

無線 LAN における省電力 TCP データ転送方式の実験評価

橋本 匡史[†] 長谷川 剛^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

^{††} 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 1-32

E-mail: †{m-hasimt,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

あらまし 無線通信において消費電力の削減は重要な課題の一つである。我々は、無線 LAN 環境を対象とした省電力通信方式として SCTP トンネリングを提案してきた。SCTP トンネリングは、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 本の 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することにより 1 回あたりのアイドル時間を長くする。これにより、アクティブ・スリープ状態間の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る。本報告では、市販の無線機器で構成された無線 LAN 環境において、SCTP トンネリングの性能評価を消費電力量に加えデータ転送時間の観点から行う。実験評価を通して、U-APSD と比べ、SCTP トンネリングは転送時間の増加を抑えながら消費電力量を削減できることを示す。

キーワード Transmission Control Protocol (TCP), Stream Control Transmission Protocol (SCTP), 無線 LAN, 省電力

Experimental Evaluation of Energy-Efficient TCP Data Transfer over a Wireless LAN

Masafumi HASHIMOTO[†], Go HASEGAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 560-0871 Japan

^{††} Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

E-mail: †{m-hasimt,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp

Abstract Energy efficiency of a wireless client is one of the important issues in wireless communications. We have proposed an energy-efficient method for TCP data transfer over a wireless LAN (WLAN) environment. The proposed method is termed SCTP tunneling, and aggregates multiple TCP flows into a single SCTP association between a wireless client and access point to control packet transmission and reception timings. Furthermore, SCTP tunneling lengthens sleep duration by transmitting and receiving multiple packets in a bursty fashion. In this report, we assess energy efficiency and data transfer time of SCTP tunneling through experiments in a WLAN test-bed in which prototype of SCTP tunneling is implemented. From the experimental evaluations, we show that, compared with U-APSD, SCTP tunneling can reduce energy consumption while keeping the increase in data transfer time.

Key words Transmission Control Protocol (TCP), Stream Control Transmission Protocol (SCTP), wireless LAN, energy efficiency

1. はじめに

IEEE 802.11 無線 LAN の通信機能を有した無線端末の普及により、様々な場所において無線 LAN 環境を介したインターネットアクセスが利用可能となった。無線端末は通常バッテリー駆動であることから、駆動時間の長期化のために省電力化は重要な課題である。無線 LAN 環境においては、無線端末が無線通信によって消費する電力は最大で 50 % と大きく、無線通信

の省電力化は注目されている [1-3]。

IEEE 802.11 では、通常の通信モードである Continuously Active Mode (CAM) に対して、省電力モードである Power Saving Mode (PSM) が定められている [4]。PSM を利用することで大きく省電力化を図ることができる一方、ネットワーク性能が著しく低下する場合があることが指摘されている [5]。そのため、PSM の欠点に対処するため、IEEE 802.11e において Automatic Power Save Delivery (APSD) が提案された [6]。そのほかにも、

無線 LAN を対象とした省電力通信方式について様々な研究がなされてきた [5, 7-11] . [5, 7, 8] の方式では MAC プロトコルを変更することで省電力化を図っており, [9-11] においては特定のアプリケーションを対象とした省電力方式が提案されている .

無線端末上において複数のネットワークアプリケーションが並行動作しているとき, 各アプリケーションはそれぞれ独立して TCP データ転送を行う . このような状況においては, 無線端末が無線ネットワークインタフェース (WNI) を適切なタイミングでスリープさせるのは困難である . また, このときスリープを行うとアクティブ状態とスリープ状態間の遷移が頻繁に発生し, スリープによる省電力効果が低減する原因となる . そこで我々は, 無線 LAN 環境において TCP データ転送の省電力化を実現する Stream Control Transport Protocol (SCTP) トンネリングを提案してきた [12] . SCTP トンネリングでは, SCTP マルチストリーミングを利用することで複数の TCP フローを 1 本の 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 packets をバースト的に転送 (バースト転送) することにより 1 回あたりのアイドル時間を長くする . これによってアクティブ・スリープ状態間の遷移回数を削減し, スリープによる省電力効果を高める . しかし, [12] においては, SCTP トンネリングの性能評価を数値解析に基いて省電力効果のポテンシャルを中心に評価しているものの, 実際の無線 LAN 環境への適用可能性に関する議論は不十分であった .

