

無線 LAN 環境における TCP データ転送の省電力化のための SCTP トンネリングの提案

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 無線ネットワークを介したデータ転送における消費電力の削減は重要な課題の一つである。省電力化の方法として、パケットが送受信されていないアイドル時間においてスリープする方法がある。しかし、複数の TCP フローが混在する場合において、無線端末の無線ネットワークインタフェースが適切なタイミングでスリープすることは困難である。また、アクティブ状態とスリープ状態間の遷移が頻繁に発生すると、スリープによる省電力効果が低減する。そこで我々は、無線 LAN 環境における TCP データ転送の省電力化を行うために SCTP トンネリングを提案する。SCTP トンネリングは、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 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る。本報告ではさらに、提案方式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する。消費電力モデルに基づいた数値解析により、提案方式が消費電力を最大 70 % 程度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

Proposal of SCTP Tunneling for Energy-Efficient TCP Data Transfer over a Wireless LAN Environment

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 The energy efficiency of a wireless client is an important issue on wireless network environments. When multiple TCP flows are established from a wireless client, it is difficult for a wireless network interface of the wireless client to understand and control the timings for sleeping. In addition, the frequent state transitions between active and sleep modes consume energy, resulting in the reduction of energy efficiency. In this report, we propose an energy-efficient method for multiple TCP flows in wireless LAN environments. The proposed method is called as SCTP tunneling, that aggregates multiple TCP flows to a single SCTP association between a wireless client and an access point to control the timings of packet transmission and reception. Furthermore, it lengthens sleep time by transmitting and receiving multiple packets in a bursty fashion. We construct a mathematical model for an energy consumption model of SCTP tunneling to assess its energy efficiency. Through numerical examples, we show the proposed method can reduce up to around 70 % energy consumption.

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 環境を利用したときに、無線端末が無線通信によって消費する電力は 10% から 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 においては、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) [4] が定められている。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、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 [5-10]。[5-7] 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、[8-10] 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を提案している。本報告では、特定のアプリケーションの想定や MAC プロトコルの変更を必要としない汎用的な省電力方式の提案を目的とする。

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。

そこで本報告においては、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する。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の間に確立した 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る。

また本報告では、省電力効果を評価するため、SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築する。提案モデルは、無線 LAN 環境において単一の TCP フローが存在するときの消費電力解析 [12, 13] をもとに、IEEE 802.11 MAC のフレーム交換および輻輳制御機構の詳細な挙動に着目して構築する。なお、[12] では、無線 LAN 環境における TCP データ転送の消費電力モデルを構築し、[13] においてはそのモデルを拡張してバースト転送を利用した場合の消費電力モデルを示している。SCTP トンネリングの消費電力モデルに基づいた数値解析の結果から、TCP フローのスループットが省電力効果に与える影響を評価する。また、省電力効果と遅延の間のトレードオフについても議論する。

2. 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することで複数の 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。

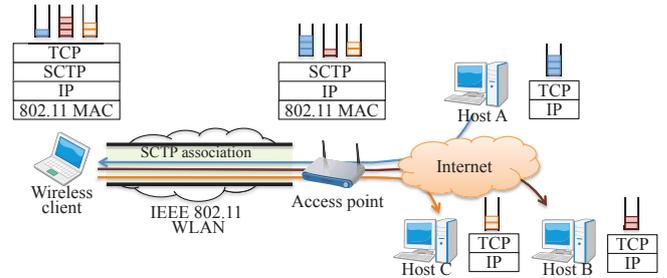


図 1 SCTP トンネリング

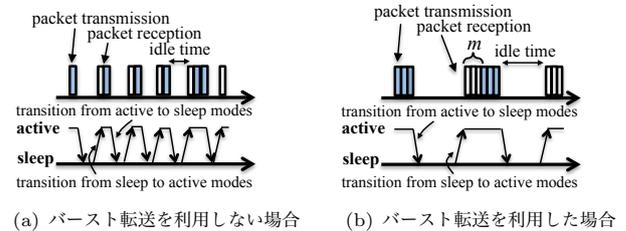


図 2 SCTP トンネリングにおけるパケット送受信の時系列

2.1 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)。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 トンネリングでは、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。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、SCTP パケットに詰められる。そして、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な流れで行われる。

