

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700057

研究課題名(和文) 密結合型次世代光・無線ネットワークに適した高度通信制御技術

研究課題名(英文) A novel traffic control method for the combination of fiber and wireless networks

研究代表者

西山 大樹(NISHIYAMA, HIROKI)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90532169

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高速大容量光通信を可能にする一対多の光回線網であるPONと、ネットワークへの柔軟なアクセスが可能な無線ネットワークの融合ネットワークにおいて密結合性を利用することによって通信品質を向上可能な高度制御技術の確立を目的としている。特に、PONとWLANの省電力制御技術の独立性による無駄な電力消費や非効率な通信の発生に注目し、これを解決する同期制御方法を提案した。また、数学的な解析結果によりその有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on the combination of the Passive Optical Networks (PONs), which can transfer data with high speed and high capacity, and the wireless networks, which provide flexible access to users. In this combined network, an advanced traffic control method utilizing the connectivity of the two types of networks is required. However, in the combination of PONs and the Wireless Local Area Networks (WLANs), high energy consumption and inefficient communication are the main concerns. In order to solve these problems, we proposed the novel synchronized method of which the performance was validated by using mathematical analysis.

研究分野：総合領域

キーワード：ネットワークプロトコル ネットワーク融合 光 無線 PON

1 . 研究開始当初の背景

爆発的なネットワーク人口の増加 , ネットワークサービスの多様化 , 高品質化に従って , ネットワーク上を流れるデータトラフィックは増加の一途を辿っており , 今後もこの流れは継続すると予想されている . 一般的に , データトラフィックが増加すると輻輳や処理待ちによる通信遅延が多発し , 通信速度が低下すると知られている . このような大容量のデータトラフィックの通信には , 広帯域な通信サービスを提供する光ネットワークが適している . 光ネットワークは , 光ファイバを通して一度に大容量のデータ伝送が可能であるため , 無線ネットワークと比較すると高速かつ安定した長距離通信を得意とする . しかしながら , 光ネットワークは有線通信特有の物理的な制約が課せられるため , 移動するユーザへの柔軟な通信サービスの提供は困難である . 一方 , 無線ネットワークは , 広い帯域幅や安定した長距離通信といった特徴はないが , 物理的な制約にとらわれずデータ通信が可能であるため , ユーザに柔軟な通信サービスを提供するネットワークとしての利用が期待されている . そこで , ユーザに広帯域かつ柔軟な通信サービスを提供することを目的として , 光と無線ネットワークを統合した Smart FiberWireless (SFiWi) ネットワークに注目が集まっている . SFiWi ネットワークを構成する無線ネットワークと光ネットワークの組合せは複数検討されており , 光ネットワーク部を Passive Optical Network (PON) とし , 無線ネットワーク部を Wireless Mesh Network (WMN) , Ad-Hoc , Satellite Network または , Wireless Local Area Network (WLAN) とした組合せがある . 中でも , WLAN は最も設備コストが安価で一般に広く普及している無線ネットワークであるため , 本研究は WLAN-PON 型の SFiWi ネットワークを想定する .

WLAN はアクセスポイント (AP) とスマートフォンやノート PC などのユーザ端末 (STA : Station) から構成される . WLAN における AP の動作にはアドホックモードとインフラストラクチャモードがある . 本研究では , AP がインフラストラクチャモードに従って動作しているものとする . STA はバッテリーが持続する限り AP と無線通信を可能であるが , STA のバッテリー容量には制限があるため , 長時間の通信が困難となっている . すなわち , STA の通信の可用性を向上するためには , 通信における STA のバッテリーの省電力化が必要不可欠であり , これまでに数多くの省電力技術が開発されている . WLAN におけるユーザ端末である STA は , CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) の制御手順に従ってデータフレームの衝突を回避させながら通信をおこなっている . CSMA/CA は , データの送信状態や受信状態だけでなく , アイドル状態においても周囲の端末の電波を監視する . そのため , CSMA/CA に従って動作する STA は , データの送受信時以

外にも多くの電力を消費している . そこで , このアイドル状態時の省電力を削減するため新たにスリープ状態を加えた PSM が IEEE 802.11 によって提案された .

