

三菱電機の光通信技術への取組み

宇藤健一* 向井宏明**
 杉原隆嗣** 野田雅樹*
 堀内栄一*

Mitsubishi Electric's R&D Activities on Optical Communication Technologies

Kenichi Uto, Takashi Sugihara, Eiichi Horiuchi, Hiroaki Mukai, Masaki Noda

要旨

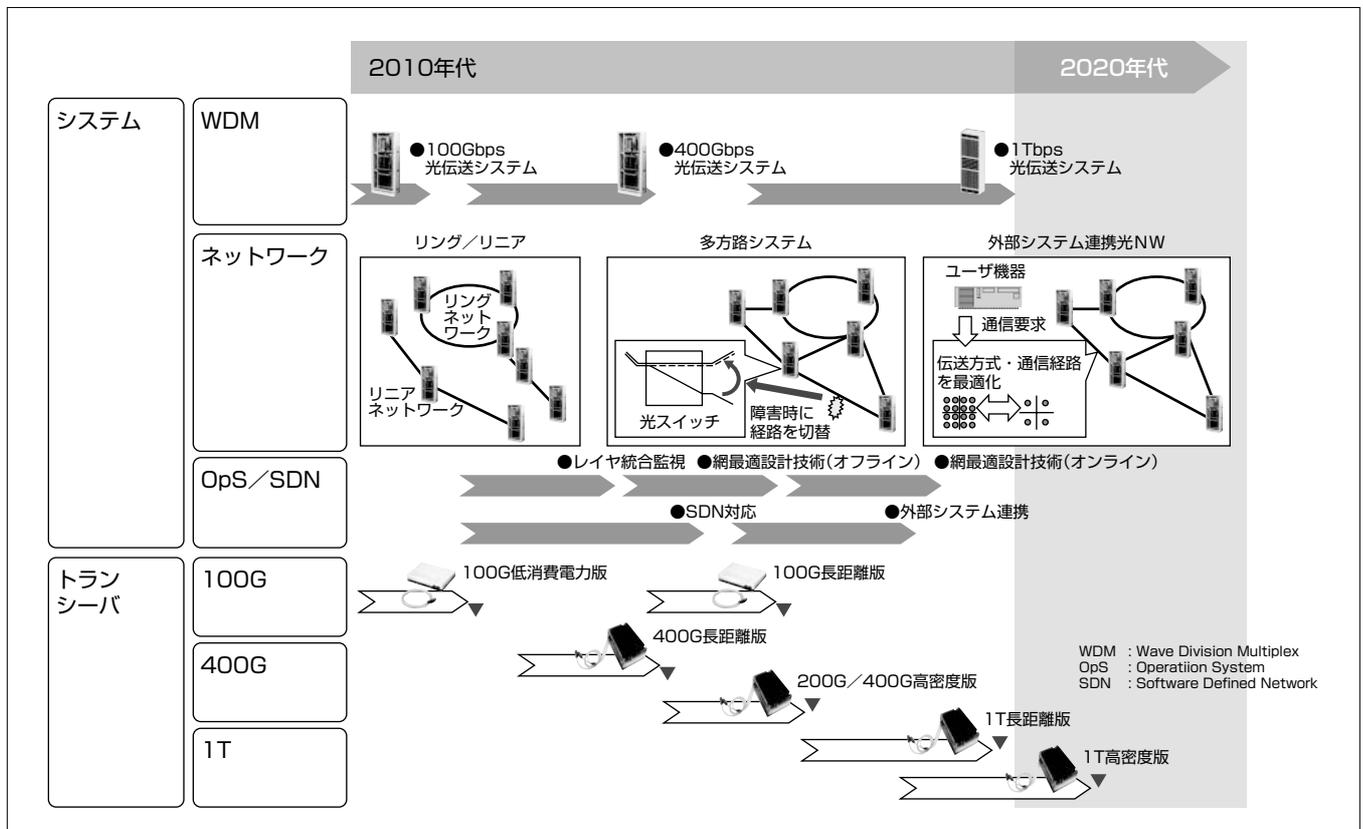
大規模データセンターからスマートフォンにいたるまで通信の大容量化が進んでいる。調査報告によると、世界で生成される情報量は2010年以降年率1.4倍で増加し、2020年には35ZB(ZB：ゼタバイト： 10^{21} バイト)になると言われている。これらを支えるために光通信技術の重要性が増している。WDM技術を基に構成されるコアネットワークは波長あたり100Gbpsの伝送容量となっており、400Gbps時代を迎えようとしている。また、エンドユーザーにブロードバンドサービスを提供するFTTH(Fiber To The Home)等のアクセスネットワークは、PON(Passive Optical Network)技術によって構成され、これも10Gbpsの時代に移ろうとしている。