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。

2.2 バースト転送

SCTP トンネリングにおいては、delayed ACK [14] 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 2 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に、SCTP パケットに格納され直ちに送信される。 m の値は、無線端末とアクセスポイントの間に 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 2(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する際、状態遷移の回数が削減されるため、省電力効果が高まることが期待される。

3. 消費電力モデル

本章においては、SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築する。3.1 節では、消費電力モデルの仮定について述べる。消費電力モデルは IEEE 802.11 MAC レベルのサブモデルと SCTP レベルのサブモデルから構成され、それぞれ 3.2 節および 3.3 節で説明する。

3.1 仮定

1 台のアクセスポイントに 1 台の無線端末が接続している無線 LAN 環境を仮定する。無線端末とアクセスポイントの間には 1 つの SCTP アソシエーションが確立されており、無線端末ではアプリケーションによって複数の TCP フローが生成されている。各 TCP フローの平均スループットは既知であるとす。

WNI 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、それらの状態における消費電力をそれぞれ P^t , P^r , P^i および P^s と表す。また、アクティブ状態からスリープ状態への遷移にかかる消費電力を P^{as} 、スリープ状態からアクティブ状態への遷移にかかる消費電力を P^{sa} とし、それぞれにかかる時間を T^{as} および T^{sa} と表す。

その他については以下のように仮定する。

- MAC レベルにおいて、データフレームの損失はランダムに発生する。
- 無線端末からアクセスポイントへのフレーム送信には RTS/CTS を利用し、アクセスポイントからのフレーム送信には RTS/CTS を利用しない。
- TCP フローを用いているアプリケーションの転送データは無限に存在するため、SCTP の delayed ACK タイマーが切れることはない。

本報告では、SCTP トンネリングの潜在的な省電力効果を評価するために理想的なスリープを仮定する。ここで理想的なスリープとは、無線端末の WNI が SCTP パケットの送受信タイミングに合わせて適切にスリープできることを指す。なお実環境におけるスリープ方式としては、PSM や IEEE 802.11e において定められた Automatic Power Save Delivery (APSD) [4] を利用することが考えられる。

3.2 IEEE 802.11 MAC の消費電力モデル

先行研究 [12,13] において、我々は IEEE 802.11 MAC のフレーム交換による消費電力のモデルを構築した。しかし、そのモデルにおいては無線 LAN 内におけるデータフレーム損失を考慮していない。そのため本節では、無線端末において 1 つ

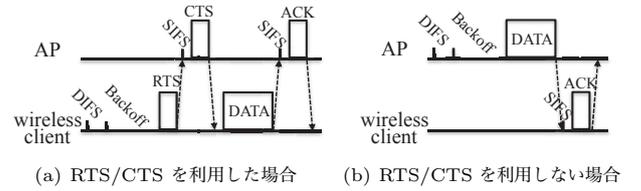


図 3 IEEE 802.11 MAC におけるフレーム交換

のデータフレームを送受信するときに消費する電力量を導出する際に、データフレームの損失を考慮する。

無線端末とアクセスポイントの間では、図 3 のようにフレーム交換が行われる。図 3(a) のように RTS/CTS を利用した場合においては、無線端末は DIFS 時間とバックオフ時間待機した後に RTS フレームをアクセスポイントに送信する。アクセスポイントは RTS フレームを受信すると、SIFS 時間待ったのちに CTS フレームを送信する。無線端末が CTS フレームを受信するとデータフレームを送信し、アクセスポイントはデータフレームの受信の返答として ACK フレームを返信する。一方、RTS/CTS を利用しない場合においては、図 3(b) のように、無線端末は DIFS 時間とバックオフ時間の後にデータフレームを送信する。データフレームを受信したアクセスポイントは ACK フレームを返信する。