単一の Optical Line Terminal (OLT) が複数の Optical Network Unit (ONU) と通信する PON は , 大量のユーザを収容することが可能となるため , ラストワンマイルのネットワークとして広く利用されている . OLT-スプリッタ間の一本の光ファイバを複数の ONU が共有するため , OLT は ONU に帯域割当 (DBA : Dynamic Bandwidth Allocation) を行い , 上り方向トラフィックの衝突を未然に回避している . しかしながら , 多重通信制御の複雑化によって ONU の消費電力が増加することが報告されている . また , ONU の消費電力量はネットワーク全体の 60% を占めるとの試算もある . そのため , ONU の低消費電力化は急務とされており , 現在 , 盛んに研究が行われている . また , OLT からの下り方向のデータトラフィックは , スプリッタを介して接続された全ての ONU にブロードキャストされるため , 宛先が他の ONU のデータトラフィックである場合にも , 自身の ONU に到達する . ONU は受信したトラフィックの宛先が自身の ONU であった場合にはユーザへ転送するが , それ以外に対しては単に廃棄するだけである . 従って , ユーザへ転送しないデータトラフィックも受信しているため , 電力を無駄に消費しており , 電力効率の改善が要求されている . そこで , ITU-T では ONU の電力の浪費を抑制するため Power Shedding , Dozing , Deep sleep , Cyclic sleep の四種類の ONU sleep を提案している . 各 ONU sleep では , 送受信データトラフィックが存在しない間に ONU の通信機能を一時的に停止し , 電力の消費を低減している . 本研究では , 通信遅延の影響が小さく尚且つ省電力効果の高い Cyclic sleep を ONU sleep として想定する .

STA と ONU の省電力技術は , 通信機能への電力供給を停止することによって消費電力の削減を果たしているが , 一方で通信機能の停止によってデータ転送ができなくなり , WLAN と PON 内におけるそれぞれのデータ転送に通信遅延を引き起こす . 従って , WLAN-PON 型の SFiWi ネットワークにおける通信では , WLAN と PON の二ヶ所において通信遅延が発生する . その結果 , IP 電話やビデオストリーミングなど通信品質を要求するサービスの通信品質を保証できなくなる可能性が高まる . 従って , SFiWi ネットワークでは , 省電力技術により発生する通信遅延を低減することが極めて重要であり , 省電力化と通信遅延の最小化を同時に実現する新たな省電力技術の提案が急を要されている .

2 . 研究の目的

WLAN-PON 型の SFiWi ネットワークでは , 無線ネットワークにおける STA と光ネットワークにおける ONU の省電力技術が複数存在する

が、それらの省電力技術は独立に設計・開発されている。つまり、STA と ONU の通信機能を停止するタイミングや間隔が統一されていない。そのため、SFiWi ネットワークにおける通信サービスの品質を低下させてしまうほどの通信遅延が発生してしまうことや、本来ならば消費電力を抑制する STA や ONU が無駄に起動してしまい、消費電力が増加するといった問題が発生している。そこで、本研究では、異なる省電力技術の相互連携技術を提案し、低消費電力かつ低遅延の通信を両立する SFiWi ネットワークの実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、PON と WLAN のそれぞれのネットワークにおいて省電力制御の独立性により発生する通信遅延や無駄な電力消費の改善を目指す。そこで、課題を分析するために、既存の SFiWi ネットワークにおいて下り方向データトラヒックの通信にかかる遅延と STA の消費電力の数学的な解析を行った。