本稿では、コアネットワークの容量拡大に貢献するデジタルコヒーレント技術と誤り訂正技術、アクセスネットワ

ーク向けの10G-EPON(10 Gigabit-Ethernet PON)を実現するための光送受信器技術とPON制御技術といった要素技術を中心に、三菱電機の光通信技術に関する研究開発への取組みについて述べる。

また、今後のグローバル化を考えた場合、標準化が重要となる。PONについては、マルチサービスを狙ったITU-T(International Telecommunication Unit-Telecommunication standardization sector)とイーササービス集約を狙ったIEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)で並行して標準化が進められてきた。日本はIEEE標準のEPONを支持してきたが、海外への導入を考えた場合、ITU-Tでの標準化が必要となる。IEEE, ITU-Tでの標準化動向、及び当社の標準化に対する取組みを述べる。

さらに、今後の光通信技術開発への取組みを述べる。



コアネットワークの技術進歩

コアネットワークに求められる伝送容量は、現行の100Gbpsから、今後、400Gbps、さらには1Tbpsへと増大すると予想される。大容量化に対応するために必要となる、システム技術(WDM, ネットワーク, OpS/SDN)とトランシーバ技術の両方に対して、継続的に開発に取り組む。

1. ま え が き

大規模データセンターからスマートフォンにいたるまで通信の大容量化が進んでいる。調査報告によると、世界で生成される情報量は2010年以降年率1.4倍で増加し、2020年には35ZB(ZB：ゼタバイト： 10^{21} バイト)になると言われている。これらを支えるために光通信技術の重要性が増している。WDM技術を基に構成されるコアネットワークは波長あたり100Gbpsの伝送容量となっており、400Gbps時代を迎えようとしている。また、エンドユーザーにブロードバンドサービスを提供するFTTH等のアクセスネットワークは、PON技術によって構成され、こちらも10Gbpsの時代に移ろうとしている。

本稿では、コアネットワークの容量拡大に貢献するデジタルコヒーレント技術、アクセスネットワーク向けの10G-EPONを実現するための要素技術を中心に、当社の光通信技術への取組みについて述べる。

また、今後のグローバル化を考えた場合、標準化が重要となる。PONについては、マルチサービスを狙ったITU-Tとイーササービス集約を狙ったIEEEで並行して標準化が進められてきた。日本はIEEE標準のEPONを支持してきたが、海外への導入を考えた場合、ITU-Tでの標準化が必要となる。IEEE、ITU-Tでの標準化動向、及び当社の取組みを述べる。

2. コアネットワーク技術

コアネットワークに要求される大容量化実現のため、キーとなる技術が光送受信技術と誤り訂正技術である⁽¹⁾。

2.1 光送受信技術

100Gbpsのシステムでは、従来の10Gbpsや40Gbps伝送に比べ、高速化に伴い広帯域な受信帯域を要するため光信号対雑音比(Optical Signal to Noise Ratio：OSNR)に対する耐性の強化が必要となる。既存の10Gbpsシステム用に整備された、光ファイバや光増幅器といった伝送路条件を変えずに100Gbpsへの増設が求められる機会が多いこともあり、光送受信器にはOSNR耐性の強化や、伝送路中で生じる波長分散や非線形光学効果による信号波形歪(ひず)みを低減する技術が必要となる。特に、100Gbpsの光送受信技術として、デジタルコヒーレント技術と光変復調技術が重要となる。

