省電力な光ネットワーク研究の最前線

山中 直明, 徳橋 和将, 竹下 秀俊

慶應義塾大学 理工学部情報工学科 (〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉3-14-1)

A State-of-the-Art Low-Power Optical Network Research

Naoaki YAMANAKA, Kazumasa TOKUHASHI, and Hidetoshi TAKESHITA

Department of Information and Computer Science, Keio University, 3-14-1 Hiyoshi, Kohoku, Yokohama, Kanagawa 223-8522

(Received January 20, 2012)

The power consumption of network devices will continue to increase due to the increase in transmission speed and reach 97 GW by 2020. This paper introduces urgently needed network power reduction methods. First, the paper focuses on the optical access network architectures that use active devices such as high-speed optical switches or variable wavelength lasers to achieve significant energy savings. These new architectures are expected to dramatically reduce the Optical Network Unit (ONU)'s power consumption by introducing an effective sleep mode. Second, this paper introduces an extremely energy efficient future-Internet architecture that uses a large optical aggregation network. It combines the centralized Service Cloud with the Cloud Router and application servers and the Optical Aggregation Network. The optical aggregation network can be realized with just simple optical circuit switches, wavelength-converters, and wavelength-multiplexers/demultiplexers; the complicated layer-3 function is realized only at the center Cloud Router. The optical aggregation network realizes a network structure well suited to today's traffic centralization. According to our evaluation, total network power consumption can be reduced to just 1/1000 compare to the electrical based network architecture.

Key Words: Power consumption, Fiber To The Home (FTTH), Access network, Optical aggregation, Service cloud

1. まえがき

インターネットは、非常に便利なネットワークであり、今や生活基盤の一つとなっている。しかし、インターネット利用者数が飽和状態に近づきつつあるものの、2009年の全世界でのインターネットのトラフィックは年率約45%で増加し、瞬時トラフィックは約14 Tbpsに達している¹⁾。また、そのネットワーク機器の消費電力は増大しており、世界的には、トラフィックの急増に対応してネットワーク機器の消費電力が、年率約12%で増加している。2020年には97 GW(2008年の約4倍)に達すると推定されており²⁾、消費電力の削減は極めて重要な課題となっている。

そこで本論文では、ネットワークの消費電力の約80%を占める³⁾アクセス系について検討を深め、具体的な光アクセスシステムについて提案すると同時に、ネットワーク全体としてエネルギー効率の高い「サービスクラウド型光アグリゲーションネットワーク」を提案する。

2. 光アクセスネットワークのスマート化

2.1 光アクセスネットワークの動向

現在、アクセスネットワークにはFTTH(Fiber To The Home)、ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)、CATV(Community Antenna TeleVision)、BWA(Broadband Wireless Access)等があり、その中でも光ファイバを加入者宅へ直接引き込むFTTHが最も広く普及している。FTTHでは、PON(Passive Optical Network)と呼ばれる光アクセスネットワークが用いられる。Fig. 1にPONのアーキテクチャを示す。PONは局側装置であるOLT(Optical Line Terminal)、加入者側装置であるONU(Optical Network Unit)、パッシブデバイスの光コプラから構成される。1台のOLTが複数のONUを収容するツ

Fig. 1 Passive optical network architecture.

リー型トポロジにより、光ファイバを共有することで専用線に対して経済的なアクセスネットワークを実現する。現在広く利用されるGE-PON(Gigabit Ethernet-PON)では、Ethernetフレームをデータ伝送に使用し、通信速度1 Gbps、最大収容加入者数32、最大伝送距離20 kmを想定し、ユーザ間で時間分割多重方式を用いて通信を行う。また、10 Gbpsの通信速度を実現する10 GE-PON(IEEE 802.3 av)の標準化が2009年9月に完了し、今後の実用化が予想される。PONの利点として、安価な光カプラを用いるため、低コストであることが挙げられる。しかしながら、光カプラで光パワーが分岐するため、OLTの収容可能加入者数の増加や、OLT-ONU間の伝送距離の伸長が困難などの欠点をもつ。ゆえにシステム数、基地局数も増加する傾向にある。

そのため加入者収容光ファイバラインの高延長化、OLTの加入者収容数の拡大を狙う次世代PONの研究も進められている^{4,5)}。ラインの高延長化については50 km～100 km、OLTの収容加入者数は64加入～1000加入が目標である。これは1つの光アクセスシステムのカバーエリアを拡張することで集約効果を狙い、基地局数を減らし、消費電力およびコスト削減を行うためである。