PON の省電力制御である ONUsleep と WLAN の省電力制御である PSM はそれぞれ独立に開発され、WLAN-PON 型ネットワークで相互に協調することなく動作する。そのため、それぞれの省電力技術のスリープの開始時間は独立して決定される。つまり、ONUsleep のスリープタイミングは OLT によって、PSM による STA のスリープタイミングは AP のビーコンの間隔（ビーコンインターバル）によって決定される。図 1 は、WLAN-PON 型ネットワークにおいてそれぞれのスリープタイミングが協調せずに決定され通信が行われている様子である。スリープの開始時間が異なることによって、Internet からの下り方向データトラヒックは、ONUsleep によって一度 OLT でバッファされ、さらに、PSM によって再度 AP でバッファされるため、二ヶ所で通信遅延が発生する。また、ONUsleep による通信遅延のため、本来ならば到達するビーコンインターバルの一つ後のビーコンインターバル中にデータトラヒックが AP に到達する。そのため、AP から STA に送信されるタイミングが一つ後のビーコンインターバル後となり非常に大きな通信遅延が引き起こされる。このような PSM による通信遅延の発生を防ぐためには、ビーコンインターバル開始前に OLT にバッファされているデータトラヒックを AP まで転送することが必須である。つまり、ONUsleep のスリープ時間を PSM のスリープ時間に基づいて決定することが重要となる。ここで、ONU のウェイクアップを STA のウェイクアップと同時となるように ONU のスリープ時間を決定するとどちらもアクティブ状態となる時間が発生する。これによって、データトラヒックは、ONUsleep の通信遅延によって次のビーコンインターバル中に AP に届くことができなくなり、PSM による通信遅延の発生を防ぐことができる。そのため、通信遅延の低減にむけて、STA と ONU の省電力技術を相互連携さ

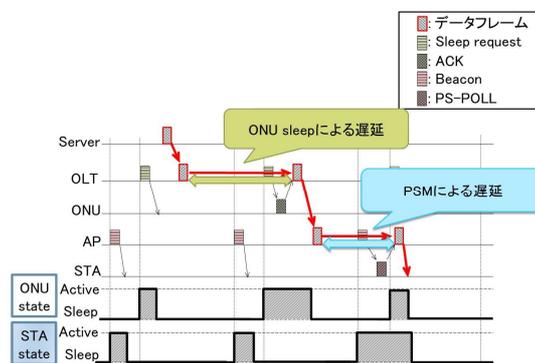


図 1: 既存のネットワークの課題

せスリープ時間を決定することが重要である。

また、通信遅延は異なるスリープタイミングだけではなく異なるスリープ時間からも影響を受ける。ONUsleep と PSM は、相互連携せずに動作しているため、スリープタイミングのみならずスリープ時間もそれぞれ独自に決定している。基本的に ONUsleep のスリープ時間は 5ms から 100ms の範囲、PSM のスリープ時間は 100ms から 200ms の範囲で検討されている。本来ならば ONUsleep は、スリープ時間を短くすることによって OLT でバッファされる時間を短くし、ユーザに高速にデータトラヒックを転送する。しかしながら、SFiWi ネットワークでは、ONU から高速にデータトラヒックを転送されても STA がスリープモードでいる限り AP にバッファされる。従って、異なるタイミングで AP にデータトラヒックが到達されても同時に STA に転送されるため、ONU のスリープ時間を短縮して頻繁にウェイクアップさせることは単に無駄な電力の消費につながる。このような無駄なウェイクアップを防ぐためには ONU のスリープ時間を長くしなければならない。しかし、安易にスリープ時間を長くしては遅延の増加に繋がりがかねない。そのため、PSM と相互連携して ONUsleep のスリープ時間を決定することが重要である。そこで、ONU のスリープ時間を STA のスリープ時間と等しくし、STA がスリープモード期間中の ONU のウェイクアップを抑えると OLT から AP へ転送される時間は遅れるが、STA に到達するタイミングは変わらない。つまり、通信遅延の増大させることなく消費電力を低下させることが可能となる。よって、省電力技術の相互連携によるスリープ時間の決定が重要となる。