そこで本報告では, SCTP トンネリングのプロトタイプを作成し, 実無線 LAN 環境における SCTP トンネリングの有効性を示す . SCTP トンネリングのプロトタイプは Linux アプリケーションとして実装される . また, SCTP トンネリングが利用する MAC レベルの省電力モードとして, APSD のひとつである Unscheduled APSD (U-APSD) を用いる . 市販の無線機器を用いた無線 LAN 環境における実験評価によって, SCTP トンネリングは U-APSD を単独で利用した場合と比べて, 転送時間の増加を抑えながら省電力を実現できることを示す .

以下, まず 2. 章において SCTP トンネリングの概要を説明する . 3. 章においては SCTP トンネリングを実装する上での課題を整理するとともに, その解決方法を示す . 4. 章では, 市販の無線機器を用いた無線 LAN 環境上で, SCTP トンネリングのプロトタイプを実験評価しその結果について議論する . 最後にまとめと今後の課題を 5. 章において述べる .

2. SCTP トンネリング

SCTP トンネリングでは, SCTP [13] を利用することにより複数の TCP フローを 1 本の SCTP アソシエーションに集約する . 集約された TCP フローの packets をバースト転送することにより, 短いアイドル時間をまとめ 1 回あたりのアイドル時間を長くする . その上で, アイドル時間にスリープすることで無線端末の省電力化を行う . なお, SCTP トンネリングでスリープするためには PSM や APSD といった MAC レベルの省電力モードと組み合わせる必要がある . 以下, SCTP トンネリングにおける TCP フローの集約とバースト転送について説明する . それぞれの詳細については [12] を参照されたい .

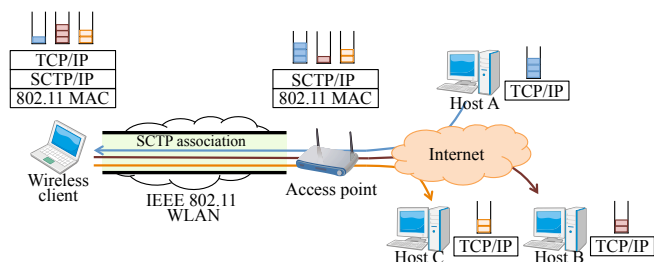


図 1: SCTP トンネリング

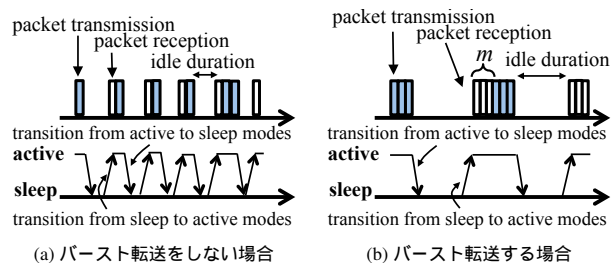


図 2: SCTP トンネリングにおけるパケット送受信の時系列

2.1 TCP フローの集約

SCTP トンネリングにおいては, 図 1 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 . SCTP では, アプリケーションから生成されたユーザメッセージは単一の SCTP-DATA チャンクに格納される . 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 チャンクから構成される . これにより, 単一の SCTP アソシエー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) . SCTP トンネリングでは, マルチストリーミングを利用して複数の TCP フローを集約し, TCP パケットの送受信タイミングを制御する .

2.2 バースト転送

SCTP トンネリングにおいて, 送受信されるパケットの時系列の一例を図 2 に示す . なお, 図中の m は一度にまとめてバースト転送するパケット数である . SCTP トンネリングでは, 複数パケットを連続でバースト転送することにより 1 回あたりのアイドル時間を長くする (図 2(b)) . これにより, アイドル時間にスリープする際に発生するアクティブ・スリープ状態間の状態遷移回数が削減され, 省電力効果が高まることが期待できる . しかし, バースト転送を実現するために SCTP トンネリングは m 個のパケットを保持する必要があるため, パケットの転送に遅延が生じる欠点がある .