$CW(i)$ を 1 つのデータフレームが i 回送信されたときのコンテンションウィンドウサイズとする。バックオフ時間はスロット時間と範囲が $[0, CW(i)]$ である一様な乱数との積で求められる。 $CW(i)$ は次式で得られる。

$$CW(i) = \min((CW_{min} + 1)2^{i-1} - 1, CW_{max}) \quad (1)$$

なお、 CW_{min} は最小コンテンションウィンドウサイズ、 CW_{max} は最大コンテンションウィンドウサイズである。(1) 式を用いると、1 つのデータフレームが i 回送信されたときの平均バックオフ時間は次式により得られる。

$$T^{BO}(i) = CW(i) \frac{T^{slot}}{2} \quad (2)$$

なお、 T^{slot} はスロット時間である。

無線端末からデータフレームが送信されるときに、 i 回目の送信にかかる平均時間を $T^t(i)$ と表すと、(2) 式を利用して $T^t(i)$ は次式のように計算できる。

$$T^t(i) = 3T_{SIFS} + T_{DIFS} + T^{BO}(i) + 4\tau + T_{RTS} + T_{DATA}^{client} + T_{CTS} + T_{ACK} \quad (3)$$

なお、 T_{SIFS} は SIFS 時間、 T_{DIFS} は DIFS 時間、 T_{RTS} は RTS フレームの送信にかかる時間、 T_{CTS} は CTS フレームの送信にかかる時間、 T_{DATA}^{client} は無線端末がデータフレームを送信するのにかかる時間、 T_{ACK} は ACK フレームの送信にかかる時間、 τ は無線伝搬遅延を表す。

同様に、アクセスポイントから 1 つのデータフレームが送信される場合に、無線端末の i 回目の受信にかかる平均時間を $T^r(i)$ とすると、 $T^r(i)$ は次式で求められる。

$$T^r(i) = T_{SIFS} + T_{DIFS} + T^{BO}(i) + 2\tau + T_{DATA}^{AP} + T_{ACK} \quad (4)$$

なお、 T_{DATA}^{AP} はアクセスポイントから送信されるデータフレームの受信にかかる時間である。

次に (3) 式および (4) 式を用いて、 $T^t(i)$ および $T^r(i)$ の期待値を求める。ここで、MAC レベルにおけるデータフレームの送信失敗確率を q とすると、 $(i-1)$ 回連続でデータフレームの送信に失敗し i 回目で成功する確率は $q^{i-1}(1-q)$ である。また、最大フレーム再送回数を N とすると、データフレームの送信に N 回失敗すると、 $(N+1)$ 回目のデータフレームの送信が成功するかどうかにかかわらずそのデータフレームの送信は終了する。このとき、SCTP レベルにおいては SCTP

パケットが廃棄されたとして検出され、そのときの確率 p は $p = q^{N+1}$ によって計算できる。以上から、1つのデータフレームが i 回送信される確率は次式で得られる。

$$Q(i) = \begin{cases} q^{i-1}(1-q) & \text{if } i \leq N \\ q^N & \text{if } i = N+1 \end{cases} \quad (5)$$

1つのデータフレームが i 回送信されるときにかかる時間の合計は $\sum_{j=1}^i T^t(j)$ であるから、(3)式、(4)式および(5)式より $T^t(i)$ の期待値 $E[T^t]$ および $T^r(i)$ の期待値 $E[T^r]$ は次式で得られる。

$$E[T^t] = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^i T^t(j)Q(i), \quad E[T^r] = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^i T^r(j)Q(i) \quad (6)$$

なお、 T_{DATA}^{client} および T_{DATA}^{AP} の期待値は SCTP パケットの平均サイズに基づいて導出される。紙面の都合上、SCTP パケットの平均サイズの導出は省略する。

次に、1つのデータフレームを送受信するときに消費される電力量の期待値を求める。 $E[J^t]$ を1つのデータフレームを送信するときの消費電力量の期待値とし、 $E[J^r]$ を1つのデータフレームを受信するときの消費電力量の期待値とすると、(6)と同様に $E[J^t]$ および $E[J^r]$ は次式で計算できる。

$$E[J^t] = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^i J^t(j)Q(i), \quad E[J^r] = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^i J^r(j)Q(i) \quad (7)$$

なお、 $J^t(i)$ および $J^r(i)$ はそれぞれ i 回目のデータフレームの送受信にかかる消費電力量である。 $J^t(i)$ および $J^r(i)$ は次式によって求められる。

$$J^t(i) = P^l(3T_{SIFS} + T_{DIFS} + T^{BO}(i) + 4\tau) + P^t(T_{RTS} + T_{DATA}^{client}) + P^r(T_{CTS} + T_{ACK}) \quad (8)$$

$$J^r(i) = P^l(T_{SIFS} + T_{DIFS} + T^{BO}(i) + 2\tau) + P^t T_{ACK} + P^r T_{DATA}^{AP} \quad (9)$$