以上の数値解析結果より明確化した課題を解決するため、我々は STA の消費電力の低減と PSM で WLAN が動作しているときの通信遅延の低減を目的として、PON と WLAN のスリープ時間の同期制御方法を提案した。WLAN が PON 側のスリープ時間を考慮し、スリープ時間とタイミングを同期することにより、無駄なウェイクアップの低減による消費電力の低減と通信遅延の低減を実現した。

本研究では、Internet からの下り方向トラ

ヒックが STA に到着するまでの通信遅延と STA における消費電力を数学的に解析することによって既存手法と提案手法の比較を行った。解析結果より、通信遅延と消費電力はそれぞれ低減され、提案手法の有効性を確認した。

4. 研究成果

本研究は、経路制御技術、トラフィック制御技術、輻輳制御技術の3つの技術開発が軸となる。ただし、それぞれは全く独立なわけではなく、お互い影響し合うことを考慮する必要がある。従って、本研究は(ステージ A) 光・無線ネットワークの密結合性を最大限利用した個々の技術の開発を行う段階、(ステージ B) 3つの技術をお互いに連携協調させるための技術の開発を行う段階、の2つに分けられる。

(1) 平成 24 年度の成果概要

初年度である平成 24 年度はステージ A の研究、特にトラフィック制御技術について研究を行った。光・無線両方のネットワークを効率的に無駄なく利用するためには、各ネットワークでトラフィックをどのように分散して配送するかを制御する技術が重要となる。WMN から光ネットワークへのトラフィックについて考えると、WMN から光ネットワークに流れるトラフィックを適切に制御することにより光・無線の融合ネットワークの性能が大きく向上すると期待できるため、WMN におけるトラフィック制御技術としてトラフィック量ベースで制御する技術、ユーザ分布の変動によって制御する技術を考案し、シミュレーションによりネットワークの利用効率が向上することを確認した。これらの技術は、経路制御・輻輳制御技術と連携協調を図ることを念頭に入れており、相互作用する機能についてはモジュール化して作成している。これにより、次年度以降行う連携協調技術がスムーズに行うことができた。

(2) 平成 25 年度の成果概要

平成 25 年度は、個々の技術の核が出来上がったことを受けて、研究段階をステージ A からステージ B へと移行させた。各制御技術の開発を、モデル化と理論検討、アルゴリズムの考案とプロトコルの設計、計算機によるシミュレーションベースの性能評価という一連のサイクルの繰り返しによって行った。結果として、近年重要性が増しているネットワークの省電力化に寄与する技術の骨格を確立することができた。

(3) 平成 26 年度の成果概要

平成 26 年度は、昨年度から継続して光・無線ネットワークの密結合性を考慮した経路制御技術、トラフィック制御技術、輻輳制御技術の3つのコア技術を連携協調させるための技術開発を行った。まず、3つのコア技術

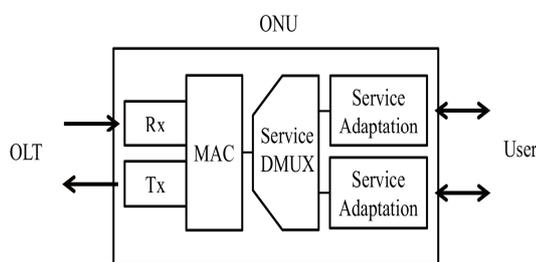


図 2: ONU の構造

の連携協調技術として、集中制御方式と分散制御方式の特徴や利点を明らかにした。さらに、集中制御と分散制御の特色を活かし制御方式を設計することで、環境に適応してシステム全体の実効スループットを向上できることを確認した。また、ユーザ端末のスリープ制御方式の情報を基に光終端装置を協調制御する手法を提案した。シミュレーションベースの評価実験を行い、通信性能の低下を許容値内に抑えつつユーザ端末の消費電力を著しく低減できることを確認した。