3. プロトタイプ的设计

3.1 プロトコルスタック

実際の無線 LAN における SCTP トンネリングの性能を評価するために, SCTP トンネリングを無線 LAN 機器に実装する . 実装の容易性から, SCTP トンネリングは Linux アプリケーションとして実装する . 図 3 に SCTP トンネリングを利用した際のプロトコルスタック間通信の概念図を示す . 複数のアプリケー

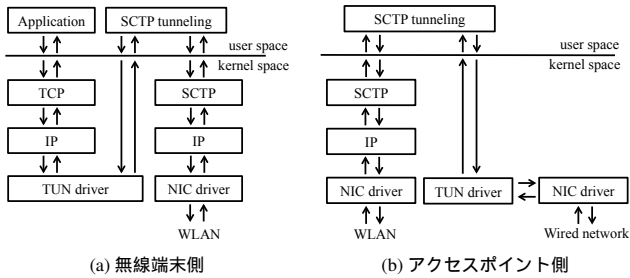


図 3: SCTP トンネリングにおけるプロトコルスタック間の通信

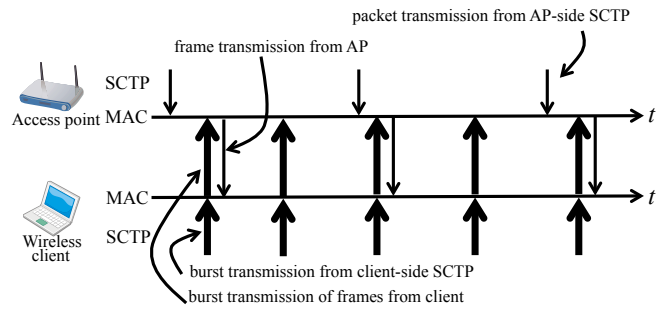
ションからのパケットを SCTP トンネリングに集約するために、TUN ドライバ [14] を利用する。TUN ドライバは仮想ネットワークデバイスドライバである。TUN ドライバを利用すると、TUN ドライバに紐付けられた IP アドレスへのパケットをユーザスペースアプリケーションに転送することが可能である。無線端末上のアプリケーションからパケットが生成されると、TUN ドライバを介して SCTP トンネリングにそのパケットは転送される。そのパケットは無線端末側の SCTP トンネリングからアクセスポイント側の SCTP トンネリングに転送される。その後、アクセスポイント側の SCTP トンネリングはそのパケットを TUN ドライバを介して本来の宛先に転送する。アクセスポイントの有線ネットワーク側から転送されてきたパケットは、上記の逆の手順で、最終的に無線端末上のアプリケーションへ転送される。

3.2 スリープ方式

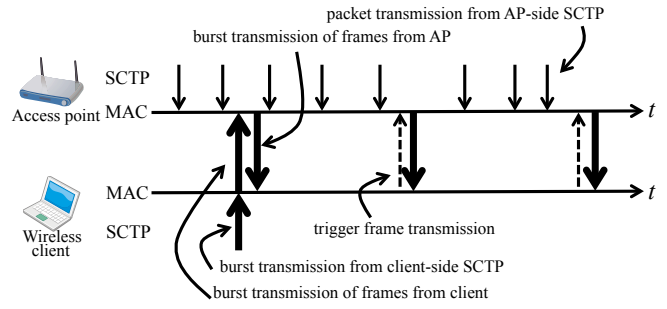
本節では SCTP トンネリングが利用する MAC レベルの省電力モードを決定する。SCTP トンネリングでは、IEEE 802.11 で定義されている省電力モードのうち、APSD の一つである U-APSD を省電力モードとして採用する。U-APSD では、U-APSD を利用している無線端末宛のフレームはアクセスポイントにおいて保持され、無線端末はフレーム送信要求（トリガー）をアクセスポイントに送信することでそのフレームを受信できる。トリガーには、データフレームおよび QoS-null フレームを利用できる。以上の機構により、無線端末は、任意のタイミングによりアクセスポイントに保持されているフレームを受信できる。SCTP トンネリングでは、次節で述べるアクセスポイント側におけるバースト転送を実現するため、適切なタイミングでトリガーを送信する必要がある。トリガーの送信方法については 3.4 節において議論する。

