

ホームゲートウェイ連携による光アクセスシステム系 宅内装置省電力化に向けた制御手法に関する検討

西原 晋[†] 野村 紘子[†] 氏川 裕隆[†] 田所 将志[†] 吉本 直人[†]

光アクセスネットワーク省電力化を目的とし、ホームゲートウェイ (Home gateway: HGW) との連携による光アクセス網終端装置 (Optical network unit: ONU) 省電力化技術を提案し、その際重要となる HGW と ONU 間での具体的連携手法ならびに省電力効率の改善効果、および連携手法の適用先について考察する。

Power-saving Effectiveness Improvement and the Control Mechanisms of Home-gateway Assisted In-home Appliances for Optical Access Systems

Susumu Nishihara[†] Hiroko Nomura[†] Hirotaka Ujikawa[†]
Masashi Tadokoro[†] Naoto Yoshimoto[†]

We in this paper propose a novel power-saving technique of ONU assisted by HGW for advanced energy-efficient optical access networks in the near future. Power-saving effectiveness improvement by our-proposed technique is presented by numerical simulations, addressing signaling methods between the ONU and HGW along with their applicable systems..

1. まえがき

通信インフラのブロードバンド化と、それを用いたサービスの普及が着実に進んできている。日本ではアクセス系において近年、Fiber to the home (FTTH) の普及がめざましい。図 1 に示すように、2011 年 3 月の時点で 2,000 万加入を超えた。ブ

ードバンドな通信環境のもと取り扱うデータの大容量化も進んできており、Youtube による動画公開や Twitter や Facebook といった SNS ツール経由で写真や動画を公開することが当たり前になってきた。一方で CO₂ 排出量削減が重大な企業責任として問われる昨今、通信事業者にとってネットワーク装置の電力使用量削減は急務であり、特に 2,000 万を超えるという膨大な台数ゆえに、光アクセス網終端装置 (Optical network unit: ONU) やホームゲートウェイ (Home gateway: HGW) 等、アクセス系宅内装置の低消費電力化は喫緊の課題である。今後予想される更なる伝送速度増大も併せて考慮すると、何らかの対策を講じなくては現行システムより低費電力化とすることは難しく、アクセス系の電力消費を一層増やしかねない。光アクセスシステムの省電力化手法として代表的なものに、トラヒック非流通時に ONU を定期的にシャットダウンさせる ONU スリープ技術が検討されてきた。本稿においては、アクセス系宅内装置の更なる省電力化に向け、HGW が上りトラヒックを ONU より先んじて知りうるという点に着目し、HGW との連携による ONU 省電力化技術を提案し、その際重要となる HGW と ONU 間での具体的連携手法ならびに省電力効率の改善効果、および HGW-ONU 間連携手法と適用先システムについて述べる。

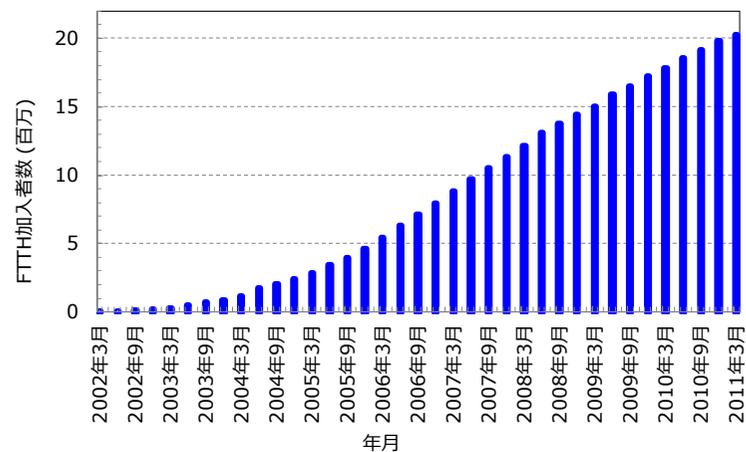


図 1 日本における FTTH 加入者数推移

*[†] 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
NTT Access Network Service Systems Laboratories, NTT Corporation

2. 光アクセスシステムと省電力化要求

2.1 網構成

多くの光アクセスシステムにおいては図2に示すように、Point-to-multipoint型のPassive optical network (PON)方式が採用されている。なぜならPON構成においては、1つの局側終端装置 (Optical line terminal: OLT) を複数のONUで共有することによってシステムを経済的に構成でき、特にマスマーザー展開時の経済性という重要な要求条件を満たすためである。PON方式とは対照的に、Point-to-point型のSingle star (SS) 構成もある¹⁾。SS構成においてはONUが局側装置のOLTを占有するために高速通信が可能であるが、設備コストが高いという課題があり、ビジネスユーザや大規模集合住宅などに適用されることが多い。ONUと接続されたHGWを介してホームネットワークが構成される。ホームネットワーク配下には、PC、VoIP 端末、TV 他、様々な情報家電が接続されることが予想される。