また一方で、アクセスネットワークの消費電力の内訳を見ると約60%は加入者宅に設置されるONUによる消費であると推定されている³⁾。したがって、光アクセスネットワークにおいて、ONUの消費電力の削減は極めて重要な課題である。現在、ONUの消費電力低減についてはチップや回路の省電力化⁶⁾、ONUの起動と休止を管理するONUスリープモード^{7,8)}が主に検討されている。ONUスリープモードとは、ONUの使用しない一部の機能を一時的に休止して消費電力を削減する技術である。ONUスリープモードはソフトウェアおよびハードウェアの両側面から研究されており、ONU内部のどのデバイスをスリープさせるかにより、消費電力および再起動に要する時間が変化する⁸⁾。

以上よりFTTHの省電力化には、ラージスケール化によるシステムの集約、およびONUの消費電力の削減が重要であると考えられる。本項目では、これら消費電力の削減方法について主にネットワークアーキテクチャの観点から検討する。

2.2 ONUの内部構成

まずFig. 2にONUの内部構成⁹⁾を示す。ONUは大きく分けて、フロントエンドアナログ回路およびバックエンドデジタル回路から構成される。OLTより受信した光信号はPD(Photodiode)で電流信号に変換され、TIA

Fig. 2 ONU configuration diagram.

(Transimpedance Amplifier)で電流信号は電圧信号に変換される。その後、LA(Limiting Amplifier)で一定の振幅をもつ電圧信号となり、CDR(Clock Data Recovery)で重畳されているクロックとデータを分離する。分離されたデータはデジタル回路へ渡され、ユーザの元に届く。ONU全体の消費電力についてはデバイスにもよるが約6 W程度である⁶⁾。また長距離伝送時には高い検出能力を持つ受光素子が求められるため、APD(Avalanche Photodiode)を用いて5dBのパワーバジェットを向上できることも報告されている¹⁰⁾。しかしながら、一般的にAPDは通常のPDより高価であることから、システム全体に対するコストアップの要因となると考えられる。

2.3 光アクセスネットワーク低消費電力化への検討

本項目では、PONと比較してより低光損失となる光アクセスアーキテクチャを2つ提案する。これは光強度を高めることで、ONUで使用される光デバイスの簡素化、またラージスケールシステムにすることで集約効果、および提案アーキテクチャの特徴を生かしたスリープモードの実現を狙っている。まずFig. 3に提案するActiON(Active Optical Network)のアーキテクチャを示す。我々は、PONのカプラのかわりに、新規開発したPLZT[チタン酸ジルコン酸ランタン鉛)((Pb, La)(Zr, Tr)O₃)]光スイッチを使ったActiONを研究開発してきた^{11,12)}。導波路光スイッチは低消費電力デバイスであり、ナノ秒オーダーの超高速なスイッチングが可能である。光スイッチは光カプラに比べ、光パワーの挿入損失が小さいため、多ユーザ化および長距離伝送が可能となる。また同距離においては強度の高い光信号が到達するためONUを簡素化できる可能性がある。特に今後高速化が図られた場合は重要となる。またさらにPONにおいては、カプラを使用する構造上、悪意あるONUが、他の上り通信に干渉することが可能であったが、本システムではスイッチを用いることで物理的に1対1通信が確立するため悪意あるONUの干渉を防ぐことができる。

また省電力化のためにはシステムのラージスケール化が重要であることは既に述べたが、ActiONでそれを実現する重要な点は光スイッチの分岐数である。現在1×16 PLZT光スイッチまで開発されているが、大規模システムを構成するためには光スイッチと光カプラまたは、1×8や1×16光スイッチの直列接続による併用が考えられる。しかし前者ではカプラを用いるため大幅なロスの低減は実現されず、後者では複数のスイッチ接続により必要以上の挿入損失が発生してしまう。また導波路スイッチチップの消費電力は数十～数百mWオーダーと軽微なものであるが、それを制御するスイッチドライ

Fig. 3 Active optical network architecture.