3.3 バースト転送

本節においては、SCTP トンネリングにおけるバースト転送の実現方法を検討する。SCTP トンネリングのプロトタイプでは以下の単純な仕組みを利用してバースト転送を行う。ここで、 m 個のパケットを 1 度にバースト転送することを考える。このとき、無線端末は m 個のパケットが SCTP トンネリングのバッファに到着するか、1 つ目のパケットが SCTP トンネリングのバッファに到着してから一定時間経つと SCTP トンネリングでバッファリングされているパケットを全てバースト転送する。なお、アクセスポイント側では U-APSD によりパケットがバッファリングされるため、アクセスポイントに m 個のパケット



(a) 上りトラフィック量が下りトラフィック量より多い場合



(b) 下りトラフィック量が上りトラフィック量より多い場合

図 4: 無線端末・アクセスポイント間のフレーム交換

がバッファリングされるタイミングで無線端末がトリガーを送信すれば良い。したがって、無線端末側にのみバースト転送を実現する機構を実装する。

3.4 トリガー送信アルゴリズム

本節においては、トリガーを送信するタイミングの決定方法を検討する。上下トラフィック量に着目したときの無線端末とアクセスポイント間のフレーム交換の様子を図 4 に示す。図 4(a) のように、単位時間あたりに無線端末側から送信されるパケット数がアクセスポイント側から送信されるパケット数より多い場合、無線端末は改めてトリガーを送信する必要はない。これは U-APSD においては無線端末から送信されるデータフレームをトリガーとして利用できるためである。一方で、単位時間あたりに無線端末から送信されるパケット数がアクセスポイント側から送信されるパケット数より少ない場合においては、無線端末は適切なタイミングでトリガーを送信する必要がある。アクセスポイントへのトリガーの到着が、そのバッファにパケットが到着するより早すぎればトリガーが無駄となり、遅すぎればパケットのバッファリング遅延が増大するためである。そのため理想的には、無線端末はトリガーを m 個目のパケットがアクセスポイントに到着した瞬間にトリガーがアクセスポイントに到着するように送信することが望ましい。しかし、アクセスポイントからの協力がなければ、無線端末はそのタイミングを得ることができない。ここでは、オーバーヘッドの観点からアクセスポイントからの協力なしに、無線端末側でトリガーを送信するタイミングを決定する方法を検討する。

以上の議論より、SCTP トンネリングにおいては、トリガーフレームの送信タイミングを以下のように決める。無線端末側からデータフレームが一定時間（トリガー送信タイムアウト）に送信されなければトリガーを送信する。なお、SCTP トンネ

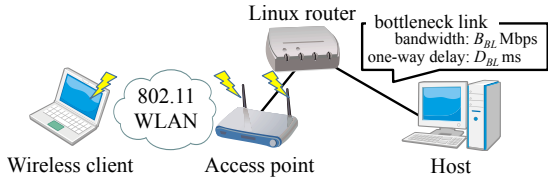


図 5: 無線 LAN 実験環境

リングにおいては、トリガーとしてペイロードサイズが 0 byte の UDP パケットを利用する。

以降では、トリガー送信タイムアウトの算出方法を決定する。まず、アクセスポイントに m 個のパケットが溜まるまでにかかる時間を推定する。SCTP トンネリングではパケットをバースト転送するため、無線端末側において観測されたパケット到着間隔からアクセスポイントにおけるそれを得ることは難しい。そのため、タイムスロット H の間に無線端末が受信したパケット数を計上することによって平均パケット到着間隔を計算する。それによって得られた平均パケット到着間隔をアクセスポイントにおける平均パケット到着間隔とみなす。ここで、 i 番目のタイムスロットにおいて無線端末側の SCTP トンネリングが受信したパケット数の移動平均 n_i^r とすると、 i 番目のタイムスロットの間に無線端末において観測された受信パケット数 \hat{n}_i^r を用いて、 n_i^r は次式で得られる。