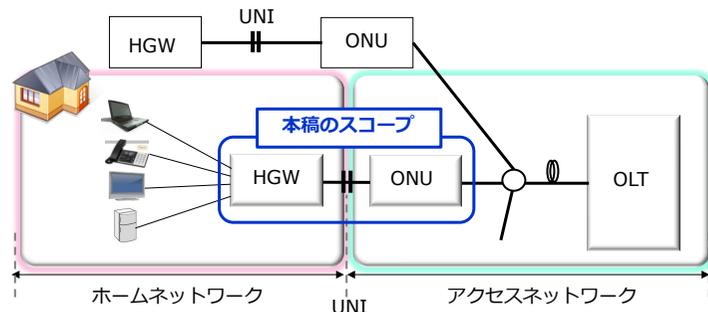


図2 アクセスマネットワークとホームネットワーク構成

2.2 伝送速度

PON方式は伝送速度が年々進んできた。図3に示すように、伝送速度50 Mbit/sのSTM-PON導入に始まり²⁾、155 Mbit/s、622 Mbit/sのB-PON^{3),4)}、1 Gbit/sのGigabit Ethernet PON (GE-PON)^{5),6)}、2.5 Gbit/sのG-PON⁷⁾と年々高速化が進んでおり、更に高速な10Gクラスの10G-EPON⁸⁾やXG-PON1⁹⁾の標準化もそれぞれIEEEとITU-Tで完了した。現在は主にアジアでGE-PON、北米でG-PONが導入されており、次期システムとして10GクラスのPONシステムが開発フェーズにある。

2.3 アクセスマ系宅内装置に対する省電力化要求

昨今の省エネ、省電力化要求は国、個人、法人を問わない社会的要請事項となっている。特にONUやHGWといったアクセスマ系宅内装置は数千万にもおよぶ膨大な数が流通し、HGW配下の各種情報家電も考慮に入れると、今後宅内装置の流通数は

増大することが予想されるために消費電力の面で与える影響が大きい。さらに、現行1 Gbit/sのGE-PONシステムが今後さらに高速なシステムにアップグレードされる際は、装置を構成する電気デバイス的高速動作性能も求められる。それにより増大するデバイス動作周波数は、更なる消費電力の増大を招く可能性がある。従って、アクセスマ系宅内装置の省電力化は今後の通信ネットワークにおいて極めて重要な課題の1つである。

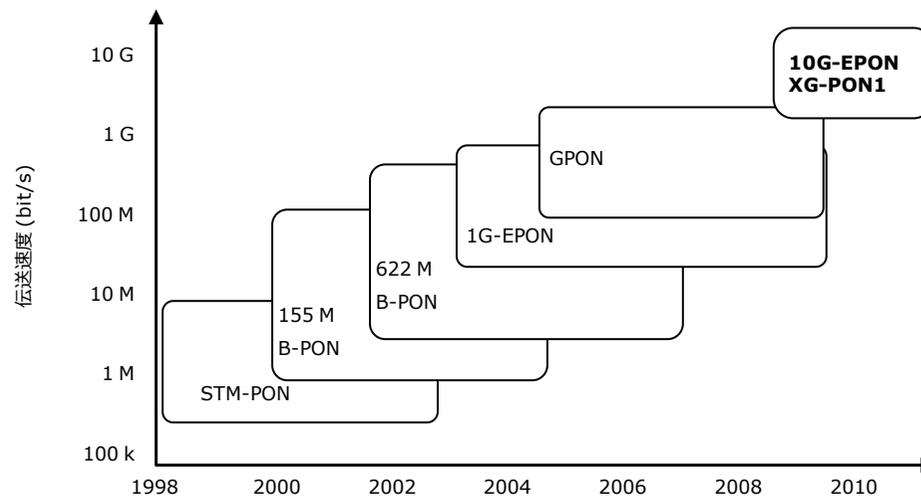


図3 PON方式高速化の推移

3. アクセスマ系宅内装置省電力化手法

本章では、アクセスマ系宅内装置の省電力化手法概要を、主に装置間連携に基づくネットワーク側、および装置レベルのデバイス側双方から説明する。

3.1 ネットワークレベル

代表的な技術としてONUスリープ⁹⁾⁻¹³⁾、適応リンクレート切替技術 (Adaptive link rate switching: ALR)^{10), 14)-16)}が挙げられる。図4にその概要を示すように、ONUスリープ技術とは、トラフィック非流通時に省電力モードで動作し、ONUを構成する光電気部品に対する給電を停止することによって装置を省電力化する技術である。入力トラフィックが存在する時は通常通りOLTと通信するが、入力トラフィックが無くなると省電力モードに移行する。省電力モードにおいても、定期的に起動してOLTと通