バーの消費電力はスイッチング頻度にもよるが約2, 3 W(1×8光スイッチ)ほどである。この値自体は小さいものの、ネットワーク全体に対する消費電力が大きいアクセス網では、極力デバイスの消費電力は小さいことが望ましい。したがってワンチップ上で多分岐が可能な導波路光スイッチの製造またその制御システムの低電力化が重要である。またActiONではスイッチを用いることで下り方向もバースト的なトラフィックになるため、ONU受信機のバースト対応が必須となる。また、我々も既に検討および研究開発を行ってきたが¹¹⁾、光スイッチを用いるために、スイッチシステムとの同期、スイッチ制御方法、またそれに伴うONUからのデータフレームの衝突回避方法などが新たな技術課題として挙げられる。

次にもう一つの提案システムであるAWG-PONのアーキテクチャをFig. 4に示す。AWG-PONにおいても狙いはActiONと同様である。AWG-PONでは、あらかじめユーザに波長を割り当て、ファイバの分岐点にAWGを設置する。AWGは波長ごとに光信号を取り出すため、光カプラにより光信号を分割するPONと比較して低光損失で光を分波可能である。しかし現状の可変波長レーザーは超高速波長切り替えを達成しないため、レーザーの波長切り替え時間はガードタイム(通信不可な時間)となる。通信パフォーマンスを維持する場合には、OLT側に10 ns以下で高速に波長切り替え可能なレーザーが必要となる。本稿では、レーザーの波長切り替えによるガードタイム削減手法として、2つの波長可変レーザーおよびPLZT光スイッチを用いたレーザー制御を検討する。レーザー光はPLZT光スイッチで10 ns以下のガードタイムで物理的に切り替え可能である。波長切り替えに要する時間を低減するために、片方のレーザーが信号を送信する間、もう片方のレーザーは波長の切り替えを行う。提案AWG-PONの上り回線は、下り回線同様のAWGを用いた仕組み、または従来のPONと同様に共通波長によるTDMAを用いることを検討している。前者はONUがそれぞれ個別の送信波長に対応する必要がある、そのONUコストが上昇することが考えられる。上記で述べたようにActiONおよびAWG-PONはPONと比較してファイバの分岐点における光挿入損失が少ないため、集約効果による省電力化が望める。

さらにスリープモードにおいても提案方式には利点がある。PONにおけるONUスリープモードでは、主にOLTが各ONUのトラフィックパターンを基にONUへのデータの有無を予測し、スリープ時間を指定して、間欠的にONUを起動させる方法が採用されている。この方法はバースト的に発生するトラフィックや、現在のよう

にダイナミックに変動するトラフィックには向いていない。さらにONUは次のパケットの正確な到着時刻を把握せずにスリープするため、スリープ時間に比例してパケット遅延が大きくなる。そのため、消費電力の削減量とスリープに関連するパケット遅延はトレードオフとなる。

一方で、検討したActiONやAWG-PONにおいてはアーキテクチャの特性でONUは自身のデータのみ受信するため、データの先頭にONUの起動信号を入れる、データドリブンのONUスリープが実現可能であると考えられる。PONでは、光カプラの特性上、下り信号が全てのONUに到着するため、ONUは物理的な信号の有無によって通信再開の判断をすることはできなかった。このようなデータドリブンなONUが実現できると、各ONUに対するトラフィック予測をせずとも、これまで比較的困難であったレシーバーのスリープを適切に行うことができると思われる。その際、ONUアナログ回路のレシーバー部スリープの効果は約1 W弱である⁶⁾。またデータドリブン型スリープモードの今後の検討事項は、データ到着時からの再起動時間である。信号の検出から数クロックでのONU再起動が実現した場合には、データ遅延なく、ONUがデータを送受信する以外の時間をほぼすべてスリープできる可能性がある。デジタル回路を含め理想的に上下回線ともにスリープ状態にできれば、状況にもよるがスリープしない場合と比較してONU消費電力を約80%削減することも望める。

3. サービスクラウド型 アグリゲーションネットワークの提案

いままでの検討は、従来のアクセス網の中で考えていたが、次にサービスも考慮してネットワークアーキテクチャそのものを見直した構成法について検討する。現在のネットワークの構造に関わる以下に示す3つの大きな問題が発生している。

第一の問題は、まえがきで述べたネットワーク機器の消費電力の増大である。

第二の課題は、インターネットのネットワーク構造がトラフィックの集中化に適した構成となっていないことである。インターネットトラフィックは、ピアツーピア(P2P)の相互通信(ファイル交換、VoIP:Voice Over IP, 等)とクライアントとデータセンター(C2D)間のサーバクライアント通信(Webアクセス、コンテンツ/データのダウンロード、等)に大別される。近年C2D通信の比率が急激に増加しており、GoogleやYahoo、アカマイ、等のハイパージャイアンツへのトラフィックの集中化が顕著となり、上位30社のハイパージャイアンツで、全世界のインターネットトラフィックの30%を占めている¹⁾。

第三の課題は、ルータの多段接続により遅延やジッタが大きいことである。Fig. 5に示すように、世界の地域に関わらず、ホップ数(通信でのルータ介在数)の平均は約12ホップである。これはインターネットが自律システム(AS: Autonomous System)を相互接続したフラットな

Fig. 4 AWG-PON architecture.