(4) 技術の概要

本研究の成果として位置づけられる主な提案技術として、本研究報告では、ONUsleepとPSMの省電力制御のタイミングと時刻の同期方法を取り上げる。提案技術は、スリープタイミングの同期、スリープ時間の動的制御の二つから構成されており、これらの技術では、効率的に ONUsleep の挙動とスリープ時間を制御する。これにより、下り方向トラフィックの通信遅延の大幅な低減と STA における消費電力の低減が実現可能となる。以下では、まず、提案手法を説明する上で不可欠である省電力制御の動作を説明する。そして次に、提案手法と従来手法の数学的解析に基づく評価結果について説明する

ONUsleep の動作説明

ONUsleep によって電力を抑制する ONU は、OLT の集中制御によってアクティブモードとスリープモードを移行しながら通信を行う。アクティブモード時は両方向のデータトラフィックを送受信可能であるが、スリープモード時は図2における OLT 側の送信インターフェースと受信インターフェース (Tx, Rx) の機能を停止させるため、下り方向データの受信と上り方向データの送信ができない。そのため、ユーザから転送される上り方向データトラフィックはスリープモード時にも受信可能であり、強制的にアクティブモードに移行し OLT に転送が実行されるが、OLT からの下り方向データトラフィックは、機能が停止しているため、ONU がアクティブモードに移行するまで受信することが出来ずに通信遅延が発生する。図3にPONにおけるONUsleepの概要図を示す。スリープモード中のONUは、

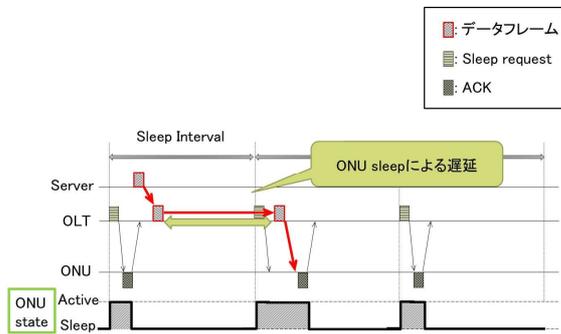


図 3: ONU sleep の概要

下り方向のデータトラフィックの有無の確認のために active state と sleep state 間の遷移を周期的に繰り返す。active state のときの ONU はスリープ中でありながら、通信機能の停止を解除している。ONU は、active state に遷移した際、OLT のバッファにおける自身宛てデータトラフィックの有無を確認する。データトラフィックを確認した場合はアクティブモードへ移行し、データトラフィックを受信する。それ以外の場合は sleep state へ遷移し一定時間(以降、スリープ時間)が経過した後に再度 active state に遷移する。ここで、スリープ時間が長いほどデータトラフィック有無の確認が遅れるため、ONU が受信するまでの通信遅延は長くなる。一方で、スリープ時間が短縮されることによって ONU は頻繁に active state に遷移するため無駄な電力を消費する。

PSM の動作説明

図 4 に WLAN における PSM の概要図を示す。PSM によって電力を抑制する STA は、自律的にアクティブモードとスリープモードを制御しながら通信を行う。STA がアクティブモード時の際は、STA は AP から下り方向データトラフィックを受信することが可能であるが、多くの電力を消費する。一方で、STA がスリープモード時は、データトラフィックの送受信はできないが、電力の消費量が少ない。PSM はデータ通信を次のような手順によって実現する。STA は、送受信するデータトラフィックがないことを確認すると AP へスリープ要求を転送し、スリープモードに移行する。AP は、スリープモード中の STA 宛の下り方向データトラフィックを受信するとそれをバッファする。AP は、一定時間の間隔でカバー範囲全体に一斉送信するビーコンメッセージを通してバッファしているデータトラフィックを全 STA に周知する。STA は、ビーコンインターバルを境にスリープモードからアクティブモードに移行するため、毎回ビーコンメッセージを受信する。ここで、ビーコンメッセージを通して AP がデータフレームをバッファしていることを確認した場合、データ要求メッセージ (PS-Poll) を AP へ送信し、データを受信する。全てのバッファデータを受信すると STA は再びスリープ要求を AP へ