信し、トラフィック有無やリンク正常性を確認する。一方 ALR は、低速動作時の方が ONU を構成するデバイスの動作周波数が低いことに着目した技術であり、入力スループットが低くなると動作モードを低リンクレートモードに切り替え、ONU 消費電力を抑制する。ONU スリープにおいて ONU-OLT 間で制御メッセージが送受信される際の動作概要を説明する。図 5 では、ITU-T において規定されている、ONU の光送信器のみをスリープさせる Doze という方式⁹⁾の動作例を示す。任意の ONU において上りトラフィックが無くなり、また、OLT 側でその ONU が Doze に入ると判断したとする。すると OLT から ONU に対して SleepAllow (ON) (SA (ON)) が送信される。SA (ON) には、その ONU の Doze 遷移を許可するという情報や、スリープ時間、次に間欠起動して OLT に対して制御信号を送信する時刻に関する情報などが含まれる。図 5 においては、ONU が Doze 遷移を選択し、Sleep Request (Sleep) (SR (Sleep)) を OLT に対して送信している。SR (Sleep) 送信後 ONU は光送信器 (Optical transmitter: Tx) に対する給電を停止している。Doze においては光受信器 (optical receiver: Rx) は起動したままであるため、下り信号を引き続き受信する。OLT から指定された所定のスリープ時間後、OLT からの SA (ON) を再び ONU は受信し、ONU は Tx への給電を再開し、やはり指定された時刻に SR (Sleep) を再び OLT に対して送信し、再度 Tx に対する給電を停止している。ONU において、Tx は消費電力の多い部品であるため、Doze は一般的に有効な省電力化手法である。

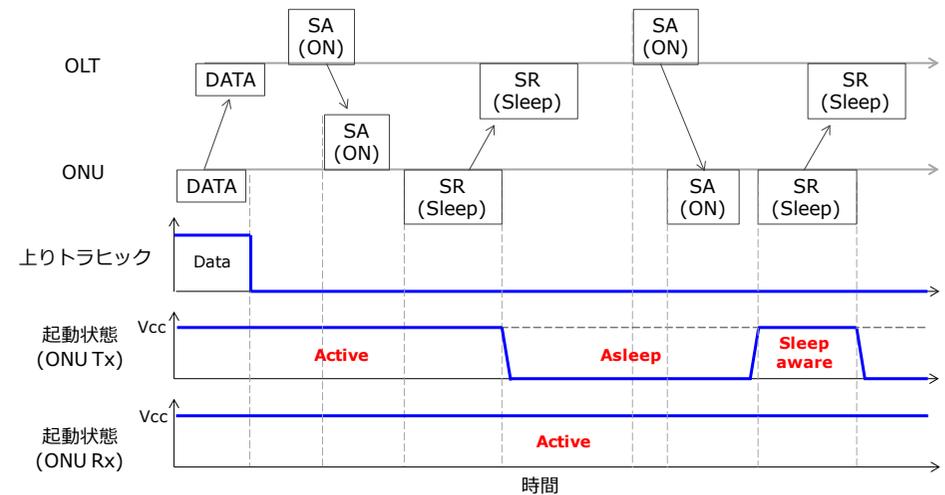


図 5 Doze の動作例

3.2 デバイスレベル

デバイスのアプローチとして、半導体プロセスの微細化による電気部品動作電圧の低下が挙げられるが、リーク電流という課題もあり、長期的視点での取り組みが精力的になされている。また、ONU および HGW のハードウェア構成例を図 6 に示す。ONU、HGW といったアクセス系宅内装置は、バッファメモリや物理インターフェイスといった冗長な要素を含んでいる。これらの機能を統合することによる装置省電力化技術の他、非使用部位に対する給電を停止するパワーゲーティングや、クロック供給を停止するクロックゲーティングなどの技術が LSI レベルでは検討されている。パワーゲーティングやクロックゲーティングは省電力効果と応答時間との間にトレードオフが存在するため、適用部位を的確に選択する必要がある。IEEE において標準化された Energy-Efficient Ethernet¹⁷⁾というメカニズムも昨今導入が進んできている。こちらは、User-Network Interface (UNI) を構成する LAN インターフェイス間トラフィックが無くなった時に、サービスに悪影響を与えることなく UNI を構成する送信器および受信器に対する給電を制御するものである。