3.3 SCTP トンネリングの消費電力モデル

SCTP トンネリングでは、TCP と同じ輻輳制御機構が無線端末とアクセスポイントでそれぞれ独立して動作する。しかし、無線端末とアクセスポイントは同じ無線ネットワークを共有しているため、それらの輻輳回避機構の平均的な振舞いは同一であるとみなすことができる。また、SCTP 輻輳制御機構は、個々のストリームではなく1つのアソシエーション全体において適用される。そのため、輻輳制御機構の観点からは、複数のストリームが混在する SCTP アソシエーションを1本の TCP コネクションとみなすことができる。したがって、[12,13]において導出した単一の TCP フローに対する消費電力モデルを利用することによって、SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築できる。本節では、無線端末の WNI が消費する電力を導出する。

輻輳制御機構の挙動は初期スロースタートフェイズと輻輳回避フェイズの2つに分けられる。初期スロースタートフェイズの消費電力への影響は小さいため [12,13]、本報告においては初期スロースタートフェイズは無視する。輻輳回避フェイズはさらに Triple Duplicate (TD) 期間と Timeout (TO) 期間の2つに分割できる。TD 期間はパケット廃棄が発生してから、次に3つの重複 TCP-ACK パケットによってパケット廃棄が検出されるまでの期間であり、TO 期間は再送タイムアウト (RTO) が発生している期間である。先行研究 [12,13] より、無線端末の WNI における消費電力は次式で計算できる。

$$P = \frac{J^{TD} + Q(E[W])J^{TO}}{E[A] + Q(E[W])E[Z^{TO}]} \quad (10)$$

なお、 J^{TD} は TD 期間における消費電力量、 J^{TO} は TO 期

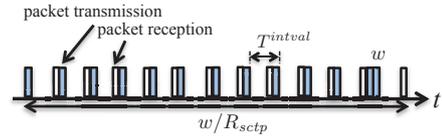


図4 無線端末の WNI において送受信される SCTP パケットの時系列

間における消費電力量、 $Q(w)$ は輻輳ウィンドウサイズが w であるときに RTO によってパケット廃棄が検出される確率、 $E[W]$ は輻輳ウィンドウサイズの期待値である。 $E[A]$ および $E[Z^{TO}]$ はそれぞれ TD 期間および TO 期間の長さである。 $Q(w)$ 、 $E[W]$ 、および $E[Z^{TO}]$ は [12,13] において導出されている。また、 J^{TD} および J^{TO} は次のように計算できる。

$$J^{TD} = E[Y]E[J^t] + (E[Y] - E[W]/2)E[J^r] - P^l E[N_{td}^s](T^{as} + T^{sa}) + P^l \{ E[A] - E[Y]E[T^t] - (E[N_{td}^s] - E[W]/2)E[T^r] - E[T_{td}^s] \} + P^s E[T_{td}^s] + E[N_{td}^s](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (11)$$

$$J^{TO} = E[X]E[J^t] + P^s (E[Z^{TO}] - E[X](E[T^r] + T^{as} + T^{sa})) + E[X](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (12)$$

なお、 $E[Y]$ は TD 期間において送信される SCTP パケット数の期待値、 $E[N_{td}^s]$ は TD 期間におけるアクティブ状態とスリープ状態間の遷移回数の期待値、 $E[T_{td}^s]$ は TD 期間における合計スリープ時間の期待値、 $E[X]$ は TO 期間の長さである。

TCP の場合においては、 $E[A]$ は TCP コネクションのラウンドトリップ時間 (RTT) に依存して決まる [12,13]。しかし、SCTP トンネリングにおいては、SCTP アソシエーションの RTT に関係なく、SCTP アソシエーションへの TCP パケットの到着率によって $E[A]$ が決定される。以降では、SCTP トンネリングにおける TCP パケットの到着率を求める。