$$n_i^r = \alpha \hat{n}_i^r + (1 - \alpha) n_{i-1}^r \quad (1)$$

なお α は平滑化係数である。

(1) 式を利用すると、 i 番目のタイムスロットで推定される平均パケット到着間隔は H/n_i^r となる。つまり、 m 個のパケットをバースト転送する際には、 $m \cdot H/n_i^r$ の間に無線端末側の SCTP トンネリングにおいてパケットが送信されなければトリガーを送信すれば良い。しかし、トリガー送信タイムアウトがアクティブ・スリープ状態間の遷移時間より短い場合には、無線端末や WLAN に対して不必要な負荷を与え得る。一方でトリガー送信タイムアウトがピーコン間隔より大きい場合には、ピーコンによってアクセスポイントで保持されているパケットを受信するように無線端末に通知されるため、トリガーの送信は不要である。そのため、トリガー送信タイムアウトには最小値および最大値を設定する。最終的に、 $(i+1)$ 番目のタイムスロットにおけるトリガーフレーム送信タイムアウト t_{i+1}^{trig} は次式によって決定する。

$$t_{i+1}^{trig} = \max \left(\min \left(m \cdot H/n_i^r, t_{max}^{trig} \right), t_{min}^{trig} \right) \quad (2)$$

なお、 t_{max}^{trig} および t_{min}^{trig} はそれぞれ t_i^{trig} の最大値および最小値である。また、 $n_i^r = 0$ のとき $t_{i+1}^{trig} = t_{max}^{trig}$ である。

4. 実験評価

4.1 実験環境

実験環境を図 5 に示す。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。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。

表 1: SCTP トンネリングのパラメータ

パラメータ	設定値
α	1/8
H	100 ms
T_{burst}	20 ms
t_{min}^{trig}	2 ms
t_{max}^{trig}	15 ms
delayed SACK タイムアウト	5 ms

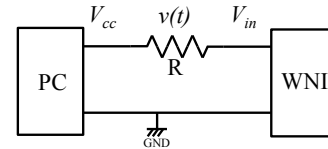


図 6: 消費電力計測回路

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 54 Mbps 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 [15] 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 [16] 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 1420 bytes に設定した。

SCTP トンネリングの各種パラメータは表 1 のように設定した。なお、 T_{burst} はバースト転送のタイムアウトの値を表す。また、表 1 の値は、予め実験において SCTP トンネリングの性能が高くなるように調整した値である。

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 10 Mbytes 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。

WNI の消費電力計測回路を図 6 に示す。なお、WNI の消費電力量の計測は [17] を参考にした。無線端末と WNI との間に、デバッグカード Sycard PCCextend 140 [18] を挿入する。図 6 のように、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，に供給される電圧 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．

$$W = V_{cc} \int_{t_s}^{t_e} \frac{v(t)}{R} dt \quad (3)$$

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 7 および図 8 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 0 byte の UDP パケットを 100 ms 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 7 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受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ことからわかる．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 8 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で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 8(c) から，U-APSD を単独で利用した場合では 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しうる．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 9 に示す．つまり，図 9 は値が小さいほど省電力であることを意味する．

図 9 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．図 9(a) のように， 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の，図 8 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. おわりに

本報告では，無線 LAN 環境を対象とした省電力通信方式である SCTP トンネリングを，市販の無線機器を利用した無線 LAN 実験環境において実装した．そして，その環境において省電力効果とファイル転送時間の観点から SCTP トンネリングの性能評価を行った．SCTP トンネリングは Linux アプリケーションとして実装し，SCTP トンネリングが利用する省電力モードとして U-APSD を用いた．FTP ファイル転送をトラヒックとして利用した実験を通して，SCTP トンネリングは，U-APSD を単独で用いた場合と同程度の省電力効果を保ちながら，ファイル転送時間を短く抑えることができることを示した．