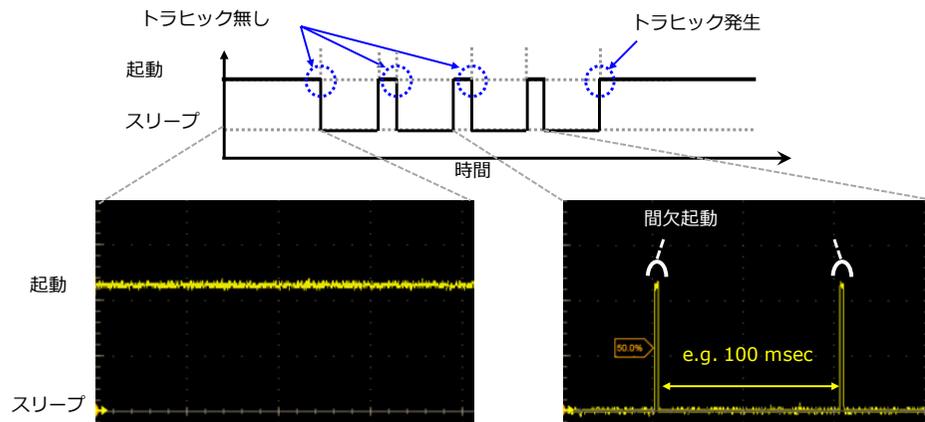


図 4 ONU スリープ動作概要

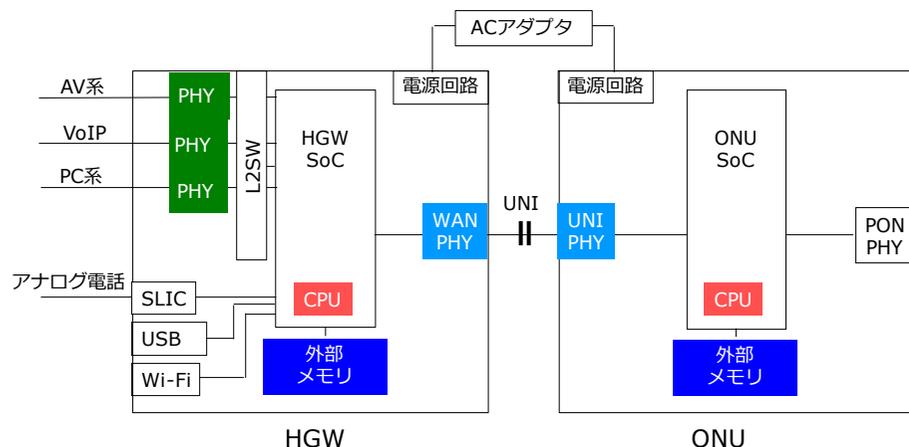


図6 ONUおよびHGWのハードウェア構成例

4. HGW連携によるONU省電力化

今後 FTTH がさらに普及し高速化が進み、また、ホームネットワークの普及により様々な装置や機器が HGW を介して接続されることが予想される。その際には、それら宅内装置の利用状況をモニタした上で該装置を構成する非使用部位に対する給電を適応的に制御することにより、アクセス系宅内装置が中心となった制御に基づく、よりスマートな省電力ネットワークが実現可能と考えられる。そこで本稿においてはその第1ステップとして、我々がこれまで検討してきた ONU スリープ技術による省電力化を、HGW との連携によりさらに向上させることを検討する。まず ONU スリープの課題を整理した後、本提案の HGW 連携による ONU 省電力化技術を説明する。

4.1 ONUスリープの課題

ONU スリープでは、トラヒック非流通時において、3.2 で述べたようなパワーゲーティングやクロックゲーティングといった、非使用部位に対する給電範囲を制御するアプローチがある。また、給電停止時間を可能な限り増やすというアプローチもある。本稿においては特に後者に着目し、理想的なスリープ時間が制限されるという課題を以下の通り整理する。

4.1.1 入力トラヒック間隔閾値時間

スリープモードに遷移する際、入力トラヒック間隔に関する閾値時間が必要であった¹⁰⁾。スリープモード遷移可否を判断するため、トラヒック入力状況を監視し、

一定期間にわたってトラヒックの入力がないことを判断した後にスリープモードに遷移するが、スリープ可能な時間が制限される。

4.1.2 ソフトウェア処理時間

スリープ/起動に関する命令をソフトウェア的に処理する際、ONU 内蔵プロセッサにおける遅延が発生する。

4.1.3 デバイス過渡応答時間

給電制御対象の光・電気デバイスはスリープ/起動の状態遷移に一定の時間を有する。特に電源回路周辺の応答時間に律速されるが、電子回路の安定動作や信号に対する雑音抑制、素子信頼性確保といった点で高速起動/停止に技術的課題がある。

4.1.4 スリープ/起動間遷移頻度

スリープ/起動状態の間で遷移する頻度が高い場合はスリープ可能な時間が減少するため、好ましくない。

4.2 提案手法—HGW連携による省電力化技術

4.1 で述べた要因により、図 7(a) に示すように、ONU の理想的なスリープ時間は制限を受けてしまう。すなわち、トラヒック到着閾値時間間隔分や各種遅延により、スリープ時間が減少し、トラヒック到着間隔が短い際はスリープにすら入れないことも起こりえる。そこで我々は ONU スリープにおけるスリープ時間を可能な限り延ばすため、HGW が上りトラヒックに関する情報を ONU に先んじて知りうる点に着目し、スリープ/起動時の遷移タイミングを HGW 側から制御する手法を提案している^{18), 19)}。図 7(b) に示すように、ソフトウェア処理の遅延を見込んだ上で早めに状態遷移に関するトリガ信号を HGW から ONU に対して与える。本手法により、従来必要とされていたトラヒック到着閾値時間間隔を不要に出来るだけでなく、ソフトウェア処理分の遅延をオフセットできるため、スリープ時間を延ばして理想的に近づけることが可能になる。また本手法は Frame-by-frame での高速転送を基本とするもので、理想的には遅延の増大なしにスリープ時間を可能な限り増大させることが可能である。さらに、スリープ/起動の遷移に要する遅延およびその頻繁な状態遷移によるスリープ時間の制限を解決するため、バッファフレーム一括送信技術を提案している²⁰⁾。本提案手法においては優先度毎に異なる複数のキューを HGW が有する。図 8 に本手法の動作概略を示す。HGW はキュー#1、#2 から構成され、それぞれ高優先度および低優先度のフレームをバッファする。UNI 側からキュー#2 にフレームが入ると、ある閾値時間の間はバッファし続ける。その閾値時間以内にキュー#1 にフレームが入力されると、キュー#1 のフレームを送信するタイミングに合わせて、キュー内の全フレームを一括送信する。本手法によってスリープ/起動の状態遷移頻度を削減できるため、スリープ時間を増大させ、省電力効果を向上可能である。前述のバッファ時間に関する閾値時間は、バッファフレームが運ぶデータのサービス要求条件、特に低遅延性に対する要求条件に依存する。