デジタルコヒーレント技術は、高感度受信が可能なコヒーレント検波方式を、超高速LSI(Large Scale Integration)で実装可能となったデジタル信号処理によって実現している。これによって、搬送波の周波数や位相の安定した推定が可能になり、従来の光強度変調を用いた直接検波方式に比べて3 dB低いOSNRでも同一の信号品質を得られている。高速化によって顕著となる波長分散、偏波モード分散

による線形な波形歪みに関しても補償可能になり、伝送距離が飛躍的に向上している。さらに、多値位相変調や偏波多重分離が実現可能となり、100Gbpsで最も普及している偏波多重4値位相変調(Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying：DP-QPSK)方式では、波長多重システムの周波数利用効率が従来の2倍以上に向上している。

一方、100Gbps DP-QPSK方式では、伝送距離の延伸化に伴い非線形光学効果に起因する波形歪みが増大し、既存の伝送路を用いた場合に、システムマージンまで考慮すると伝送距離が3,000km程に制限されることがあった。従来の10Gbpsや40Gbpsと同等な長距離伝送を実現するには、100Gbps信号の更なる延伸化技術が必要である。当社では、延伸化のため、偏波多重2値位相変調(Dual-Polarization Binary Phase Shift Keying：DP-BPSK)方式を2つの搬送波を用いて伝送するDual-Carrier DP-BPSK方式を採用した。この方式では、信号点間距離を拡大することでOSNR耐性を改善し、非線形光学効果による波形歪みを抑制することができる⁽²⁾。周波数利用効率が半減する点は、2つの搬送波を用いることで補い、トータルとして、100Gbpsの伝送速度を維持した(図1)。当社では、この方式を新たに採用した100Gbpsデジタルコヒーレントトランスポンダの開発を行い、最長伝送区間5,000kmの海底ケーブルプロジェクトを受注し、現在運用が開始されている。

2.2 誤り訂正技術

図2に1チャンネル当たりの伝送容量と周波数利用効率との関係を示す。伝送容量が100Gbpsを超える光伝送システムでは、高速化に伴い、より高い周波数利用効率を求められる。400Gbpsで有力視される16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)方式では、従来のQPSK方式に比べて信号点間距離が狭まることで、さらに伝送路雑音の影響が大きくなる。当社では、OSNR耐性の強化を目的として、強力な誤り訂正符号を得るため、多重空間結合方法を用いた軟判定低密度パリティ検査符号(Low-Density Parity-Check：LDPC)を開発した⁽³⁾。硬判定符号を組み合わせた接続符号とし、符号化利得12dBとなる高い訂正能力を実現した。