今後は，無線端末上で VoIP やビデオストリーミングといったマルチメディアアプリケーションや複数のネットワークアプリケーションが混在する状況において，SCTP トンネリングの性能評価を行う予定である．

文 献

- [1] Atheros, "Power consumption and energy efficiency comparisons of WLAN products," In Atheros White Papers, May 2003.
- [2] V. Raghunathan, T. Pering, R. Want, A. Nguyen, and P. Jensen, "Experience with a low power wireless mobile computing platform," Proceedings of ISLPED 2004, pp.363–368, 2004.

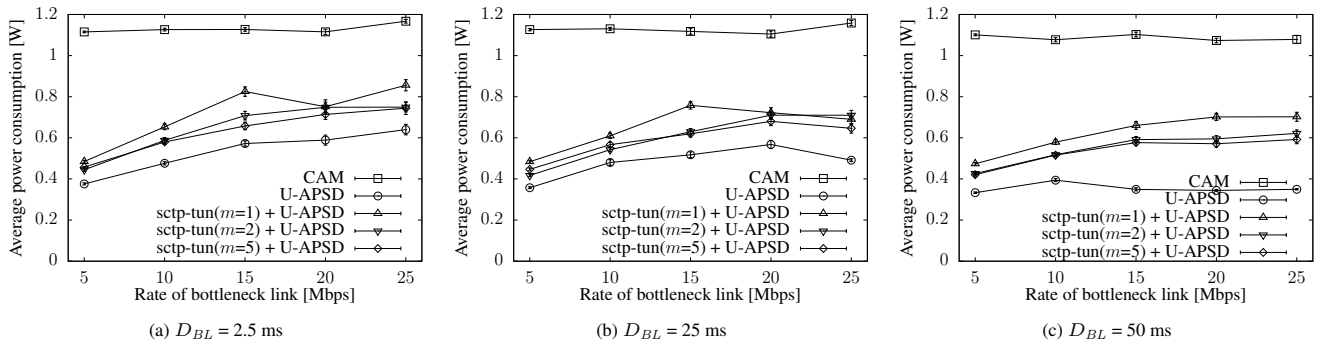


図 7: 平均消費電力

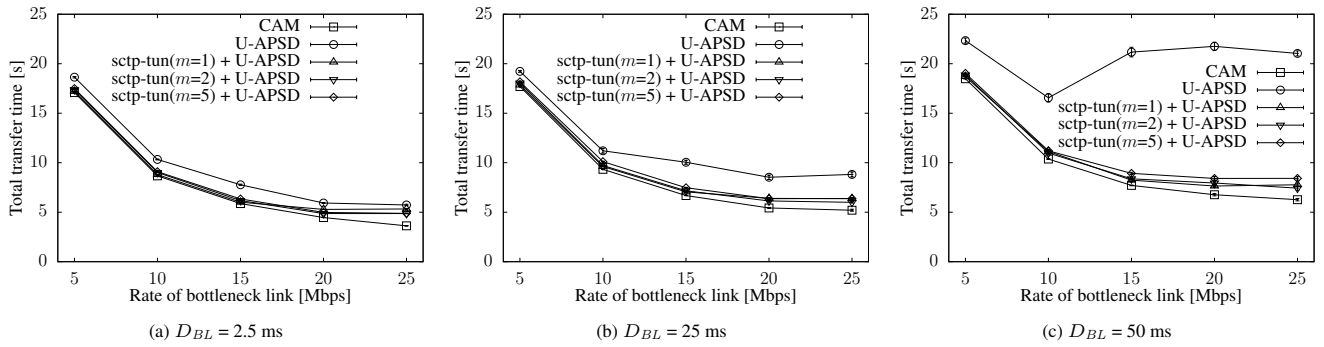


図 8: ファイル転送時間

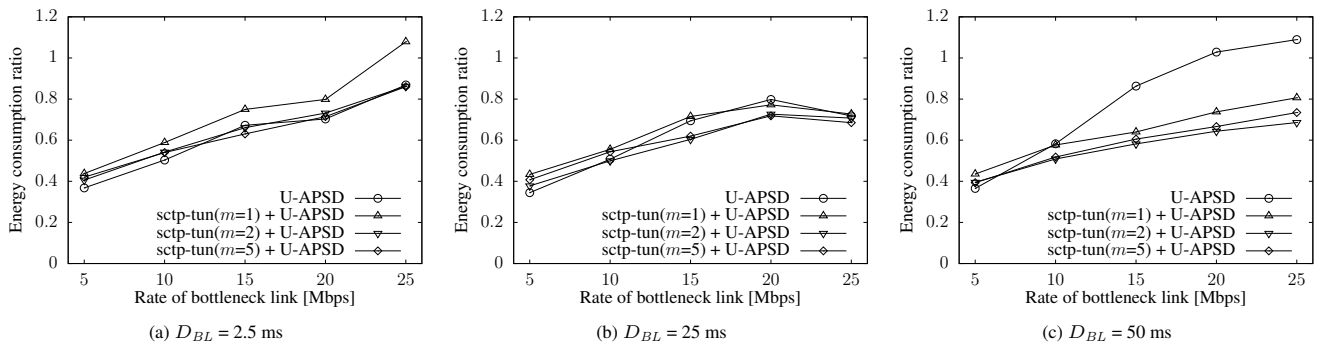


図 9: 消費電力量比

- [3] Y. Agarwal, C. Schurgers, and R. Gupta, "Dynamic power management using on demand paging for networked embedded systems," Proceedings of ASP-DAC 2005, pp.755–759, Jan. 2005.
- [4] IEEE Std 802.11-2007, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," June 2007.
- [5] R. Krashinsky and H. Balakrishnan, "Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown," Wireless Networks, vol.11, no.1-2, pp.135–148, Jan. 2005.
- [6] IEEE Std 802.11e-2005, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: Medium access control (MAC) quality of service enhancements," Nov. 2005.
- [7] D. Camps Mur, X. Pérez-Costa, and S. Sallent Ribes, "An adaptive solution for wireless LAN distributed power saving modes," Computer Networks, vol.53, no.18, pp.3011–3030, Dec. 2009.