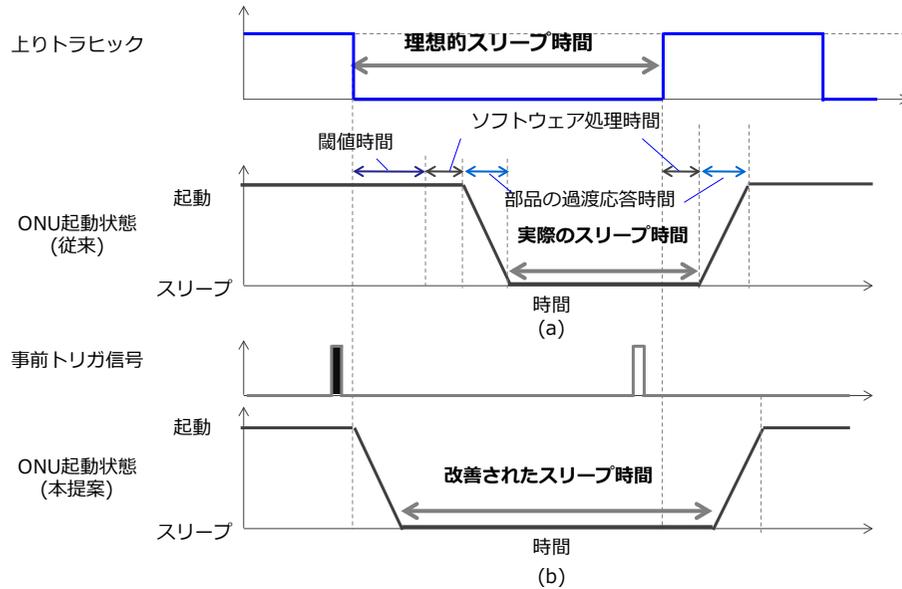


図7 (a) ONU スリープの課題と (b) 事前トリガ信号によるスリープ時間改善

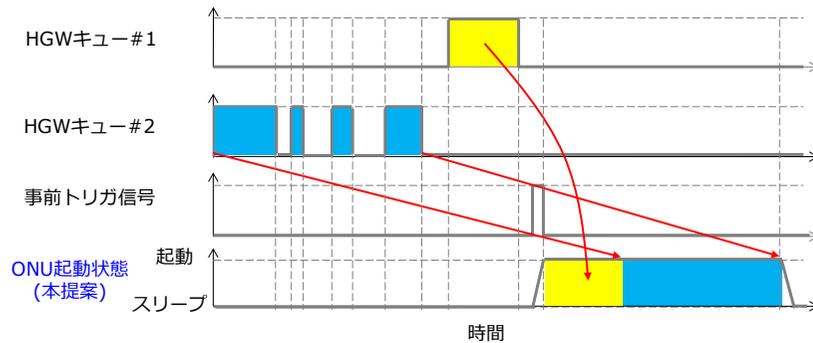


図8 バッファフレーム一括送信による省電力効果改善

4.3 提案手法によるスリープ率改善効果

提案手法による省電力効果を数値計算によって検証した。

4.3.1 計算条件

本稿においてスリープ率 E を、スリープ可能な時間に対するスリープ時間の割合と定義すると、本手法におけるスリープ率 E は下記のように表すことができる。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{t_{slp_eff_i}}{t_{slp_ideal_i}}}{\frac{\sum_{i=1}^n \{t_{cycle} - (t_{cmd_i} + 2 \cdot t_{trn} + t_{frame_i})\}}{t_{obs} - \sum_{i=1}^n t_{frame_i}}}$$

ここで n は観測サイクル数、 t_{cycle} はスリープ周期、 t_{eff_i} 、 $t_{slp_ideal_i}$ 、 t_{cmd_i} 、 t_{frame_i} はそれぞれ、各サイクルにおける正味のスリープ時間、スリープ可能な時間、ソフトウェア処理時間、および送信フレーム時間である。また、 t_{trn} は部品の過渡応答時間、 t_{obs} は全観測時間である。10 Gbit/s リンクにおいて、 t_{cmd_i} は 0-5 msec の間で一様乱数として発生させ、スリープ率 E のスループット依存性を t_{trn} が 1、5 msec の場合それぞれにおいて計算した。フレーム長は 1250 Byte で固定とし、フレーム到着間隔はポアソン分布に従うものとした。比較のため、従来手法におけるフレーム到着間隔閾値を 20 msec とし、その際はソフトウェア処理遅延を 10 msec とした。提案手法の原理確認をするため、事前トリガ信号に関しては理想的で、過剰遅延は考慮しないものとする。