また、伝送路に合わせた最適な信号速度と訂正能力を選択するため、フレーム構造を可変として、誤り訂正符号の

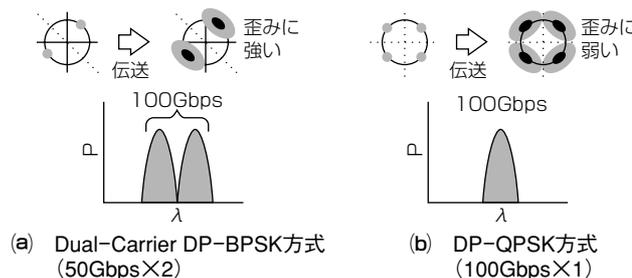


図1. 100Gbps光変調方式

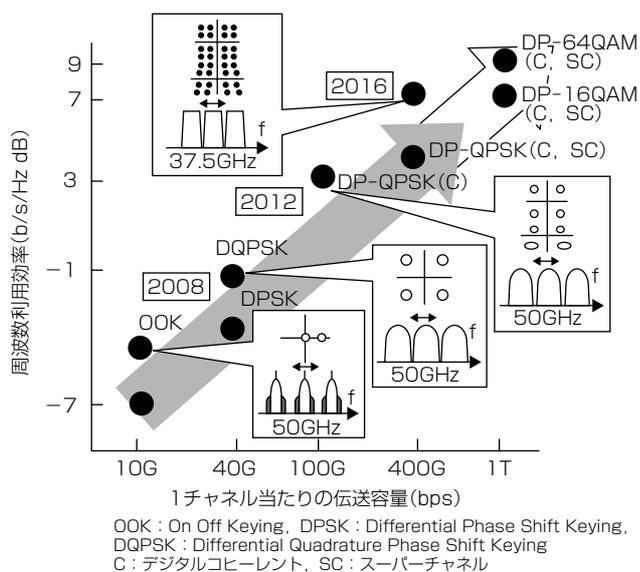


図2. 伝送容量と周波数利用効率との関係

冗長度，及び信号速度を可変とし，伝送路に合わせて切り換える方式も開発した。

2.3 大容量システム監視制御技術

WDMネットワークにおけるメッシュ接続や，WDM・OTN(Optical Transport Network)・パケットレベルの伝送機能を統合するマルチレイヤ化が導入されており，システムが複雑化する一方で，急激なトラフィックの変動や災害に対処するための迅速なプロビジョニングや障害迂回(うかい)が求められている。これらに対応するため，トランスポートネットワークを仮想化し，最適かつ柔軟な運用を可能とするSDN(Software Defined Networking)技術と，迅速な障害箇所特定や障害迂回を可能とするマルチレイヤ監視制御技術の開発を進めている⁽⁴⁾。

3. アクセスネットワーク技術

3.1 光送受信器技術

アクセスネットワークの大容量化の要求に合わせ，既存のGE-PON(Gigabit Ethernet-PON)の10倍である10Gbps級の伝送容量を持つ10G-EPONシステムに適用可能な局舎装置(Optical Line Terminal: OLT)用，及び宅内装置(Optical Network Unit: ONU)用光トランシーバを，それぞれXFP(10 Gigabit Small Form Factor Pluggable Module)サイズ，SFP+(Small Form-factor Pluggable+)サイズで実現し⁽⁵⁾，自社製半導体チップを用いることでIEEE802.3-2012 PR30規格を満足する性能を実現した。

また，近年のモバイルトラフィック増加を受けて，モバイル基地局収容が可能なアクセスネットワークとして，40Gbps級の伝送容量を実現する次世代アクセスシステム(NG-PON2)について，2015年頃の完了を目指してITU-T(G.989シリーズ)で標準化作業が行われている。これまでのPONシステムで用いられている時分割方式に，波長多

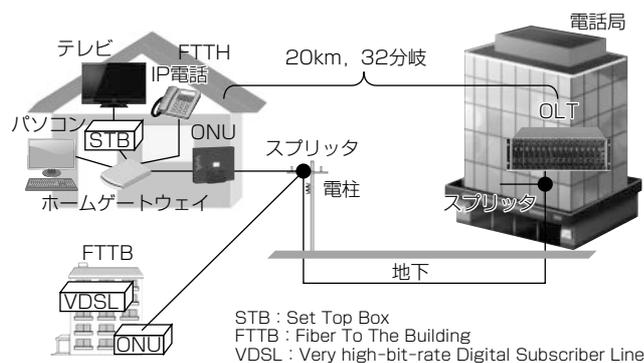


図3. PONシステム

重技術を適用したTWDM-PON(Time and Wavelength Division Multiplexed-PON)が議論されており，様々なサービスを統合的に運用できる将来の光アクセス方式として期待されている。主なシステム要求条件として，従来の光アクセスシステムより多分岐，長距離である64分岐以上，40km以上の伝送や，既存PONシステムとの共存が要求されており，実現に向けては，ONU用光トランシーバのカラーレス化や，OLT用光トランシーバの高出力化・高感度化が技術課題である。当社ではこれらの課題解決に向けたフィージビリティスタディを進めており，ONU向け光トランシーバについては，単一の送信光源を用いて波長制御する安価な構成によって，100GHz間隔で4波長分をカバー可能な良好な送信特性を確認している⁽⁶⁾⁽⁷⁾。一方，OLT向け光トランシーバについては，独自のピーク検出型高速利得制御方式の受信ICによって，G.989.2の受信特性規格を満足する高感度・広ダイナミックレンジ特性を確認している⁽⁸⁾。

3.2 PON制御技術

PON方式は，多数の加入者が1本の光ファイバを共有することによって経済的に光通信を行う通信方式である(図3)。複数の宅内装置(ONU)の送信光信号が衝突しないように，局側装置であるOLTが各ONUの光信号送信時間をナノ秒単位でスケジューリングしている。

