルチ RAT (Radio Access Technology) 構成となると想定されている。そのため、モバイル光ネットワークは様々なセルを収容するために、図3に示すように RAT に応じた特性が必要となる。

3.2 モバイルバックホールとモバイルフロントホール

基地局は信号処理を行うベースバンド部 (BBU: Baseband Unit) と電波の送受信など無線信号を扱う無線アンテナ部 (RRH: Remote Radio Head) から成るが、これらが一体となった基地局構成と、ベースバンド部と無線アンテナ部が別々に構成され、光ファイバ等で接続される基地局構成がある。前者を D-RAN (Distributed Radio Access Network)、後者を C-RAN (Centralized RAN) と呼んでいる。基地局と上位のコアネットワークとの間はモバイルバックホール (MBH) と呼ばれる。MBH には、安定した無線通信を行うためには基地局間の周波数及び時刻同期が必要となる。現行システムでは、基地局での周波数精度として 50 ppb、時刻精度として 500 ns が要求されている⁽⁸⁾。C-RAN 構成では、BBU は局舎等に、RRH はアンテナと同じ場所に配置されることが多い。BBU と RRH は光ファイバで接続され、無線信号を送受する。BBU を一つの場所に集中して配置するため、セル間協調送受信 CoMP (Coordinated Multi-point transmission/reception) など高度な処理を行うことが可能となる。BBU と RRH を接続する基地局内光リンクはモバイルフロントホール (MFH) と呼ばれる。BBU-RRH 間のインタフェースとしては、

CPRI (Common Public Radio Interface) や OBSAI (Open Base Station Standard Initiative) がよく知られている^{(9), (10)}。これらは無線信号をデジタル化して伝送する DRoF (Digital Radio on Fiber) 技術の一つである。MFH の伝送速度は、サンプリング周波数、量子化ビット数、MIMO 数などから決定され、無線データレート⁽⁹⁾の10倍以上の伝送速度が必要である。

3.3 MFH の帯域削減

前述のように、MFH の伝送速度は無線データレート

に対して10倍以上の伝送速度が必要であり、CPRI では24 Gbit/s を超える伝送速度の規定されるまでになっている。現在、光伝送に用いられる光トランシーバは、10 Gbit/s クラスのものが多く使われているが、広く普及した光トランシーバを活用すれば、モバイル光ネットワークを経済的に実現できる。現在のC-RAN構成では、物理層の機能のうちRF機能のみがRRHにある構成になっているが、BBUとRRHの機能分割点を変えてMFHの伝送速度を下げる議論が行われている。図4に基地局機能のブロック図を示す。C-RAN構成での機

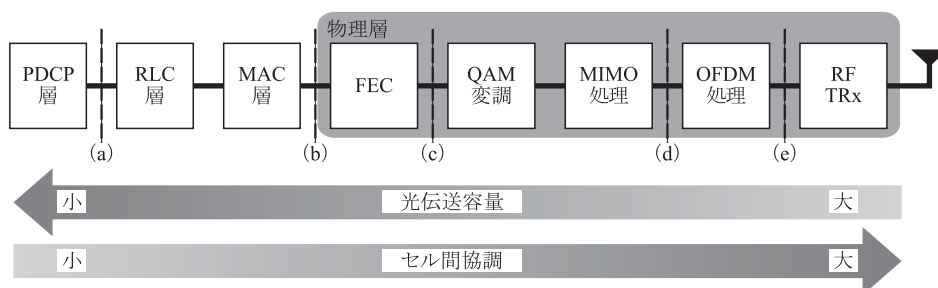
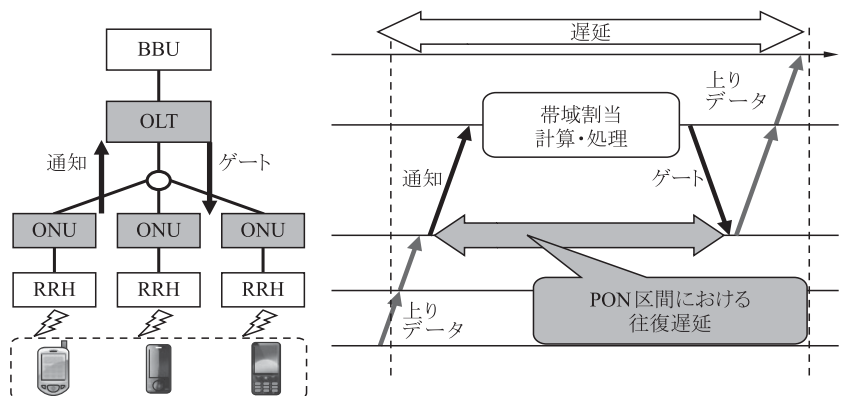
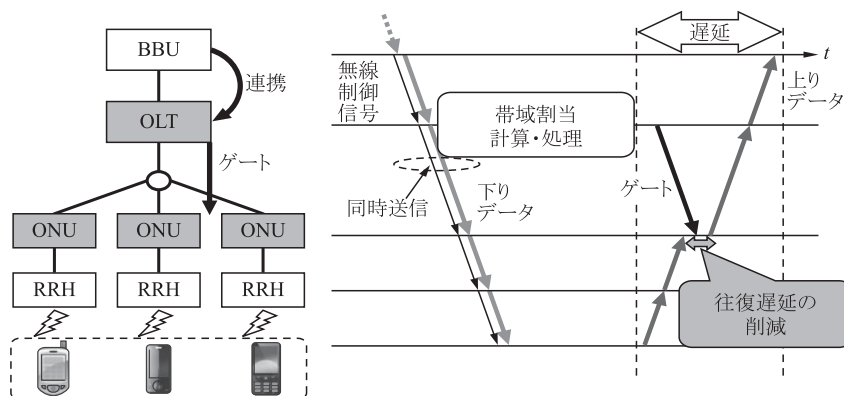


図4 基地局機能 基地局の分割点変更の議論が行われている。(a)に近い方が光伝送容量は小さくて済むが、セル間協調による無線特性劣化の抑制は難しい。



(a) ONUからの帯域要求に基づく帯域割当



(b) BBUの無線制御信号を活用した帯域割当

図5 MFH のTDM-PON 収容時の動的帯域割当 ONUからの帯域要求に基づいて帯域割当を行うと遅延が大きくなるが(a), BBUからの無線制御信号を活用すると遅延が低減される(b)。

能分割点は(e)である。一般に RRH 側に機能を増やすと光伝送帯域の削減効果が大きい。C-RAN 構成の特長であったセル間協調などが難しくなり、干渉による無線スループットの低下を抑制することが難しくなる。また、遅延に関しての要求も変わってくる。LTE では、誤り訂正手法として、HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest) による再送制御が用いられており、その応答時間を 8 ms 以下に規定している。この時間には無線物理層や無線 MAC 層での処理時間も含まれるため、光伝送に用いることのできる時間 (伝送遅延 + 処理遅延) は制限される。

3.4 モバイル向け光アクセス技術

現行の CPRI では、無線トラフィックがなくても常に DRoF 信号を伝送しているが、基地局機能の分割点が変わると、MFH は、無線トラフィックに応じたトラフィックとなり、複数回線の多重による統計多重効果も期待できる。TDM-PON は統計多重効果を活用できるシステムであるため、そこで、基地局機能の分割点変更を前提として、MFH に TDM-PON を適用する検討が行われている^{(11), (12)}。MFH に TDM-PON を適用する上で大きな課題は 2.1 で述べたように、上りトラフィックの遅延である (図 5(a))。この遅延は帯域割当のための制御遅延が大きな割合を占める。このような上りトラフィックのスケジューリングは、無線システムにおいて、BBU と端末の間でも無線リソース情報を通じて行われている。この無線リソース情報を端末だけでなく BBU-OLT 間の連携 IF を介して OLT にも通知することで、OLT は ONU からの帯域要求がなくても ONU に対する

帯域割当計算を実施することができる (図 5(b))。これにより、帯域割当の処理遅延を大幅に減らすことができ、100 μ s 以下の遅延を実現できる^{(13), (14)}。

基地局の機能分割点に関しては、光伝送容量の削減とセル間協調による無線特性向上とのトレードオフとなる。この両立を目指した検討も行われている^{(15), (16)}。本検討では、特に難しい上りのセル間協調において、図 4 における (c) で分割することとし、復調後の信号の確からしさを示す LLR (Log Likelihood Ratio) を量子化して送信することで、BBU において LLR 合成することでセル間協調を実現する。

MBH に関しては、時刻同期に対する取組みがある。時刻同期には GPS が広く用いられているが、GPS アンテナの設置場所の確保が困難などの理由により、ネットワークを介した同期が期待されており、PTP (Precision Time Protocol) と SyncE (Synchronous Ethernet) を組み合わせた高精度の時刻同期システムの検討が行われている⁽¹⁷⁾。

4. 将来光アクセス技術

ここでは、更に将来の光アクセスシステムに向けた技術についての研究開発の動向について述べる。

4.1 柔軟な光アクセス技術

TDM-PON を移動体通信向けに適用する事例を述べたように、今後、光アクセス技術は様々なサービス要求に柔軟に対応できるシステムとしていく必要がある。現在の光アクセスシステムは、それぞれのアクセス方式に

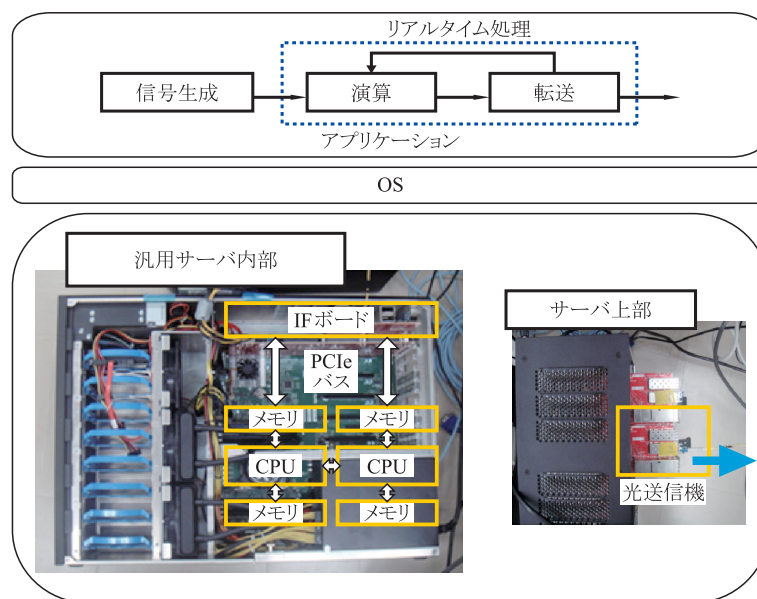


図6 物理層のソフトウェア化 物理層の機能をソフトウェアで実現し、汎用サーバを用いて 10 Gbit/s の処理を実現している。

応じて専用のハードウェア、ファームウェアを用いているため、迅速な機能追加や変更による新しいサービスへの対応が困難となっている。そこで、機能を部品化し、それらを自由に組み合わせることによって、様々なサービスに対応するシステムを柔軟かつ経済的に実現しようという試みも登場している⁽¹⁸⁾。また、光アクセスシステムをオープン化する動きも活発化している。例えば、OCP (Open Compute Project) のテレコムワーキンググループ (OCP Telecom) では、Open GPON や Open XGPON を仕様化する活動を行っている。また、ON. Lab における CORD (Central Office Re-architected as a Datacenter) プロジェクトでは、PON の仮想化とオープンソフトウェア開発を行っている。更に、より挑戦的な取組みとして、物理層の信号処理を汎用のハードウェア上のソフトウェアで実現する検討も行われている (図 6)⁽¹⁹⁾。

4.2 大容量化技術

更なる大容量化を目指した取組みも活発である。2.2 で述べたように、IEEE ではラインレート 100 Gbit/s を実現する PON を目指すタスクフォースが発足しており、ONU が複数の波長を同時に使用することが検討されている。また、コアネットワークにおける大容量化技術であるデジタルコヒーレント技術をアクセスネットワークに適用しようとする検討も行われている。TDM-PON に適用する場合には、光強度の異なるバースト信号を受信する必要があるが、バースト対応の光アンプの検討により、20 dB 以上の対応が可能であると示した例もある⁽²⁰⁾。また、アクセスネットワークへの適用に向け、経済的なデジタルコヒーレント通信を実現する技術についての検討も始まっており、インジェクションロックアップ技術を活用して、光部品数削減に向けた研究開発も行われている⁽²¹⁾。

5. ま と め

光アクセス技術は、主に FTTH サービス実現のために研究開発され、光ブロードバンドを実現する足回りとして根付いてきた。今後は、移動体通信をはじめとする様々なサービスに柔軟に適應するアクセスネットワーク実現に向け研究開発が行われていくであろう。

文 献

- (1) 総務省情報通信統計データベース、ブロードバンドサービス等契約数の推移 (四半期), <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/field/data/gt010103.xls>
- (2) “技術基礎講座【GE-PON 技術】,” NTT 技術ジャーナル, vol. 17, no. 8, pp. 71-74, Aug. 2005.

- (3) 葉玉寿弥, 吉本直人, 木村俊二, 可児淳一, “高速・低消費電力化を目指す次世代 PON 技術,” 信学誌, vol. 95, no. 1, pp. 62-67, Jan. 2012.
- (4) 浅香航太, 可児淳一, “光アクセスシステムの最新標準化動向,” 信学誌, vol. 99, no. 7, pp. 644-649, July 2016.
- (5) 可児淳一, 鈴木謙一, “次世代 10G 級 PON システムの標準化動向,” NTT 技術ジャーナル, vol. 21, no. 9, pp. 90-93, Sept. 2009.
- (6) NTT Docomo WhitePaper, https://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_5g/DOCOMO_5G_White_PaperJP_20141006.pdf
- (7) T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, T. Hai, X. Shen, Y. Ning, and L. Nan, “Trends in small cell enhancements in LTE Advanced,” IEEE Commun. Mag., vol. 51, no. 2, pp. 98-105, Feb. 2013.
- (8) Small cell forum document, 075.07.01, Feb. 2014.
- (9) CPRI, “CPRI specification V7.0,” Oct. 2015, <http://www.cpri.info/>
- (10) OBSAI, <http://www.obsai.com/>
- (11) J. Terada, T. Shimada, T. Shimizu, and A. Otaka, “Optical access network technology for 5G wireless front/backhaul network,” OECC 2016, no. S1-7, July 2016.
- (12) J. Terada, T. Shimada, T. Shimizu, and A. Otaka, “Optical network technologies for wireless communication network,” ECOC 2016, no. Tu1.F. 2, pp. 232-234, Sept. 2016.
- (13) T. Tashiro, S. Kuwano, J. Terada, T. Kawamura, N. Tanaka, S. Shigematsu, and N. Yoshimoto, “A novel DBA scheme for TDM-PON based mobile fronthaul,” Proc. OFC2014, no. Tu3F. 3, March 2014.
- (14) H. Ou, T. Kobayashi, T. Shimada, D. Hisano, J. Terada, and A. Otaka, “Passive optical network range applicable to cost-effective mobile fronthaul,” Proc. IEEE ICC2016, no. SAC/ASN 1.5, May 2016.
- (15) K. Miyamoto, S. Kuwano, J. Terada, and A. Otaka, “Performance evaluation of mobile fronthaul optical bandwidth reduction and wireless transmission in split-PHY processing architecture,” OFC2016, no. W1H. 4, March 2016.
- (16) K. Miyamoto, S. Kuwano, J. Terada, and A. Otaka, “Uplink joint reception with LLR forwarding for optical transmission bandwidth reduction in mobile fronthaul,” Proc. VTC2015-Spring, no. 6E. 1, pp. 1-5, May 2015.
- (17) 中西 隆, 坂井勝太, 高田 祐, 小倉康夫, 小林正人, “高精度時刻同期アクセスシステムの性能向上に向けた検討,” 信学技報, CS2016-44, pp. 23-28, Nov. 2016.
- (18) NTT プレスリリース, “Introducing the new FASA concept for future access systems,” Feb 8. 2016.
- (19) T. Suzuki, S. Kim, J. Kani, K. Suzuki, and A. Otaka, “Real-time demonstration of PHY processing on CPU for programmable optical access systems,” IEEE GLOBECOM 2016, no. SAC-ANS. 1, Dec. 2016.
- (20) R. Koma, M. Fujiwara, J. Kani, S. Kim, T. Suzuki, H. Mori, T. Wada, K. Suzuki, and A. Otaka, “22-dB dynamic range, real-time burst-mode reception of digital coherent 20-Gb/s QPSK PON upstream signals,” ECOC2016, no. M. 1. E. 4, Sept. 2016.
- (21) K. Kasai, M. Yoshida, T. Hirooka, and M. Nakazawa, “Injection-locked homodyne detection system for higher-order QAM digital coherent transmission,” ECOC2016, invited talk, no. M1. C. 3, Sept. 2016.

(平成 29 年 2 月 28 日受付)



てらだ じゅん
寺田 純 (正員: シニア会員)

平 5 慶大・理工・電気卒。平 7 同大学院修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。A-D・D-A 変換器、光トランシーバ用高速回路に関する研究に従事した後、光アクセスシステムの移動体通信システムへの適用に関する研究に従事。現在、同社 NTT アクセスサービスシステム研究所主幹研究員・グループリーダー。