ネットワーク構造であり、冗長なルータネットワークであることに起因している。

3.1 ルータとスイッチの消費電力の動向

Didier Colleらの検討結果^{†,13)}によると、あるスループットをスイッチングする場合、

[A] 電気ルータに比べ、光スイッチは1/500のエネルギー消費量で済む。

という結論を得ている。これは、レイヤ3の転送処理よりも波長多重ファイバリンクをMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 等の光スイッチで切り替える方が、エネルギーを消費しないという結論である。また、R. S. Tuckerらは、電気のルータの消費電力について研究しており、

[B] 電気ルータでは、消費エネルギーは、スイッチ容量の2/3乗に比例する¹⁴⁾。

という結論を得ている。これは、10 Gbpsのルータを100台並べるよりも、1 Tbpsのルータの方が、省エネルギーとなる可能性があるというものである。

3.2 提案ネットワーク構成

Fig. 5に示すように、インターネットにおいては、平均で12ホップの中継ルータを必要としている。そこで、ルータとスイッチの消費電力の動向[A]、[B]を活用し、Fig. 5のネットワーク構成をシンプル化した将来のネットワークアーキテクチャFig. 6を提案する。Fig. 6においては、すべての加入者を、光によって、レイヤの低い信号のままアグリゲーションして、データセンタ(サービスクラウド)に転送することでネットワークをシンプルな構成にする。サービスクラウドでは、レイヤ3の処理を行ない、目的としている加入者に向けてパケットを転送する。つまり、すべての宛先のパケットを宛先にかかわらず、集中配置されたデータセンタの巨大なデータに転送(アグリゲーション)させ、そこでスイッチするというものである。このアグリゲーションネットワークは、D. Colleの述べている[A]の効果で、ルータ12段と比べて格段に低消費電力化することができる。更に、サービスクラウド中の大規模ルータは、トラフィックに応じ

Fig. 5 Hop number in the Internet.

Fig. 6 Service cloud and optical aggregation network.

て、規模を変更できるものが望ましいが、加入者ルータを複数持つ場合と比べ、クラウドルータへの集約による総スイッチ容量の削減(集線効果)と、Tuckerらが述べている[B]のルータのスイッチ容量の2/3乗で消費電力を低減できる効果により、劇的に消費電力を削減することができる。

Fig. 7に、消費電力の削減効果を示す。1 Gインタフェースのポート数を横軸にとり、消費電力を縦軸として表してあり、2桁から3桁の消費電力の削減効果が期待される¹⁵⁾。

さらに、このアグリゲーション型ネットワークの利点としては、Fig. 8のように、今まではユーザネットワークに備えなければならなかったファイアウォールや、NAT (Network Address Translation) の機能は、レイヤの低いところでクラウドに集線されるために、クラウド内に自由にアダプティブに実装でき (SaaS: Software as a Service サービス)、また、共有化も進む。そのため、これまでこれらのサービス実現のために、これらの装置をユーザが持たなければならなかったが、コストダウンが図れる。

4. システムから見た新しいデバイス技術

将来のアクセス系とネットワークアーキテクチャ全体をみると、今後は光の技術をダイナミックに使えると新しいシステムやネットワークのブレークスルーがあると考えられる。ダイナミックとは、空間的にダイナミック

Fig. 7 Power consumption.

[†] Presentation documents by D. Colle. URL: <http://www-mura.ist.osaka-u.ac.jp/ondm2010/pdf/invited3.pdf>

に振り分ける高速スイッチとか、波長をダイナミックに切り替えられるレーザー、またこれは、安価に、シンプルに絶対波長安定性を実現できるとアプリケーションはひろがる。波長多重については、40 Gbps×40波多重が実用化されているが、更なる波長多重の拡大(64波、128波、それ以上)が期待される。さらにはダイナミックな波長変換器等であろう。また、今までのように、ネットワーク全体を同期して、常にon状態にしているのではなく、使うときだけデータを検出して動作する(データドリブン)技術等も研究する必要があるだろう。また、クラウド時代に適合して、point to pointではなくすべてのトラフィックを集中的にデータセンタに集めることも考えられる。この場合、シンプルで長距離、高多重の線形性やトランスペアレント性の高いネットワーク技術が必要であろう。つまり、複雑な同期網ではなく、シンプルなトランスペアレントネットワークで、end to endで同期処理等も行う方式である。

5. 結 論

本論文では、現在インターネットで問題となっている消費電力について、ネットワークアーキテクチャの視点から検討した。まず、最も消費電力の多いアクセスネットワークに着目し、既存FTTHシステムよりも長距離大規模化が可能なアーキテクチャを提案した。また本アーキテクチャに基づいた新たなONUスリープモードの実現可能性についても触れた。次に既存インターネットの

Fig. 8 Application service in service cloud. (a) Today's internet structure. (b) Proposed service cloud structure.