光ファイバを複数加入者で共有することは経済性を高めるメリットがある反面，光ファイバの障害又は局側装置の故障の影響が多数の加入者に及んでしまうという課題があった。現在普及している1GbpsクラスのPONシステムであるGE-PONシステムの後継機で，10倍の伝送容量を持つ10G-EPONシステムでは，加入者当たりの通信容量拡大のみならず，収容加入者を増やすことでコストを低減するという需要もあり，耐障害性を高めることが重要になる。また，通信容量拡大には電子回路の高速動作が必要であり，消費電力増加も課題である。これらの課題を解決する技術として，当社では冗長切換え技術と宅内装置の省電力制御技術を開発した。

冗長切換え技術は，OLTが装置の故障又は，光ファイ

バ断などの障害を検出した後、通信経路を自動的に迂回経路に切り換える技術である。障害発生時に備えて待機状態にさせておく予備のハードウェアが必要であるため、装置のコスト増大が問題となるが、これを、複数の運用系の光回線インタフェース部に対して1つの予備系インタフェース部を設ける構成⁽⁹⁾とすることで、耐障害性とコスト低減を両立させる(図4)。

また、FTTH加入者は日常生活で常時データ送信を行っているわけではなく、実際にはデータアップロードなどの瞬間のみデータ送信を行っている。省電力制御技術は、ONUのデータ量を監視してデータを送信していない時間帯は電子回路への電力供給を停止することで消費電力を低減する(図5)。電子回路を停止すると、データ送信を開始する際に再度通信可能な状態になるまでの時間が通信サービス品質を劣化させてしまう問題がある。これを、回線インタフェース部は動作を停止させるが、省電力制御を行う制御部については動作状態とし、回路の動作停止、再開をミリ秒単位で行うことによって、加入者に提供するサービスに影響せずにONUの消費電力を3割程度低減する⁽¹⁰⁾。

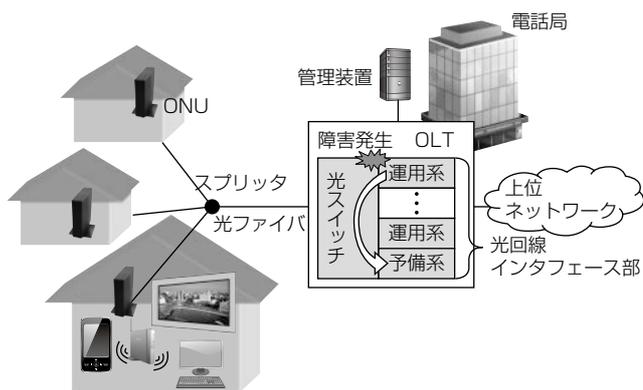


図4. 冗長切換え技術

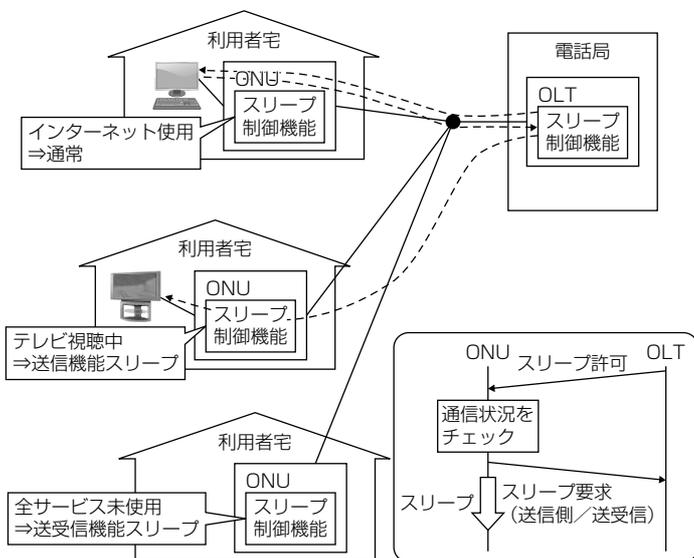


図5. 宅内装置の省電力制御技術

4. アクセスネットワークの標準化動向

PONの標準化はITU-TとIEEEの二つの標準化団体で行われてきた(図6)⁽¹¹⁾。ITU-T規格ではPON区間を転送する専用フレームにユーザーデータをカプセル化して転送し、IEEE規格ではイーサネットフレームを透過転送するという違いがある。国内では、当初ITU-T規格で下り600Mbps、上り150MbpsのB-PON(Broadband-PON)が導入され、ギガビット時代に入ると、2004年にIEEEで標準化が完了した下り1Gbps、上り1GbpsのGE-PONが普及した。一方、海外では国際規格であるITU-T規格に準拠していることを導入の条件とする国が多く、下り2.5Gbps、上り1.25GbpsのG-PON(Gigabit-PON)が普及している。