n^{up} および n^{down} をそれぞれ上り TCP フロー数と下り TCP フロー数とし、 i 番目の上り TCP フローの平均スループットを r_i^{up} (byte/s)、 j 番目の下り TCP フローの平均スループットを r_j^{down} (byte/s) とする。ここで、TCP では delayed ACK を利用しないと仮定すると、1つの TCP コネクション内においては TCP-DATA パケット数および TCP-ACK パケット数は等しい。また、SCTP トンネリングでは1つの SCTP パケットには TCP パケットが1つ格納されることから、無線端末からアクセスポイントへ単位時間あたりに送信される SCTP パケットの数 R^{up} (packet/s) は次式で計算できる。

$$R^{up} = \sum_{i=1}^{n^{up}} \frac{r_i^{up}}{s_{data}^{tcp}} + \sum_{j=1}^{n^{down}} \frac{r_j^{down}}{s_{data}^{tcp}} \quad (13)$$

なお、 s_{data}^{tcp} は TCP-DATA パケットのサイズ (byte) である。同様に、アクセスポイントから無線端末が単位時間あたりに受信する SCTP パケットの数 R^{down} (packet/s) は次式により得られる。

$$R^{down} = \sum_{i=1}^{n^{up}} \frac{r_i^{up}}{s_{data}^{tcp}} + \sum_{j=1}^{n^{down}} \frac{r_j^{down}}{s_{data}^{tcp}} = R^{up} \quad (14)$$

以下、 R^{up} および R^{down} を単に R と表す。

次に、図4のような、無線端末の WNI において送受信される SCTP パケットの時系列を考える。図中の w および T^{intval} はそれぞれ SCTP 輻輳ウィンドウサイズと SCTP パケットの平均送信間隔を表す。 T^{intval} は、SCTP トンネリングの平均スループット R_{sctp} (packet/s) を用いて次のように計算できる。

$$T^{intval} = 1/R_{sctp} \quad (15)$$

R_{sctp} は、SCTP トンネリングによって達成できる最大スループット R_{max}^{sctp} (packet/s) および無線帯域 $B_{wireless}$ (packet/s)

表 1 IEEE 802.11a パラメータ

Name	Value	Name	Value
Data rate	54 Mbps	PLCP preamble	16 μ s
Slot time	9 μ s	MAC header	24 bytes
SIFS	16 μ s	LLC header	8 bytes
DIFS	34 μ s	CW_{min}	15

表 2 Atheros AR5004 の消費電力 [15]

P^t	P^r	P^l	P^s
1.4 W	0.9 W	0.8 W	0.016 W

を用いると, $R_{sctp} = \min(R, R_{sctp}^{max}, B_{wireless})$ で計算される. なお, R_{sctp}^{max} は $R_{sctp}^{max} = 1/(E[T^t] + E[T^r])$ であり, $B_{wireless}$ は $B_{wireless} = 1/(T^t(1) + T^r(1))$ である.

(15) 式および先行研究 [12,13] から, $E[A]$ は次式のように得られる.

$$E[A] = \left(\frac{1-p}{p} + \frac{3}{2}E[W] \right) T^{intval} \quad (16)$$

4. 数値解析

4.1 パラメータ設定

図 1 のような, IEEE 802.11a 無線 LAN 環境において, 無線端末と有線端末の間で複数の上下 TCP コネクションが確立されているとする. IEEE 802.11a の無線 LAN パラメータは表 1 のように設定した. τ を求めるため, 無線端末はアクセスポイントから 4 (m) の位置にあるとした. Atheros AR5004 チップを実装した WNI のデータシート [15] より, P^t , P^r , P^l , および P^s は表 2 のように設定した. また, [5] より, P^{sa} および P^{sa} はそれぞれ $P^{sa} = P^l$ および $P^{sa} = P^t$ とし, T^{sa} および T^{sa} には 1 μ s および 1 ms を設定した. TCP-DATA パケットサイズおよび TCP-ACK パケットのサイズはそれぞれ 1500 (bytes) および 40 (bytes) とした. また, 最大フレーム再送回数は $N = 7$ とした.