重要課題に対して、ネットワーク構成をシンプル化したアグリゲーションネットワークの検討を行った。本提案では、すべての加入者を光によって、レイヤの低い信号のままアグリゲーションして、データセンタ(サービスクラウド)に転送することでネットワークをシンプルな構成にする。電気ルータに比べ、光スイッチの消費電力は大幅に少ないため、ネットワークを低消費電力化することができる。以上、光ネットワーク技術を利用して、ネットワークのGreen化に取り組んだ検討結果を述べた。

謝 辞

本研究は科研費(A)22240004、総務省委託研究「リソースを最小化する動的ネットワーク制御システムによる再構成ネットワークの研究開発」および文部科学省グローバルCOEプログラム「アクセス空間支援基盤技術の高度国際連携」の支援を受けたものである。

参考文献

- 1) D. McPherson: *ISOC Researchers*, Hiroshima, IETF76.
- 2) M. Pickavet, W. Vereecken, S. Demeyer, P. Audenaert, B. Vermeulen, C. Develder, D. Colle, B. Dhoedt, and P. Demeester: *IEEE ANTS 2008*, Bombay, 2008.
- 3) H. Hadama: NTT技術ジャーナル **22** (2010) 53.
- 4) D. Breuer, F. Geilhardt, R. Hulsermann, M. Kind, C. Lange, T. Monath, and E. Weis: *IEEE Commun. Mag.* **49** (2011) s16.
- 5) F. Saliou, P. Chancelou, N. Genay, and F. Laurent: *OFC/NFOEC 2011, Los Angeles, 2011*, OThB2.
- 6) L. Valcarenghi, D.P. Van, and P. Castoldi: *ICTON 2011*, Tu.D3.3.
- 7) R. Kubo, J. Kani, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and K. Kumozaki: *IEICE Trans. Commun.* **E93-B** (2010) 280.
- 8) S.-W. Wong, L. Valcarenghi, S.-H. Yen, D. R. Campelo, S. Yamashita, and L. Kazovsky: *IEEE GLOBECOM Workshops 2009, Hawaii, 2009*.
- 9) 宮崎 昭彦, 浦野 正美, 首藤 啓樹, 寺田 和彦: NTT技術ジャーナル **23** (2011) 22.
- 10) 松本 卓郎, 鷲津 聡志, 木村 洋史, 山下 尚一朗, 山崎 仁: NTT技術ジャーナル **23** (2011) 52.
- 11) K. Tokuhashi, K. Ashizawa, D. Ishii, S. Okamoto, N. Yamanaka, K. Wakayama, and K. Nashimoto: *J. Opt. Switching and Networking* **9** (2012) 118.
- 12) K. Ashizawa, K. Tokuhashi, D. Ishii, Y. Arakawa, and N. Yamanaka: *ECOC 2009, Vienna*, No. P.6.12.
- 13) W. V. Heddengen, M. D. Groote, W. Vereecken, D. Colle, M. Pickavet, and P. Demeester: *ONDM2010*, (2010) 2.
- 14) R. S. Tucker: *OFC/NFOEC 2008, San Diego 2008*, OMG1.
- 15) H. Takeshita, D. Ishii, and N. Yamanaka: *COIN2010, Jeju, 2010*, No. TuC1-2.

レーザーワード

光回線終端装置(optical line terminal/optical network unit)

光アクセス網PON(Passive Optical Network)においてネットワークの末端部分に設置される装置。通信局側装置をOLT(Optical Line Terminal)、加入者側装置をONU(Optical Network Unit)と呼ぶ。いずれも光信号と電気信号の変換を行い、上位メトロ・コアネットワーク、あるいは下位ユーザネットワークへのインタフェースを提供する。現在普及しているPONシステムでは、OLTとONUは1心光ファイバおよび光カプラを介して1対多接

続される。OLTはONUの監視制御機能を有し、新規接続されたONUの認証、動的帯域割り当て計算、上りデータ送信時刻の通知などを行う。商用化済みのPONシステムでは分岐数32または64、OLT-ONU間伝送距離20 kmが一般的であるが、IEEEやITU-Tなどの標準化機関においてさらなる多分岐、長延化が検討されている。

(山中 直明)