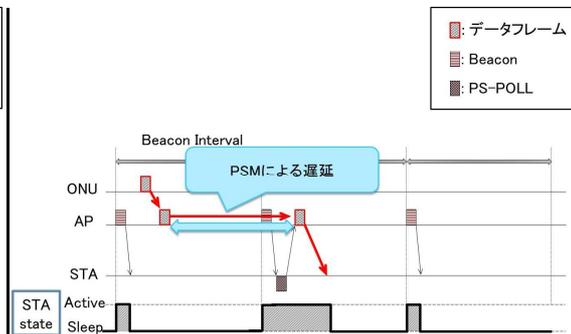


図 4: PSM の概要

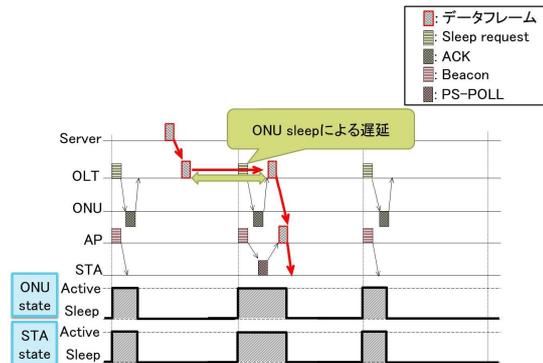


図 5: 提案手法の概要

転送し、スリープモードに移行する。ビーコンメッセージを通して AP がデータフレームをバッファしていないことを確認した場合、STA は直ちにスリープモードへと移行する。このように、STA は、上記の動作を繰り返すことでスリープモードとアクティブモードを制御している。PSM では、スリープ時間をビーコンインターバルに合わせて管理している。基本的にビーコンインターバルは 100ms と設定されるため、スリープ時間は、ONU sleep に比較すると長い。そのため、異なるタイミングで AP に下り方向のデータトラフィックが転送されたとしても STA には同時に到達する。

通信遅延と消費電力の解析結果

本研究では、下り方向データトラフィックの通信遅延と消費電力を数学的に解析し、提案手法と既存手法の性能を比較した。通信遅延の評価では、WLAN-PON 型 SFiWi ネットワークを介した通信の RTT が ONU と STA の省電力技術によって受ける影響を確認した。ONU の省電力技術には、既存技術の ONU sleep と本論文で提案した協調型 ONU sleep を用いる。図 5 に提案手法の概要を示す。ここで、既存技術の ONU sleep のスリープ時間とアクティブ時間は固定とし、スリープ時間を変化させてそれぞれの RTT を評価することで既存技術と提案技術の性能の比較を行った。