4.2 数値例

上り TCP フローのみが存在する場合の消費電力の変化を図 5 に示す. MAC レベルにおけるデータフレームの送信失敗確率 q は 0.1, 0.2, および 0.5 とした. 図中には Continuously Active Mode (CAM) を利用した場合の結果とバースト転送するパケット数 m を 1, 2, 5 としてスリープした場合の結果を示している. $m = 1$ はバースト転送を利用しないでスリープした場合であり, $m > 1$ は m 個のパケットをバースト転送してスリープした場合である. また, 横軸は TCP フローの合計スループットを表し, 1 本あたりの TCP フローの平均スループットは 150 KB/s とした. なお, 下り TCP フローのみが存在する場合, および, 上下 TCP フローが混在する場合においても, 図 5 と結果の傾向は変わらない. これは次の理由による. 上下 TCP フローの本数によって, 無線端末において送受信される SCTP パケットサイズは変化する. しかし, その違いがデータフレームの送受信時間に与える影響はバックオフ時間や制御フレームの送信時間などのオーバーヘッドにかかる時間と比べて十分小さい.

図 5 より, TCP フローの合計スループットが増加するにしたがって, CAM を利用したときの消費電力は増加することがわかる. これは, TCP フローの合計スループットが増加するにつれて, パケット送受信の時間が増えアイドル時間が減るためである. 一方スリープした場合においては, TCP フローの合計スループットが小さいとき, m の値に関係なく, 消費電力を大きく削減できていることがわかる. また, TCP フローの合計スループットが増加すると, スリープした場合の消費電力は増加するものの, m の値が大きいほどその上昇率が小さい.

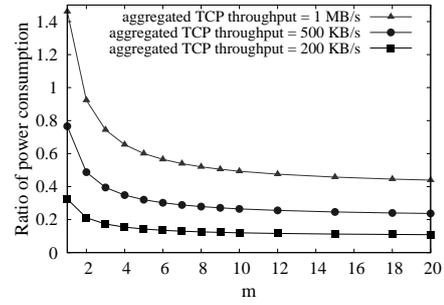


図 6 消費電力比 ($q = 0.1$)

例えば, 図 5(a) において合計スループットが 500 KB/s のとき, バースト転送を利用しない場合には CAM を利用した場合から約 27 % の消費電力を削減できている. 一方で, バースト転送 ($m = 5$) を利用した場合では約 69 % の消費電力を削減できている. これは, バースト転送によってアクティブ状態とスリープ状態間の遷移回数が削減され, スリープの効率が高まるためである.

また, 合計スループットがさらに大きくなると, スリープした場合の消費電力は CAM のときの消費電力を越え, 最終的には CAM の場合と同程度の消費電力に近づくことがわかる. これは, アイドル時間が少なくなることで, 状態遷移によって増加する消費電力よりスリープによって削減される消費電力の方が小さくなるためである. なお, この状況は, アイドル時間が十分でないときにはスリープしないことによって避けることができる.

図 5(a), 図 5(b), および図 5(c) を比較すると, CAM を利用したときの消費電力に対して, q の増加による影響は小さいことがわかる. これは, q が増えることによってデータフレームの再送が増えるものの, それによる消費電力の増加よりも, バックオフ時間や制御フレームの送信時間などのオーバーヘッドによる消費電力の方が寄与が大きいためである. 一方で, スリープした場合においては, q が大きくなるにつれて, m が大きいほど消費電力の増加が大きくなっていることがわかる. これは, m が大きいほどスリープ時間が全体に占める割合が大きく, q が大きくなることでそのスリープ時間が減るためである.

以上のように, m を大きくするほど, バースト転送を利用してスリープすることで大きく消費電力を削減できる. しかし, SCTP パケットのバースト転送を行うためには, 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まで, パケット送信を待たせる必要がある. これは, SCTP トンネリングを利用することによって, 各 TCP パケットに対してバッファリング遅延が生じることを意味する. ここで, 単位時間あたりに送信される SCTP パケット数 R を用いると, SCTP トンネリングにおける平均バッファリング遅延は次のように計算できる.

$$D = \frac{m-1}{2} \frac{1}{R} \quad (17)$$

図 6 および図 7 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とがわかる. 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

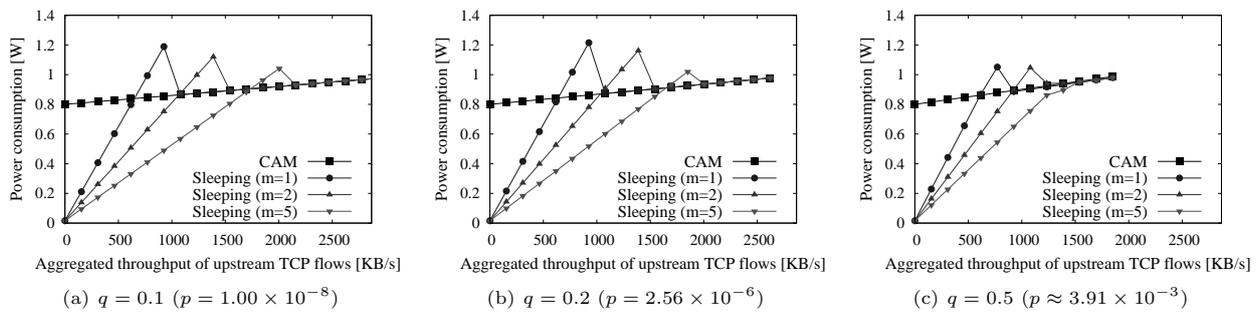


図5 上り TCP フローの合計スループットに対する消費電力の変化

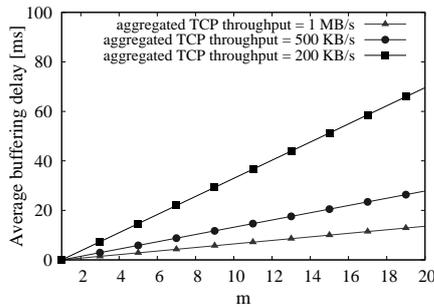


図7 平均バッファリング遅延 ($q = 0.1$)

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ことわかる。例えば、ユーザあるいはアプリケーションが 5 ms 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 200 KB/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 1 MB/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による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。

5. おわりに

本報告においては、無線 LAN 環境における TCP データ転送を省電力化する SCTP トンネリングを提案した。SCTP マルチストリーミングを利用して複数の TCP フローを一つの SCTP アソシエーションに集約する。さらに、集約した TCP パケットをバースト転送することで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。また本報告では、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。

今後課題としては、PSM や APSD のような MAC レベルの省電力モードを利用して、SCTP トンネリングを無線端末やアクセスポイントに実装し、性能評価を行うことが挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、NICT「新世代ネットワークを支えるネットワーク仮想化基盤技術の研究開発(課題ウ)」, および日本学術振興会「特別研究員奨励費(24-2395)」の支援による。

文 献

- [1] Atheros Communications, "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," in *Proceedings of ISLPED 2004*, pp. 363–368, 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*, vol. 2, pp. 755–759, Jan. 2005.
- [4] IEEE 802.11-2007, *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. IEEE, June 2007.
- [5] R. Krashinsky and H. Balakrishnan, "Minimizing energy for wireless web access with bounded slowdown," *Wireless Networks*, vol. 11, pp. 135–148, Jan. 2005.
- [6] D. C. Mur, X. Pérez-Costa, and S. S. Ribes, "An adaptive solution for wireless LAN distributed power saving modes," *Computer Networks*, vol. 53, pp. 3011–3030, Dec. 2009.
- [7] Y. He and R. Yuan, "A novel scheduled power saving mechanism for 802.11 wireless LANs," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 8, pp. 1368–1383, Oct. 2009.
- [8] 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, pp. 1575–1590, Nov. 2006.
- [9] V. Namboodiri and L. Gao, "Energy-efficient VoIP over wireless LANs," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, pp. 566–581, Apr. 2010.
- [10] F. R. Dogar, P. Steenkiste, and K. Papagiannaki, "Catnap: Exploiting high bandwidth wireless interfaces to save energy for mobile devices," in *Proceedings of MobiSys 2010*, pp. 107–122, June 2010.
- [11] R. Stewart, "Stream control transmission protocol," *Request for Comments 4960*, Sept. 2007.
- [12] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Modeling and analysis of power consumption in TCP data transmission over a wireless LAN environment," in *Proceedings of GreenComm 2011*, June 2011.
- [13] M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Energy efficiency analysis of TCP with burst transmission over a wireless LAN," in *Proceedings of ISCIT 2011*, Oct. 2011.
- [14] R. Braden, "Requirements for internet hosts – communication layers," *Request for comments 1122*, Oct. 1989.
- [15] Wistron NeWeb Corp., "CM9: WLAN 802.11 a/b/g mini-PCI Module." available at <http://site.microcom.us/CM9.pdf>.