10GbpsクラスのPONシステムについては、IEEEでは下り10Gbps、上り10Gbps及び1Gbpsの10G-EPON、ITU-Tでは下り10Gbps、上り2.5GbpsのXG-PON(10-Gigabit-capable PON)が標準化され、今後、導入が進むと予想される。10GbpsクラスのPONでは、ITU-T規格とIEEE規格の融合も行われ、IEEE規格のデータ伝送方式に、ITU-T規格の監視制御方式を適用するPONシステム(G.epon)がITU-Tで標準化された。日本ではIEEE規格のPONが広く導入されているが、ITU-Tとの規格の融合によって、日本の技術の海外展開も期待される。当社は、2000年から両方の標準化に積極的に参加し、PONの規格融合についても推進してきた。

ITU-Tでは次世代の光アクセスシステムとして、伝送容量10GbpsクラスのシステムをNG-PON1、さらに大容量のシステムをNG-PON2と定義しているが、NG-PON2は40Gbpsの伝送容量のシステムとして2012年から標準化開始された。NG-PON2は、10GbpsクラスのPONを4システム分別波長を割り当て、波長多重技術を用いて同一光ファイバで通信を行うTWDM-PONを基本とし、波長チャンネルを1台のONUに専有させるPtP-WDM(Point to Point Wavelength Division Multiplexing)オプションが定義されている。次世代のビジネス専用線、無線基地局など、データトラフィックの大きいアプリケーションへの適用が想定されているが、波長多重技術導入に伴う光部品の低コ

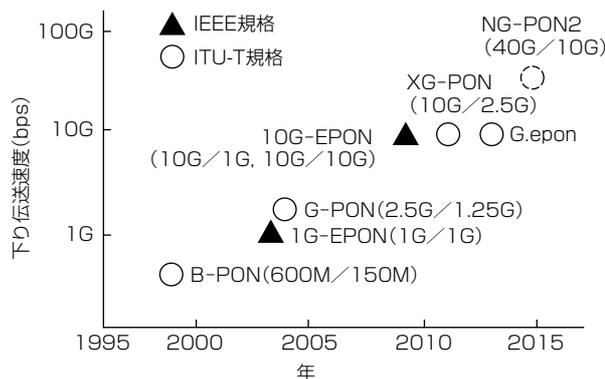


図6. 光アクセスの標準化動向

スト化が普及に向けた課題となる。

5. 今後の展開

5.1 コアネットワーク

今後2016年から2020年にかけて400Gbps又は1Tbpsといった更に大容量の伝送システムが要求されると予想される。当社はこれまで培ってきた光送受信技術、誤り訂正技術の深化に加え、光信号の波長を自由に設定可能なフレキシブルグリッド技術によって大容量化を実現する。

また、大容量化に伴う通信切断時のインパクト増大への取組みとして、任意の経路で光信号の転送を行う多方路システムによって、災害に強いネットワークを提供する。このシステムでは異なる波長の光信号ごとに任意の経路を設定でき、柔軟な運用が可能である。同時に、これらの技術を利用したネットワーク運用の簡易化・効率化を実現するため、監視制御面ではSDN技術等を利用した、ネットワーク全体を仮想化して管理するための技術を開発する。