図 6 に通信遅延を示す。提案手法の比較対象として、WLAN が PSM で動作しているときと CAM と呼ばれる常にアクティブな状態で動作

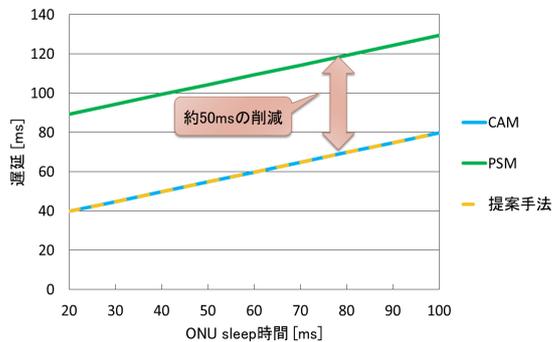


図 6:遅延の解析結果

している状況を想定した。横軸は、ONUsleepの時間を示す。図6より、提案手法はPSMと比較して小さい遅延であることがわかる。ここで、CAMは常にアクティブ状態で動作するため、スリープ制御は行わない。これにより、下り方向データトラフィックがOLTからONUを経由してAPに送信された後、APからSTAには遅延なく送信される。一方で、提案手法ではCAMと異なりスリープ制御を実現しつつ、低遅延を目的とした制御であるCAMと同等の通信遅延で省電力制御を行うことが可能である。ここで、すべてのONUsleep時間においてPSMと提案手法の間には50msの遅延差が存在する。なぜならば、既存のPSMではPSMによる遅延がAP-STA間で発生するが、提案手法ではONUsleepとPSMの省電力制御を同期しているため、この遅延が発生しない。また、本解析ではCAMと提案手法における伝搬遅延を30msと設定しており、下り方向トラフィックのOLTにおける待ち時間は期待値としてONUsleepの半分の時間と導出している。以上から、提案手法は同期制御によってスリープ制御を行いつつ最小の遅延で通信を行うことを可能にしている。

図7にSTAの消費電力を示す。提案手法の比較対象は既存のPSMとCAMである。図7より、提案手法はCAMと比較して非常に小さいSTAの消費電力を示すことを確認した。CAMは、STAの省電力化よりAP-STA間の遅延に優先度を置いており、常にアクティブ状態であるため、STAでの消費電力は図7に示す通り非常に大きくなっている。これに対して、提案手法では、既存のPSMと同様にAP-STA間においてPSMを実行しているため、STAにおける消費電力はPSMと同等の消費電力を実現している。ここで、図5では提案手法と既存のPSMのビーコンインターバルを固定しているが、ビーコンインターバルの変化によりSTAの消費電力は変化する。例えば、ビーコンインターバルを大きくとると、提案手法と既存のPSMにおける消費電力は小さくなる。このとき、遅延はビーコンインターバルが増加した分、増加する。他方、ビーコンインターバルを小さくとると、提案手法と既存のPSMにおける消費電力は大きくなる。このとき、遅延はビーコンインターバルが減少した

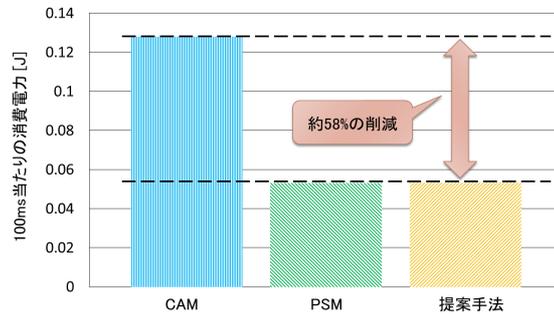


図 7:消費電力の解析結果

分、短くなる。

ここで、提案手法は通信遅延に優先度を置くCAMと同等の遅延を実現し、さらにPSMと同等の消費電力により省電力制御を実現することができる。このことから、提案手法は低消費電力と低遅延の両立が可能な省電力制御であるといえる。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 2件)

1. Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, Ken-Ichi Suzuki, Naoto Yoshimoto, "[特別招待講演] PONとWiFi/WiMAXによるユビキタスブロードバンドネットワークの新提案," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 112, no. 9, CS2012-8, pp. 41-46, 19-20 Apr. 2012. 石垣島官公労八重山会館(沖縄)
2. Keisuke Miyanabe, Hiroki Nishiyama, Nei Kato, Hirotaka Ujikawa, Ken-Ichi Suzuki, and Naoto Yoshimoto, "Synchronized Power Saving Mechanisms for Battery-Powered Mobile Terminals in Smart FiWi Networks," IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC 2014 Fall), 14-17 Sep. 2014. Vancouver (Canada)

〔その他〕

(1)ホームページ

<http://www.it.ecei.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西山 大樹 (HIROKI, NISHIYAMA)
 東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
 研究者番号：90532169

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし