

[招待講演] トランスポート層プロトコルと無線機器の省電力機構の連携

長谷川 剛[†] 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒 560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-43

^{††} 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 本発表では、無線機器のスリープ制御による省電力機構の効果を最大化するための、トランスポート層アーキテクチャに関する研究について議論する。具体的には、トランスポート層プロトコルの動作を考慮した無線 LAN 通信の消費電力解析、バースト転送を利用した省電力化、SCTP を用いた実装などに関する研究内容の紹介を行い、無線通信の省電力化における上位層プロトコルの重要性について述べる。

キーワード トランスポート層プロトコル、TCP、輻輳制御機構、無線 LAN、CSMA/CD、消費電力

[Invited Talk] Studies on cooperation of transport-layer protocols and power-saving mechanisms in wireless network devices

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University

1-43, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract In this report, we focus on cooperative control of TCP congestion control mechanism and power-saving mechanisms of wireless devices to effectively reduce the power consumption in wireless network environment. We explain our research results on mathematical model for power consumption in TCP over WLAN environment, SCTP tunneling mechanism to decrease the power consumption from/to wireless LAN station, and experimental results of SCTP tunneling to confirm its effectiveness in actual environment.

Key words Transport-layer protocols, TCP, congestion control mechanisms, Wireless LAN, CSMA/CD, power consumption

1. はじめに

無線ネットワーク技術の発展にともない、無線機能を有した小型の端末(無線端末)を利用したインターネットアクセスが一般的になってきている。無線端末は通常バッテリー駆動であるため、駆動時間の長期化という観点から消費電力の削減は重要な課題である。IEEE 802.11 無線 LAN においては、無線通信が消費する電力が全体の 10% から 50% を占めることが報告されており [1-3]、無線通信の消費電力を削減することが機器全体の消費電力を削減するうえで重要である。

無線 LAN における省電力化に関する検討は、主にハードウェアレベルおよび MAC プロトコルレベルの双方から行われている [4-7]。ハードウェアレベルにおいては、省電力化が行われた結果、数年で送受信時の消費電力がおよそ 1/2 に、また、アイドル時あるいはスリープ時の消費電力はおよそ 1/10 に削減されている [4, 5]。一方で、MAC プロトコルレベルにおいては、IEEE 802.11 規格における省電力モードとして Power Saving Mode (PSM) が定義されている [8]。通常の動作モードである Continuously Active Mode (CAM) で動作している無線

端末は、パケット送受信をしていない場合においても常に無線ハードウェアに通電しているため、消費電力が大きくなる。一方で、PSM で動作している無線端末においては、パケット送受信をしていない場合に、不要な無線ハードウェアに通電させないことによって消費電力を削減している。しかし、PSM を利用することで、スループットの低下や遅延の増大など、ネットワーク性能が低下する問題がある [6]。一般に、ネットワーク機器の省電力に関して議論を行う場合においては、省電力効果とネットワーク性能間のトレードオフを考慮する必要がある。すなわち、消費電力の削減に効果のある要因を明らかにし、その要因がどの程度ネットワーク性能を低下させるかを知ることが重要である。

この問題に対し我々の研究グループでは、無線 LAN において TCP データ転送を行う、単一の無線端末が消費する電力のモデル化を行った [9]。提案モデルは MAC レベルのモデルと TCP レベルのモデルの組合せによって実現した。MAC レベルのモデルにおいては、CSMA/CA のフレーム交換に基づく消費電力モデルを構築した。TCP レベルにおいては、TCP の動作解析に基づいて消費電力モデルを構築した。構築した消費電力モデルに基づいた数値解析によって、無線端末から有線ネッ

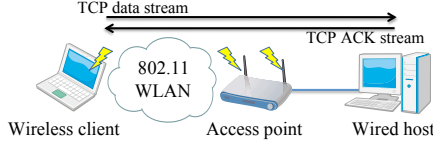


図1 無線 LAN 環境

トワーク上にあるホストに対して TCP データ転送を行った場合の消費電力を解析的に導出した。数値解析の結果から、複数パケットをバースト的に送受信することによって、長いスリープ時間を維持したままスリープ状態への移行回数を削減することが、省電力効果を高めるのに効果的であることを明らかにした。また、省電力と転送時間との間にはトレードオフの関係があることを示した。

さらに、上述したバースト転送を実現する手法として、無線 LAN 環境における TCP データ転送の省電力化を目的とした Stream Control Transport Protocol (SCTP) トンネリングを提案した [10]。SCTP トンネリングにおいては、SCTP マルチストリーミング [11] を利用することによって、複数の TCP フローを、無線端末とアクセスポイント間に確立した 1 つの SCTP アソシエーションに集約する。そして、集約された TCP フローのパケットをバースト的に転送 (バースト転送) することによって 1 回あたりのアイドル時間を長くする。これにより、状態遷移回数を削減し、スリープによる省電力効果を高めた。さらに、SCTP トンネリングの省電力効果を評価するために、SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築した。構築した消費電力モデルを利用した数値解析の結果、SCTP トンネリングの消費電力は主に TCP フローの合計スループットによって決まり、バースト転送を利用してスリープすることでわずかな遅延の増加で消費電力を大きく削減できることを示した。さらに、SCTP トンネリングの実装を行い、実環境においても、データ転送スループットを維持しつつ、消費電力削減に大きな効果があることを示した [12]。

本報告においては、上述の研究を紹介を通して、無線機器の省電力効果を最大化するためのトランスポート層プロトコル制御の重要性を議論する。本報告の構成は以下の通りである。3. 章では、トランスポート層プロトコルの動作を考慮した無線 LAN 通信の消費電力解析について述べ、バースト転送の重要性を議論する。3. 章では、SCTP を用いたバースト転送の実現方法を紹介し、その省電力効果について議論する。4. 章では、SCTP トンネリング手法の実装方法を紹介し、提案手法の実環境での有効性の検証結果を報告する。最後に 5. 章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

2. 無線 LAN 環境における TCP の動作を考慮した消費電力モデル

無線 LAN 機器の省電力機能の効果を最大限に発揮し、データ転送時の消費電力を削減するためには、TCP の動作を考慮したうえで、理想的にスリープした場合にどの程度消費電力を削減できるかを理解することが重要である。本章においては、[9] において示している、無線 LAN 環境における TCP の動作を考慮した消費電力モデルの概要を紹介し、数値評価結果を示すことで、TCP の挙動が無線 LAN 機器の消費電力に与える影響を明らかにする。図 1 に想定している無線 LAN 環境を示す。

2.1 消費電力解析

まず、無線端末で単一のデータフレームを送受信する場合の消費電力をモデル化する。なお、紙面の都合上、データフレームの送受信の消費電力の計算過程を省略する。無線 NIC には送信、受信、アイドルおよびスリープの 4 つの通信状態があり、それぞれの状態で消費する電力は一般にその順に従って低くなる。 P^t , P^r , P^i および P^s をそれぞれ、送信状態、受信状態、アイドル状態、およびスリープ状態における単位時間あたりの消費電力とする。 J^t をデータフレームを送信するときに消費する電力とし、 J^r をデータフレームを受信するときに消費する電力とすると、上述の記号を用いて、それぞれ以下のように計算できる。

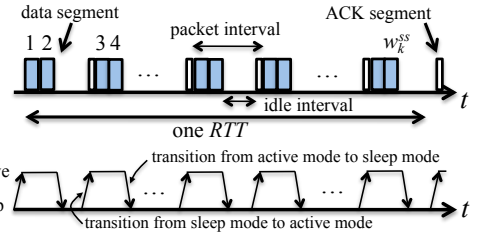


図2 スロースタートフェーズの k 番目のラウンドにおけるパケットシーケンス

$$J^t = P^t (3T_{SIFS} + T_{DIFS} + T_{backoff} + 4\tau) + P^t (T_{RTS} + T_{DATA}^{STA}) + P^r (T_{CTS} + T_{ACK}) \quad (1)$$

$$J^r = P^l (T_{SIFS} + T_{DIFS} + T_{backoff} + 2\tau) + P^t T_{ACK} + P^r T_{DATA}^{AP} \quad (2)$$

なお、 T_{SIFS} は SIFS 時間、 T_{DIFS} は DIFS 時間、 T_{RTS} は RTS フレームの送信時間、 T_{CTS} は CTS フレームの受信時間、 $T_{backoff}$ はバックオフ時間の期待値、 T_{DATA}^{STA} は無線端末が送信したデータフレームの送信時間、 T_{DATA}^{AP} は AP から送信されたデータフレームの受信時間、 T_{ACK} は ACK フレームの送信および受信にかかる時間、 τ は無線区間の伝搬遅延である。

次に、TCP のデータ転送を考慮し、無線端末がパケット送受信を行っていない時間 (アイドル時間) に理想的なスリープをした場合の消費電力モデルを構築する。ここで、理想的なスリープとは、フレームの送受信タイミングに応じて無線 NIC が適切なタイミングでアクティブ状態からスリープ状態への遷移とスリープ状態からアクティブ状態への遷移が可能であることを意味する。 T^{as} をアクティブ状態からスリープ状態への遷移時間とし、 T^{sa} をスリープ状態からアクティブ状態への遷移時間とする。また、 P^{as} をアクティブ状態からスリープ状態へ遷移したときにかかる消費電力とし、 P^{sa} をスリープ状態からアクティブ状態へ遷移したときにかかる消費電力とする。なお、スリープすることによってパケット送受信に遅延が発生することを回避するため、パケット送受信間隔が ($T^{as} + T^{sa}$) 以上である場合にスリープを行うものとする。以降では、紙面の都合上、初期スロースタートフェーズにおける解析結果の概要のみを示す。

初期スロースタートフェーズにおいて、理想的なスリープをした場合に消費される電力を求める。図 2 に、初期スロースタートフェーズのパケット送受信の流れを示す。スロースタートフェーズにおいては、1 つの ACK セグメントを受信するたびに輻輳ウィンドウは 1 セグメント分増加する。そのため、ACK セグメントを受信するたびに、2 つのデータセグメントが連続で送出される。したがって、初期スロースタートフェーズの k 番目のラウンドにおいて最後の ACK セグメントを受信したときのウィンドウサイズを w_k^{ss} とすると、 k 番目のラウンドにおけるパケット間隔 (packet interval) の総数は $w_k^{ss}/2$ となる。したがって、1 RTT 内に ACK セグメントは等間隔で受信されると仮定すると、次の条件を満たすときにスリープすることができる。

$$2RTT/w_k^{ss} - (2T^t + T^r) > T^{as} + T^{sa} \quad (3)$$

$E[T_{ss}^s]$ を初期スロースタートフェーズにおける合計スリープ時間の期待値とすると、 $E[T_{ss}^s]$ は以下のように計算できる。(3) 式を満たす最大のラウンド番号を r_{ss} とする。スロースタートフェーズにおけるすべてのアイドル間隔 (idle interval) においてスリープができるとき、 $w_{r_{ss}}^{ss}$ は $E[W_{ss}^s]$ と等しくなる。このときの r_{ss} は、[13] より、 $r_{ss} = \log_2(E[S_d^{ss}]/w_1 + 1)$ となる。なお、 w_1 は初期ウィンドウサイズである。一方で、(3) 式を満たさない場合の r_{ss} は以下のように決定できる。 W_{ss}^{max} を 1 ラウンド内のすべてのアイドル間隔においてスリープできる

最大ウィンドウサイズとすると、 W_{ss}^{max} は次のように計算できる。

$$W_{ss}^{max} = \left[2RTT / (2T^t + T^r + T^{as} + T^{sa}) \right] \quad (4)$$

w_k^{ss} は $2^{k-1}w_1$ となるため、(4) 式より、 $w_{r_{ss}}^{ss} = W_{ss}^{max}$ となるような r_{ss} は次のように計算できる。

$$r_{ss} = \lceil \log_2 (W_{ss}^{max} / w_1) + 1 \rceil \quad (5)$$

上述の導出から、最終的に r_{ss} は次のように決定できる。

$$r_{ss} = \min \left\{ \lceil \log_2 (W_{ss}^{max} / w_1) + 1 \rceil, \lceil \log_2 (E[S_d^{ss}] / w_1 + 1) \rceil \right\} \quad (6)$$

なお、 $r_{ss} < 1$ が成立することは、初期スロースタートフェーズにおいてはスリープできないことを意味する。

スリープ状態への遷移回数の期待値 $E[N_{ss}^s]$ を求める。最初のラウンドから r_{ss} 番目のラウンドまでのすべてのアイドル間隔でスリープできるとき、 $E[N_{ss}^s]$ は次のように決定できる。

$$E[N_{ss}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ss} < 1 \\ 1 + w_1(2^{r_{ss}-1} - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

次に $E[T_{ss}^s]$ を導出する。最初のラウンドにおいては、 w_1 個のデータセグメントが送信され、1つのACKセグメントを受信されるため、そのときのアイドル間隔は $RTT - w_1T^t - T^r$ になる。 k 番目のラウンドにおいては、1 RTT の間に w_k^{ss} 個のデータセグメントが送信され、 w_{k-1}^{ss} 個のACKセグメントを受信される。そのため、 k 番目のラウンドにおけるアイドル間隔の合計は $RTT - w_k^{ss}T^t - w_{k-1}^{ss}T^r$ となる。したがって、 $E[T_{ss}^s]$ は以下のように計算できる。

$$E[T_{ss}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ss} < 1 \\ RTT - w_1T^t - T^r & \text{if } r_{ss} = 1 \\ r_{ss} \cdot RTT - w_1T^t(2^{r_{ss}-1}) \\ - w_1T^r(2^{r_{ss}-1} - 1) - E[N_{ss}^s](T^{as} + T^{sa}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

以上から、理想的にスリープした場合の J_{data}^{ss} は以下のよう
に計算できる。

$$J_{data}^{ss} = E[S_d^{ss}](J^t + J^r) + P^s E[T_{ss}^s] + E[N_{ss}^s](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \\ + P^l \{ E[T_{ss}^s] - E[S_d^{ss}](T^t + T^r) - E[T_{ss}^s] \\ - E[N_{ss}^s](T^{as} + T^{sa}) \} \quad (9)$$

次に、初期スロースタートフェーズにおいてデータセグメントが損失した後の消費電力を導出する。具体的には、理想的にスリープした場合の J_{TD}^{loss} および J_{TO}^{loss} を導出する。詳細は省略する。

定常フェーズにおける消費電力解析の過程は紙面の都合上省略する。最終的に、理想的なスリープをした場合の J^{TD} は以下のように計算できる。

$$J^{TD} = E[Y]J^t + (E[Y] - E[W]/2)J^r - P^l E[N_{td}^s](T^{as} + T^{sa}) \\ + P^l \{ E[A] - E[Y]T^t - (E[Y] - E[W]/2)T^r - E[T_{td}^s] \} \\ + P^s E[T_{td}^s] + E[N_{td}^s](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (10)$$

一方で、理想的にスリープした場合の J^{TO} は以下のように導出できる。

$$J^{TO} = E[R]J^t + P^s (E[Z^{TO}] - E[R](T^r + T^{as} + T^{sa})) \\ + E[R](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (11)$$

2.2 数値例

図1の無線LAN環境において、TCPを利用して無線端末から100MBのファイルを有線ホストへ転送するときの消費電力を評価した。無線LAN規格にはIEEE 802.11aを想定した。

CAMで動作した場合および理想的なスリープした場合の消費電力を図3に、消費電力比を図4に示す。図3および図4のx軸はパケット廃棄イベントの発生確率 p であり、RTTを変化させた場合の結果を示している。また、消費電力比はCAMで動作した場合の消費電力に対する、理想的にスリープした場合の消費電力の比を意味する。

図3より、スリープするかどうかにかかわらず、RTTが増加するにつれて消費電力が増加していることがわかる。これはRTTが増加することによって全データを転送するのにかかる時間が増加するためである。また、 p が減少するにつれて消費電力が減少していることがわかる。これは以下の理由によると思われる。 p が小さくなるにつれて、平均的な輻輳ウィンドウサイズが大きくなるため、単位時間あたりに送信されるセグメント数が増加する。そのため、 p が小さくなるにつれて転送時間が減少し消費電力が減少する。したがって、全データを転送するのにかかる時間は消費電力を考えるうえで重要な要因であるといえる。

図4から、RTTが大きく p が大きくなるにつれて、相対的な省電力効果は大きくなることがわかる。例えば、 $p = 0.01$ および $RTT = 100$ ms であるとき、理想的なスリープによって消費電力を約60%削減できる。逆に、RTTが小さく p が小さくなるにつれて、スリープによる省電力効果は小さくなり、逆に消費電力が大きくなる場合があることがわかる。これは、アクティブ状態とスリープ状態間の遷移時に消費される電力が無視できないことを示している。

以上の結果から、効果的な消費電力の削減には、スリープ時間を大きくし、かつ、スリープ状態への遷移回数を削減することが必要であると言える。

図5に、 $p = 0.01$ および $RTT = 100$ ms であるときの消費電力比と転送時間の比を示す。 δ は無線NICがスリープできるかどうかを判断するためのパラメータであるから、 δ が小さければ積極的にスリープすることを意味し、逆に δ が大きければ十分な大きなアイドル間隔があるときにのみスリープすることを意味する。図5から、 $\delta \leq 3$ ms であるとき、スリープすることで消費電力は約60%削減する一方で、転送時間は約1.1倍に増加していることがわかる。一方で、 $\delta \geq 9$ ms であるとき、転送時間の増加はないものの消費電力はほとんど削減できていないことがわかる。それ以外の場合においては、 δ の増加にしたがって省電力効果と転送時間比は減少していることがわかる。したがって、省電力効果と転送時間との間にはトレードオフの関係があり、例えば、telnetのようなリアルタイムアプリケーションにおいては、遅延の増加が許容できる程度にスリープの頻度を決定することが重要である。

3. SCTP トンネリングによる TCP パケットのバースト転送の実現

章で述べたスリープ制御の省電力効果は、理想的なスリープ、すなわち、TCPのパケット送受信タイミングが既知であり、無線LANデバイスがそれに応じてアクティブ及びスリープモードの切替を完璧に行えることを前提としている。しかし、実際の環境では、無線LANデバイスがTCPパケットの送受信タイミングを知ることはできない。そこで、本研究では、TCPのパケットをバースト的に送受信することで省電力効果を発揮する手法を提案し、SCTPを用いることでそれを実現した。本章ではその概要を示すとともに、バースト転送の省電力効果の評価結果を示す。

3.1 SCTP トンネリング

SCTP トンネリングにおいては、SCTP マルチストリーミングを利用して複数のTCPフローを1つのSCTPアソシエーションに集約する。集約されたTCPフローのパケットをバースト転送することにより、SCTP トンネリングは各パケットの送受信タイミングを制御する。

3.1.1 SCTP を利用した TCP フローの集約

SCTP は、TCP と同様に、コネクション型のトランスポート層プロトコルである。SCTP においては、アプリケーションから生成されたユーザメッセージは1つのSCTP-DATAチャネルに格納される。どのアプリケーションから生成されたものかに関係なく、1つのSCTPパケットは複数のSCTP-DATAチャネルから構成される。これにより、単一のSCTPアソシエ

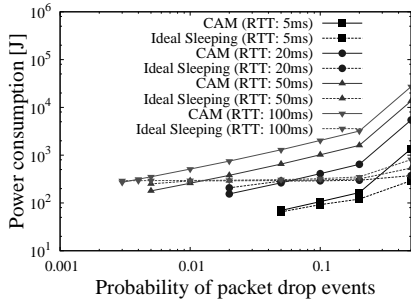


図3 消費電力

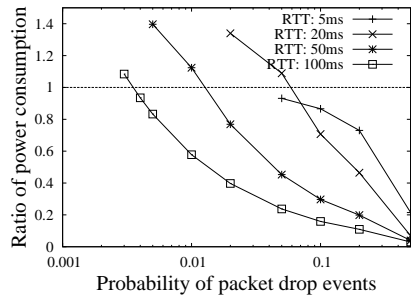


図4 消費電力比

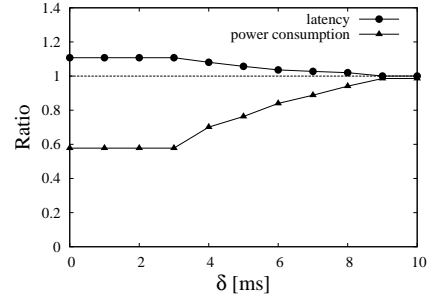


図5 省電力効果と転送時間のトレードオフ

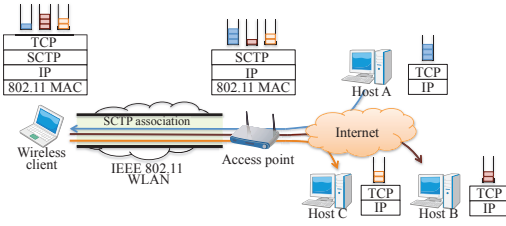


図6 SCTP トンネリング

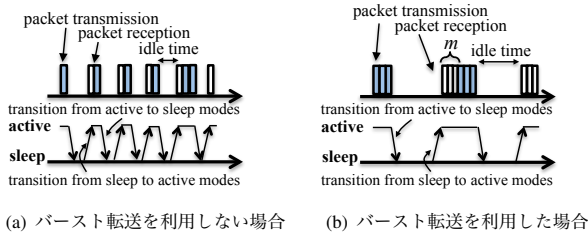


図7 SCTP トンネリングにおけるパケット送受信の時系列

ション上に複数のアプリケーションからのユーザメッセージを多重化して転送することができる(マルチストリーミング)。また、SCTPはTCPと同一の輻輳制御機構を利用する。ただし、TCPとは異なり、SCTPにおいてはSelective ACK (SACK)の利用が必須である。

本報告において提案するSCTPトンネリングにおいては、図6のように無線端末とアクセスポイントの間に単一のSCTPアソシエーションを確立する。全てのTCPフローのパケットはSCTPトンネリングを通して転送される。このとき、SCTPアソシエーション上では、個々のTCPフローは別々のストリームとして識別される。無線端末上でTCPパケットが1つ生成されると、TCPパケットはSCTP-DATAチャンクに格納され、SCTPアソシエーションの送信キューに入れられる。SCTPパケットが送信可能となると、送信キューからSCTP-DATAチャンクが取り出されてSCTPパケットに詰められ、アクセスポイントに向かって送出される。アクセスポイントがそのSCTPパケットを受信すると、その中からTCPパケットが取り出され、本来の宛先へ転送される。このとき、アクセスポイントにおいては受信したSCTP-DATAチャンクに対してSCTP-SACKチャンクが生成される。SCTP-SACKチャンクは、アクセスポイントから無線端末に送信されるSCTP-DATAチャンクにピギーバックされる。アクセスポイントから無線端末にTCPパケットが送信される場合も同様に流れて行われる。

上述のように、複数のTCPフローを集約することによって、TCPパケットの送受信タイミングを制御可能にする。

3.1.2 バースト転送

SCTPトンネリングにおいては、delayed ACKを利用してSCTPパケットのバースト転送を行う。無線端末側のパケット送受信の時系列を図7に示す。バースト転送されるSCTPパケットの数を m とすると、delayed ACKのパラメータを m に設定することで m 個のSCTPパケットがバースト転送される。具体的には、次のようにバースト転送は実現される。Delayed ACKパラメータが m であるとき、 m 個のSCTPパケットが受信されると、SCTP-SACKチャンクが1つ生成される。そ

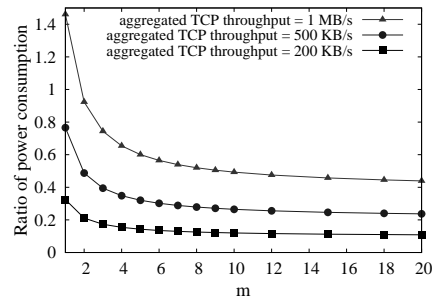


図8 消費電力比 ($q = 0.1$)

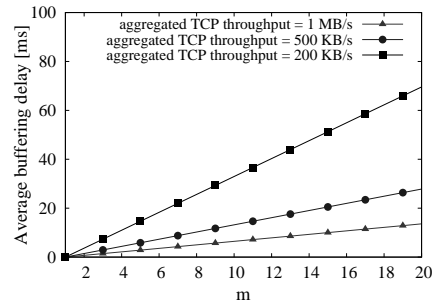


図9 平均バッファリング遅延 ($q = 0.1$)

のSCTP-SACKチャンクが含まれるSCTPパケットを受信すると、 m 個のSCTPパケットが同時に送信可能となる。SCTPトンネリングでは、SCTP-SACKチャンクは m 個送信されるSCTPパケットのうち、最後のSCTPパケットにピギーバックされるものとする。なお、delayed ACKタイマーが切れた場合は、SCTP-SACKチャンクはピギーバックされず、SCTPパケットに格納され直ちに送信される。 m の値は、無線端末とAP間にSCTPアソシエーションが確立されるときに、無線端末からアクセスポイントに通知する必要がある。

図7(b)に示すように、バースト転送を行うことによって、1回あたりのアイドル時間が長期化する。これにより、アイドル時間にスリープ際、状態遷移の回数が低減されるため、省電力効果が高まることが期待される。

3.2 消費電力解析

次に、SCTPトンネリング手法の消費電力解析を行った結果の概要を示す。詳細は紙面の都合上省略する。

図8および図9に、それぞれ m の値を変化させたときの消費電力比とそれに対応する平均バッファリング遅延を示す。なお、消費電力比は、CAMを利用した場合の消費電力に対する、スリープを行った場合の消費電力の比である。データフレームの送信失敗率は $q = 0.1$ とした。

これらの図から、 m が大きくなるにつれて消費電力比はある値に収束するように小さくなり、バッファリング遅延は線形に増加することがわかる。また、TCPフローの合計スループットが大きくなると、消費電力の削減幅は大きくなる一方でバッファリング遅延の増加率は小さくなる。これは、TCPフローの合計スループットが大きくなるにつれて、バースト転送によって削減される状態遷移の消費電力が全消費電

力に占める割合が大きくなるためである。

省電力効果とバッファリング遅延のトレードオフに注目すると、TCPフローの合計スループットが大きくなるにつれて、バッファリング遅延の増加率は小さくなり、スリープによる消費電力の削減率は大きくなる事がわかる。例えば、ユーザあるいはアプリケーションが5msの遅延の増加を許容できるとすると、TCPフローの合計スループットが200KB/sのときは、 $m=2$ とすることで35%の消費電力を削減できる。また、TCPフローの合計スループットが1MB/sの場合は、 $m=8$ とすることで、消費電力を64%削減できる。

以上から、SCTPトンネリングにおける消費電力は主にTCPフローの合計スループットによって決まり、データフレームの再送の影響は小さいことが明らかとなった。また、SCTPトンネリングを利用することで各TCPパケットに余分な遅延が生じるため、ユーザやアプリケーションが許容できる範囲にしたがって省電力効果と遅延の間のトレードオフを考慮しつつ、バースト転送のパラメータ m を決定する必要がある。

4. SCTP トンネリングの実装評価

最後に、3.章で提案したSCTPトンネリング手法の実装評価結果を示す。

4.1 実験環境

1台のアクセスポイントに1台の無線端末がIEEE 802.11aで接続しているような環境で実験を行った。無線端末にはノートPC (HP Compaq ns6320) を利用し、無線端末のWNIとしてU-APSDが利用可能なI-O DATA WHG-AGDN/CBを用いた。ノートPCにはUbuntu 10.04をインストールし、WNIのドライバとしてRalink RT3562を使用した。アクセスポイントにはNETGEAR WNDR4500を用いた。アクセスポイントのデータレートを54Mbpsとし、それ以外のパラメータはアクセスポイントのデフォルト値を採用した。SCTPトンネリングが利用するSCTPにはlksctp[14]を利用した。lksctpはLinuxカーネル向けのSCTPの実装であり、Linuxカーネル2.6からはカーネルに標準として組み込まれている。

アクセスポイント側のSCTPトンネリングはアクセスポイントに物理的に近いLinuxルータ上に実装した。これは市販のアクセスポイントにSCTPトンネリングを直接実装するのは大きな手間となるからである。したがって、無線端末はLinuxルータとの間にSCTPアソシエーションを確立する。Linuxルータと有線ホスト間のリンクをボトルネックリンクとして設定した。具体的には、netem[15]を利用することによって、Linuxルータと有線ホスト間のリンクの片道遅延 D_{BL} および帯域 B_{BL} を変更可能とした。なお、アクセスポイントとLinuxルータ間のリンクの片道遅延はボトルネックリンクの片道遅延より十分小さい。また、IP層レベルにおいてパケットの分割が発生しないように、LinuxルータのMTUを1420bytesに設定した。

4.2 実験方法

4.1節の実験環境において、SCTPトンネリングの性能評価のために以下の実験を行った。有線ホスト上に配置した10Mbytesのファイルを、無線端末からFTPを利用してダウンロードする。このとき、ファイル転送時間およびその間に無線端末のWNIが消費する電力量を計測した。ファイル転送時間には、FTPの制御用コネクションの確立からその解放にかかる時間も含めた。

なお、WNIの消費電力量の計測は[16]を参考にした。具体的には、無線端末とWNIとの間に、デバッグカードSycard PCCextend 140[17]を挿入し、デバッグカード上にある、WNIへの電力供給線に直列に計測用の抵抗を挿入する。ここで、デバッグカードの供給電圧を V_{cc} V、WNIに供給される電圧を V_{in} V、および時間 t における計測用抵抗の電位差を $v(t)$ V とする。このとき、計測用の抵抗の値 R Ω が十分小さければ $V_{in} \approx V_{cc}$ とみなせる。したがって、時刻 t_s から時刻 t_e までにWNIによって消費される電力量 W は次式によって得られる。

$$W = V_{cc} \int_{t_s}^{t_e} \frac{v(t)}{R} dt \quad (12)$$

今回の実験においては $R = 0.47 \Omega$ とした。なお、このときの V_{cc} と V_{in} の差は3%未満であった。また、 $v(t)$ の計測にはFluke Scopemeter 123を用いた。

4.3 実験結果

ボトルネックリンクの帯域 (B_{BL}) に対するFTPファイル

転送の間の消費した平均電力およびそれに対応するファイル転送時間をそれぞれ図10および図11に示す。SCTPトンネリングとの比較として、CAMで通信した場合とU-APSDを単独で利用した場合の結果もプロットしている。U-APSDを単独で利用した場合においては、トリガーとしてペイロードサイズが0byteのUDPパケットを100ms間隔で送信した。各結果は同条件で10回計測した値の平均をプロットしており、95%信頼区間を併記している。また、 m はSCTPトンネリングにおいて一度にまとめてバースト転送するパケット数を表す。

図10より、SCTPトンネリングを利用した際の平均消費電力はCAMで通信した場合と比べると20%から60%程度低いものの、U-APSDを単独で利用した場合の結果と比較すると20%から50%程度大きいことがわかる。これは、SCTPトンネリングが、U-APSDを単独で利用した場合より、1回あたりのスリープ時間が短く、単位時間あたりに送信したパケット数が多いためである。また、SCTPトンネリングは m の値を大きくするにつれて平均消費電力が低くなる事がわかる。これは一度にバースト転送するパケット数を大きくすることで、アクティブ・スリープ状態間の遷移回数を削減できるためである。なお、実験に利用したWNIのアクティブ・スリープ状態間の遷移にかかる消費電力が小さいため、 $m=2$ でその消費電力を十分削減できている。そのため、 $m=2$ から $m=5$ に大きくした際に減少する平均消費電力はわずかである。

一方で図11より、CAMで通信した場合と比べ、SCTPトンネリングはファイル転送時間の増加を抑えているのに対し、U-APSDを単独で利用した場合はファイル転送時間が大きく増加していることがわかる。また、図から、U-APSDを単独で利用した場合は D_{BL} および B_{BL} がともに大きい時にファイル転送時間が大きく増加している。U-APSDでは、無線端末宛のパケットは全てアクセスポイントにおいてバッファリングされる。U-APSDを単独で利用している場合においては固定間隔でトリガーを送信しているため、エンド間の帯域遅延積が大きいネットワークであるとアクセスポイントでバッファリングされるパケット数は増加する。その結果、アクセスポイントのバッファにおいてバッファ溢れが生じ、トランスポート層レベルにおいてパケットの再送が発生する。そのため、U-APSDを単独で利用した場合は帯域遅延積が大きなネットワークにおいてはファイル転送時間が大きく増加する。一方でSCTPトンネリングは、単位時間あたりに無線端末に到着するパケット数に基づき適応的にトリガーを送信するため、エンド間の帯域遅延積による影響を受けにくい。また、SCTPトンネリングでは、 m の値が大きくなるにつれてファイル転送時間が増加している。これは、 m 個パケットがSCTPトンネリングのバッファに溜まるまでパケットの送出を待機するためである。

ファイル転送において各方式によって削減される消費電力量を比較するため、CAMでファイル転送した際に消費される電力量に対する各方式を利用した際の消費電力量の比を図12に示す。つまり、図12は値が小さいほど省電力であることを意味する。

図12から、SCTPトンネリングは $m=2$ 以上である場合において、U-APSDを単独で利用した場合と比較して同等かそれ以上消費電力量を削減していることわかる。 D_{BL} が小さい環境においては、SCTPトンネリングによって削減できる消費電力量はU-APSDを単独で用いた場合と同程度である。これは、 D_{BL} が小さい環境においては、U-APSDを単独で利用した場合のファイル転送時間の増加幅が小さいためである。なお、SCTPトンネリングは、 B_{BL} が小さいときに削減できる消費電力量がU-APSDを単独で利用した場合と比べわずかに小さいもの、図11で示した通りファイル転送時間の増加は小さい。

以上から、SCTPトンネリングはファイル転送時間の増加を抑えながら、無線通信の省電力化が可能であることが明らかとなった。また、SCTPトンネリングのパラメータである m はWNIの特性に依存するため、無線端末が利用するWNIに合わせて m を決める必要がある。

5. まとめと今後の課題

本報告においては、トランスポート層プロトコルの工夫による、無線機器の省電力機能の効果の最大化に着目した、我々の研究グループによる取り組みを紹介し、無線機器の省電力効果における上位層プロトコルの挙動の重要性について議論した。特に、複数パケットをバースト的に転送することで、無線機器のスリープ制御の頻度を下げつつ、スリープ時間を確保することによって、スリープによる省電力効果が大きくなることを示した。また、実装実験結果を示し、従来の省電力機構

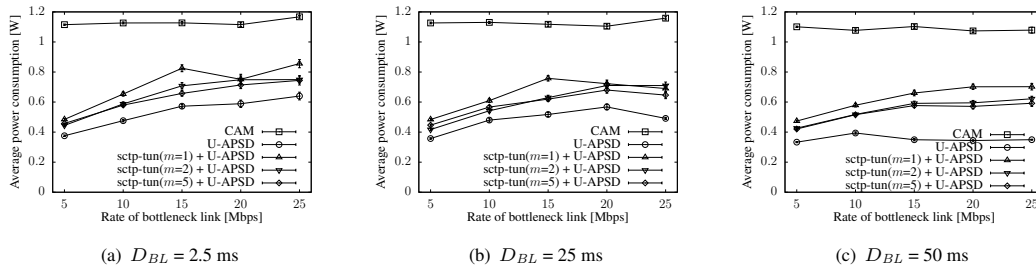


図 10 平均消費電力

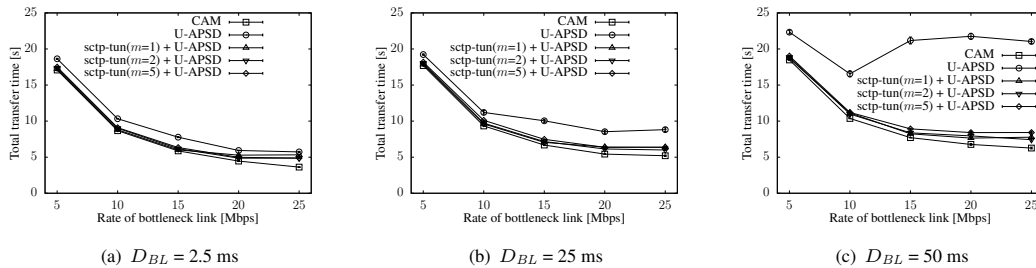


図 11 ファイル転送時間

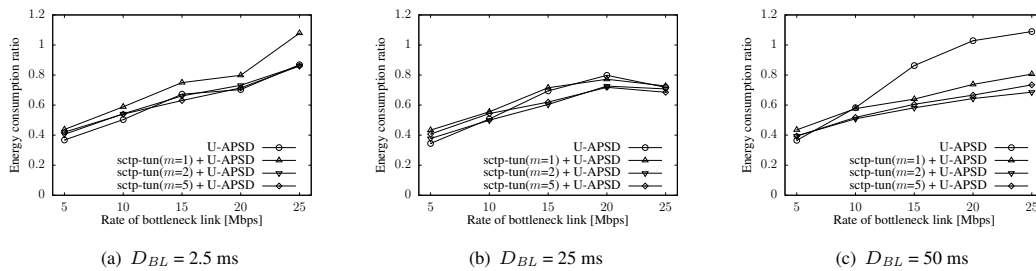


図 12 消費電力量比

をそのまま用いる場合に比べて、データ転送性能をほとんど下げることなく、省電力効果が得られることを明らかにした。今後の課題としては、同様のスリープ制御を行っているものの、制御時間スケールが異なる LTE などのモバイル通信端末への適用の検討が挙げられる。

文 献

- [1] W. Paper, "Power Consumption and Energy Efficiency Comparisons of WLAN Products," May 2003.
- [2] V. Raghunathan, T. Pering, R. Want, A. Nguyen, and P. Jensen, "Experience with a low power wireless mobile computing platform," in *Proceedings of ISLPED 2004*, (New York, New York, USA), pp. 363–368, ACM Press, Aug. 2004.
- [3] Y. Agarwal, C. Schurgers, and R. Gupta, "Dynamic power management using on demand paging for networked embedded systems," in *Proceedings of ASP-DAC 2005*, (New York, New York, USA), pp. 755–759, ACM Press, Jan. 2005.
- [4] Wistron NeWeb Corp., "CM9: WLAN 802.11 a/b/g mini-PCI Module." available at <http://site.microcom.us/CM9.pdf>. [Accessed on Dec. 2012].
- [5] Silex, "SX-SDCAG 802.11a/b/g SDIO card module datasheet." available at http://www.silexamerica.com/products/data.sheets/sx-sdcag_brief.pdf.
- [6] R. Krashinsky and H. Balakrishnan, "Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown," *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 135–148, Jan. 2005.
- [7] J. Liu and L. Zhong, "Micro power management of active 802.11 interfaces," in *Proceedings of MobiSys 2008*, (New York, New York, USA), pp. 146–159, ACM Press, 2008.
- [8] IEEE 802.11-2007, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control*

(MAC) and Physical Layer (PHY) specifications. IEEE, June 2007.

- [9] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "An analysis of energy consumption for TCP data transfer with burst transmission over a wireless LAN," *International Journal of Communication Systems (Online)*, July 2014.
- [10] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "SCTP tunneling: Flow aggregation and burst transmission to save energy for multiple TCP flows over a WLAN," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E96-B, pp. 2615–2624, Oct. 2013.
- [11] R. Stewart, "Stream Control Transmission Protocol," Sept. 2007.
- [12] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Experimental evaluation of SCTP tunneling for energy-efficient TCP data transfer over a WLAN," in *Proceedings of IWCMC 2014*, pp. 833–838, Aug. 2014.
- [13] N. Cardwell, S. Savage, and T. Anderson, "Modeling TCP latency," in *Proceedings of INFOCOM 2000*, vol. 3, pp. 1742–1751, IEEE, Mar. 2000.
- [14] lksctp. available at <http://lksctp.sourceforge.net/>.
- [15] netem. available at <http://www.linuxfoundation.org/en/Net:Netem>.
- [16] L. M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," in *Proceedings of INFOCOM 2001*, vol. 3, pp. 1548–1557, IEEE, Apr. 2001.
- [17] Syscard PCCextend 140. available at <http://www.syscard.com/ext140.html>.