4.3.2 Frame by Frame 転送による低遅延転送技術

提案手法によるスリープ率改善効果を下に、ONU 光トランシーバ (Optical transceiver: TRx) に対して Tx をスリープさせる Doze を適用した際における、TRx 消費電力のスループット依存性に関する計算結果を図 9 に示す。10G 級 ONU TRx 消費電力を 2 W とし、うち Tx が 1.5 W と 75% を占め、Rx が 0.5 W 消費するものとした。消費電力半減を達成可能なスループットに着目すると、従来手法では 100 kbit/s 強のスループットしか得られなかったものの、提案手法によりスループットを倍増することが可能であることが図 9 より分かる。また、デバイスの過渡応答時間を 1 msec に短縮することにより、TRx 消費電力を半減可能なスループットを 5 倍程度まで改善できることが示唆された。

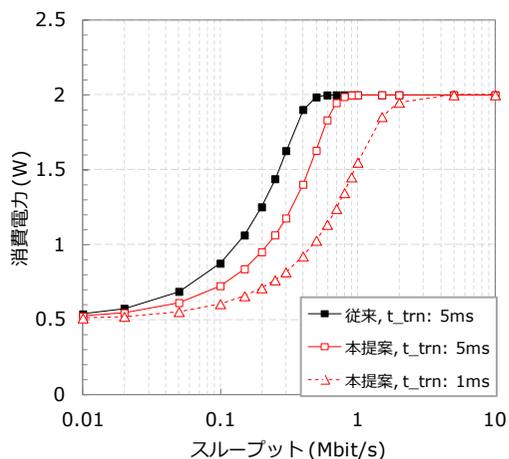


図9 事前トリガによる Frame-by-frame 転送手法による TRx 省電力効果

4.3.3 バッファフレーム一括送信技術

本手法において、高優先度サービスとして VoIP トラフィックを想定し、 t_{cycle} を 20 msec とし、TRx 消費電力および必要バッファ量のスリープット依存性を t_{trn} が 0.1、1、5 msec の場合において計算した。4.3.1 同様、スリープモードとしては Doze の適用を仮定した。その結果、図 10 に示すように、事前トリガによる Frame-by-frame 転送では省電力化が困難だった、Mbit/s 以上の高いスリープットにおいても、本手法によって数 Mbyte オーダの必要バッファ量で高い省電力効果が得られる可能性があることが分かった。また、部品の過渡応答時間をサブ msec オーダに高速化することにより、高スリープット下においても TRx 消費電力を半減可能であることも併せて示唆された。

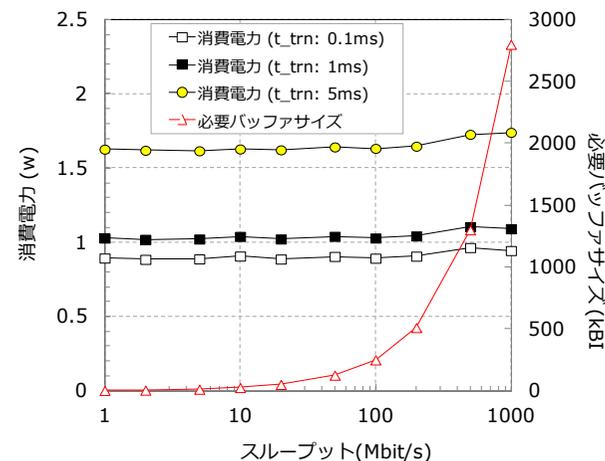


図10 バッファフレーム一括送信による TRx 省電力化効果と必要バッファサイズ

5. ONU-HGW連携手法の検討

HGW と ONU 間で、4.2 で述べたスリープ/起動に関する制御信号を送受信する際の手法について、以下で説明する。

5.1 要求条件

HGW と ONU 間の連携において、スリープ/起動に関する制御信号通知機能を実装する上での要求条件を述べる。第 1 に、制御信号の処理により生じる遅延を最小限にすることが要求される。第 2 に、主信号に悪影響を与えないこと、つまり正味のデータの帯域を浪費しないことや、雑音の発生により主信号の S/N 比を劣化させないことが要求される。第 3 に、可能な限り汎用的なインターフェイスや拡張性の高い制御プロトコルを採用することによって、ハードウェアの汎用性を損なわず、不用品装置コストの増加を招かないことが要求される。上記を鑑み、制御信号として適用可能と考えられる手法について以下で説明する。

5.1.1 ONUスリープに関する制御信号

例えば 3.1 の図 5 で説明した、SA や SR といった ONU スリープに関する制御フレームを、図 11 に示すように HGW まで転送するアプローチが考えられる。本制御メッセージは標準化されたフレームおよびフレームフォーマットに準拠するため、汎用性が確保されている。

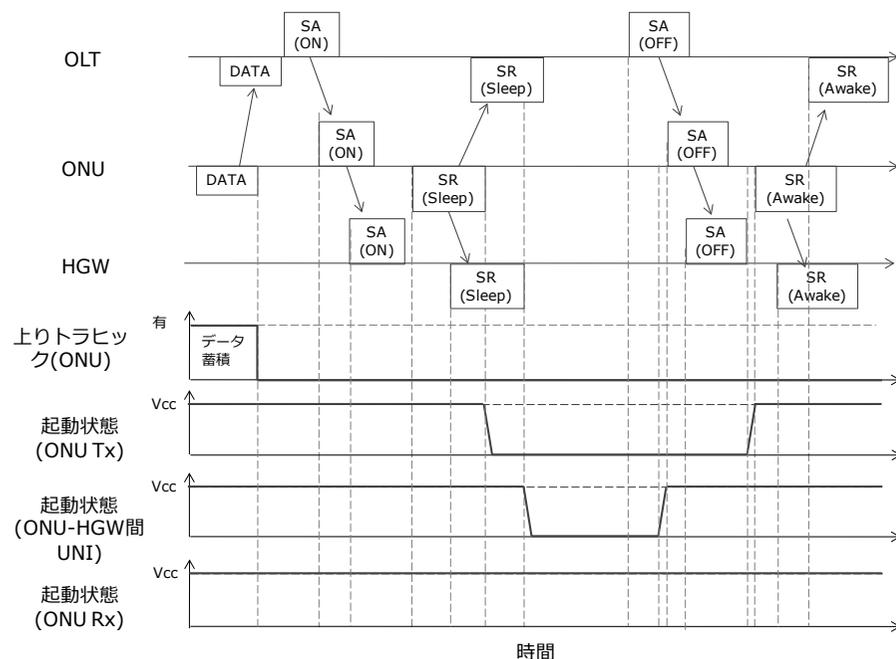


図 11 ONU スリープメッセージを用いた連携手法の動作例

さらに IEEE で議論されている SIEPON¹³⁾ 準拠のフレームを用いれば、ONU-HGW 間 UNI インターフェイスとして汎用的な Ethernet フレームをそのまま使用できるため、さらに好ましい。

5.1.2 Energy-Efficient Ethernet

3.2 で説明した EEE は通信機器への導入が進んできており、ONU-HGW 間インターフェイスへの適用が視野に入ってきている。また、EEE では、通信機器間の省電力手法として、Low Power Idle が規定されている。そこで、制御情報のやり取りを ONU-HGW 連携へ応用することで、汎用性を担保しつつ、主信号への影響なしに伝えることができると考えられる。

5.1.3 Link Layer Discovery Protocol

通信機器間で連携する手法として、IEEE 802.1AB で標準化された Link Layer Discovery Protocol (LLDP) がある。LLDP は、通信機器の端末の情報や設定情報等を別の通信機器へ通知するレイヤ 2 に位置付けられるプロトコルである。LLDP では、

拡張項目が IEEE 802.1AB の規格に準拠している場合においては、フレームに搭載する情報を追加することが出来るため、拡張性が高い。LLDP を活用し、ONU-HGW 連携における制御信号のみならず、ホームネットワークにおける情報家電の利用状況等に関する情報を収集し、あらゆる宅内装置の給電制御にまで応用できる可能性がある。

5.1.4 専用信号線

ONU-HGW 間における制御信号の形態として、筐体同士を専用の信号線を用いて接続する手法も考えられる。この場合、主信号の帯域を不用に消費することが無く、また、物理レイヤにより近いところで処理することによって遅延を最小限に抑えることが出来ると考えられる。しかしながら、従来のハードウェアに別線を搭載するということから、汎用性の点で課題があり、装置コストの増加を招きかねない点が懸念される。

5.1.5 Power-line Communication

電力線を通信媒体として利用する、電力線通信 (Power-line Communication: PLC) 技術が確立されている。一般的に電力線通信とは、家庭用コンセントに専用のアダプタを設置して通信機器を接続することにより、電力網を通信インフラとして用いるものである。本手法を応用し、ONU-HGW 間に接続される電力線を介して制御信号を送受信することが可能であると考えられる。この場合、既存の電力線を用いるため汎用性は高いが、その際には主信号や音声品質に対して雑音として悪影響を与えることが懸念される。

5.2 制御信号の適用性

5.1 では、ONU-HGW 連携に適用し得る制御信号について検討した。制御信号を適用するフレーム転送技術および適用先光アクセスシステムに関して以下で説明する。

5.2.1 転送技術との親和性

専用の信号線や PLC を用いる手法に関しては、UTP ケーブルと別に制御信号線を設けることで高速制御が期待できるため、提案手法の原理確認としては適している。また、高速制御特性を活用することで、4 章で述べた Frame-by-frame での高速転送技術への適用が可能であると考えられる。一方で、実レベルにおいては汎用性や拡張性は低く、主信号やサービス品質に与える影響が懸念される。また、ハードウェアに与えるインパクトが大きいために装置コストといった点で課題がある。一方、ONU-OLT 間制御メッセージを用いる手法に関しては、汎用性や主信号や、サービス品質に与える影響という観点から好ましい。また、ONU の上り送信タイミング情報を活用できるので、4 章で述べたバッファフレーム一括転送技術に適用可能であると考えられる。また、本手法は、5.1.1 で述べた UNI インターフェイスの省電力方式である EEE との連携も図 11 に示すように可能なため、ONU、HGW-ONU 間物理インターフェイスの省電力化にも拡張可能である。さらに、汎用的で拡張性の高い

LLDPなどのプロトコルを実装し、ホームネットワークサービスとの連携を考慮することにより、ONUやHGWのみならず、他宅内装置に対して適応的な給電制御に応用できる可能性がある。

5.2.2 適用先光アクセスシステムとの親和性

専用の信号線やPLCを用いる手法に関してはFrame-by-frameでの高速転送が見込める。また、5.1.1で説明したように、PONにおいてONUは上り信号を常に送信できるとは限らず、OLTから指示される送信時刻まではONUにおいて所定の時間バッファされる。したがって、専用の信号線などによるFrame-by-frameでの高速転送はPONへの適用はあまり有効ではなく、Point-to-pointのSS向けであると言える。対照的に、ONU-OLT間制御メッセージを用いる制御手法に関しては、ONUの上り送信タイミング情報を活用できるため、バッファフレーム一括転送技術などを用いてPON方式に適用出来ると考えられる。

6. 結論

光アクセスネットワークの省電力化を目的とし、HGWとの連携によるONU省電力技術として、Frame-by-frame転送技術およびバッファフレーム一括転送技術について提案し、良好な省電力効果が得られることを数値計算によって示した。また、HGW-ONU間での具体的な連携手法について、要求条件を整理した後、本提案のフレーム転送技術および適用先光アクセスシステムとの親和性について述べた。制御手法として専用の信号線を用いる場合は、制御情報の高速転送性能ゆえにFrame-by-frame転送技術との親和性が高く、適用先はSSシステムが好ましいと考えられる。一方で、制御手法としてONU-OLT間制御メッセージを用いる際は、バッファフレーム一括転送技術を用いた上でPONシステムに適用することが有効と考えられる。今後、制御手法を実装した上で、提案手法の省電力効果を明らかにする。

参考文献

- 1) T. Yoshida, H. Kimura, S. Asawaka, A. Ohki, and K. Kumozaki, "A compact 16-channel integrated optical subscriber module for economical optical access systems," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E87-B, No.4, April 2004.
- 2) A. Ohtaka, K. Yamaki, N. Miki, Y. Fujimoto, "STM shared access system for high-speed IP communication", in *Proc. NOC 2000*, pp.110-117, July 2000.
- 3) *ITU-T Recommendation G.983*.
- 4) 前田, 中西, "B-PON システムの標準化動向と今後の技術課題," 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J85-B, No.4, pp.438-452, 2002年4月.
- 5) *IEEE 802.3ah Standard*.
- 6) T. Tatsuta, N. Oota, N. Miki, and K. Kumozaki, "Design philosophy and performance of a GE-PON system for mass deployment," *J. Optical Networking*, Vol.6, No.6, pp.689-700, June 2007.
- 7) *ITU-T Recommendation G.984*.
- 8) *IEEE 802.3av standard*.
- 9) *ITU-T Recommendation G.987*.
- 10) R. Kubo, J. Kani, H. Ujikawa, T. Sakamoto, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, and H. Hadama, "Study and demonstration of sleep and adaptive rate control mechanisms for energy efficient 10G-EPON," *J. Opt Commun. Net.*, Vol. 2, no.9, pp. 716-729, September 2010.
- 11) J. Zhang and N. Ansari, "Toward energy-efficient 1G-EPON and 10G-EPON with sleep-aware MAC control and scheduling," *IEEE Commun. Mag.*, pp., 533-538, February 2011.
- 12) M. Gupta, S. Grover, and S. Singh, "A feasibility study for power management in LAN switches," in *Proc. IEEE ICNP*, pp.361-371, October 2004.
- 13) *IEEE P1904.1*
- 14) C. Gunaratne, K. Christensen, B. Nordman, and S. Suen, "Reducing the energy consumption of Ethernet with adaptive link rate (ALR)," *IEEE Trans. Comput.*, vol. 57, no. 4, pp. 448-461, Apr. 2008.
- 15) F. Blanquicet and K. Christensen, "An initial performance evaluation of rapid PHY selection (RPS) for energy efficient Ethernet," in *Proc. 32nd IEEE Conf. LCN*, pp. 223-225, 2007.
- 16) B. Zhang, K. Sabhanatarajan, A. Gordon-Ross, and A. George, "Real-time performance analysis of adaptive link rate," in *Proc. 33rd IEEE Conf. LCN*, pp. 282-288, 2008.
- 17) *IEEE 802.3az Standard*.
- 18) 野村, 西原, 氏川, 田所, 坂本, 吉本, "ONU-HGW連携によるONU省電力化に関する検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-5, 2011年9月.
- 19) H. Nomura, S. Nishihara, H. Ujikawa, M. Tadokoro, T. Sakamoto, and N. Yoshimoto, "Power-efficiency dependence on transient response speed of optical transceiver with HGW-determined ONU sleep pattern," in *Proc. MOC '11*, H-23, November 2011.
- 20) 西原, 野村, 氏川, 田所, 坂本, 吉本, "ホームゲートウェイと連携したONUにおけるフレーム一括送信による省電力化に関する検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-8-6, 2011年9月.