5.2 アクセスネットワーク

アクセスネットワークの方向性として、無線と有線のシームレス化と通信と放送の融合の2点が想定される。

スマートフォン、タブレット端末の普及につれて、モバイルトラフィックが急増している。今後、動画のやりとりなどの使用形態に応えるため、モバイル端末自体のデータ伝送速度の高速化、さらには、カバーエリアが数百m程度のスモールセル基地局の導入が進み、スモールセル基地局と電話局間に必要となる多数の光回線を低コストで提供する技術が求められる(図7)⁽¹¹⁾。また、4K/8Kハイビジョン放送に必要な大容量の通信回線には光通信が適しており、高速でかつ安定した光回線を一般ユーザーに低コストで提供することが求められる。当社はこれらの需要に対応するため、10G-EPONシステムと併せ、NG-PON2などの次世代光アクセスシステムの研究開発を進めていく。また、データセンター接続等の大容量化に対応するため、メディアコンバータの高速化や、スマートグリッドに代表される

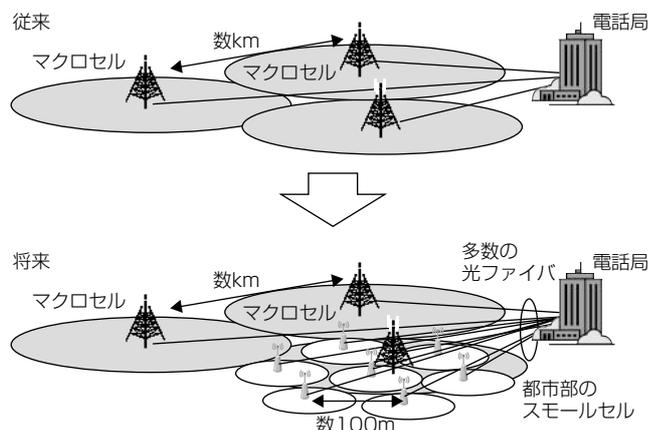


図7. 次世代の無線基地局

M2M(Machine to Machine)分野へのPONシステムの適用、高信頼で柔軟なネットワークを構成するための仮想化技術等にも取り組み、豊かな情報社会の構築に貢献していく。

6. むすび

当社の光通信技術の研究開発への取り組みについて、コアネットワークとアクセスネットワークの要素技術、及びアクセスネットワークのPONに関する標準化について述べた。

また、今後の技術開発の展開について述べた。

この開発成果の一部は、独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究“光トランスペアレント伝送技術の研究開発(λリーチ)”から得られたものである。

参考文献

- (1) 佐藤升一, ほか: 100Gbps長距離伝送技術, 三菱電機技報, **87**, No.5, 281~284 (2013)
- (2) Binkai, M., et al.: Experimental Study of the Non-linearity Tolerance of a 100Gbps Dual-Carrier DP-BPSK Signal on a 3,080 km In-line Dispersion Compensated Fiber Link, COIN2014 (2014)
- (3) Sugihara, K., et al.: MSSC-LDPC: Multiple-Structured Spatially-Coupled type LDPC, OFC/NFOEC 2013, OM2B.4 (2013)
- (4) Gao, S., et al.: A Study of SDN-based Control Architecture for Optical Transport Networks employing an SDN Adaptor with GMPLS Signaling, SDN/MPLS2014 (2014)
- (5) 後藤秀樹, ほか: 10G-EPON向け光トランシーバ, 三菱電機技報, **86**, No.6, 327~330 (2012)
- (6) Ihara, S., et al.: Experimental Demonstration of C-band Burst-mode Transmission for High Power Budget (64-split with 40km distance) TWDM-PON Systems, ECOC 2013, Mo. 4.F.2 (2013)
- (7) Ashida, T., et al.: Experimental Study of C-band EML based ONU Burst-mode Transmitter for 40Gbit/s TWDM-PON, OFC 2015, Tu3E.6 (2015)
- (8) Mita, D., et al.: A Wide Dynamic Range, Rapid-response Burst-mode Receiver for TWDM-PON, OECC/ACOFT 2014, TH11A-4 (2014)
- (9) Sakamoto, K., et al.: Protection Schemes Beyond Currently Defined in FTTx, OFC/NFOEC2014, NM2I.6 (2013)
- (10) Mukai, H., et al.: ONU power saving scheme for EPON system, IEICE TRANSACTIONS on Communications, **E95-B**, No.5, 1625~1632 (2012)
- (11) 向井宏明: 次世代光アクセスの標準化動向, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, TK-1-2 (2014)