- [8] Y. He and R. Yuan, "A novel scheduled power saving mechanism for 802.11 wireless LANs," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.8, no.10, pp.1368–1383, Oct. 2009.
- [9] H. Yan, S.A. Watterson, D.K. Lowenthal, K. Li, R. Krishnan, and L.L. Peterson, "Client-centered, energy-efficient wireless communication on IEEE 802.11b networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.5, no.11, pp.1575–1590, Nov. 2006.
- [10] V. Nambodiri and L. Gao, "Energy-efficient VoIP over wireless LANs," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol.9, no.4, pp.566–581, April 2010.
- [11] F.R. Dogar, P. Steenkiste, and K. Papagiannaki, "Catnap: Exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices," Proceedings of MobiSys 2010, pp.107–122, June 2010.
- [12] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Exploiting SCTP multistreaming to reduce energy consumption of multiple TCP flows over a WLAN," Proceedings of GreenNETs 2012, pp.102–111, Oct. 2012.
- [13] R. Stewart, "Stream control transmission protocol," Request for Comments 4960, Sept. 2007.
- [14] Universal TUN/TAP driver, available at <http://vtun.sourceforge.net/tun/>.
- [15] lksctp, available at <http://lksctp.sourceforge.net/>.
- [16] netem, available at <http://www.linuxfoundation.org/en/Net:Netem>.
- [17] L.M. Feeney and M. Nilsson, "Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment," Proceedings of INFOCOM 2001, vol.3, pp.1548–1557, April 2001.
- [18] Syscard PCCextend 140, available at <http://www.syscard.com/ext140.html>.