

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た。無線端末は通常バッテリー駆動が想定されるため、消費電力の削減は重要な課題のひとつである。従来、MAC層や物理層においては消費電力の削減に向けた検討が多数行われている。しかし、パケットの送受信タイミングはアプリケーションおよびトランスポート層プロトコルによって決定されるため、効率的な省電力化を行うには、トランスポート層プロトコルの挙動を考慮することが重要である。そこで本稿では、TCPの動作を考慮した、無線端末による上りデータ転送における消費電力モデルを提案する。さらに、提案モデルを用いて、理想的にスリープした場合とそうでない場合における消費電力を比較することで、TCPを考慮した場合における無線通信の消費電力削減に効果的な要素を明らかにする。また、省電力効果とネットワーク性能間のトレードオフについて議論する。

キーワード 無線 LAN, 消費電力, TCP, 解析モデル

Analysis of Power Consumption in TCP Data Transmission 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 Reduction of power consumption is one of an important issue in wireless communications because most mobile devices are battery-driven. For effective power saving, it is important to understand the behaviors of the transport layer protocols used by upper-layer applications, since packet transmission and reception timing are mainly determined by those behaviors. In this report, we propose a power consumption model based on a treatment of detailed TCP behaviors within a WLAN environment. Comparing the model with and without ideal sleeping, we analyze the power consumption of a single wireless client as it sends data to a wired host by TCP. From the numerical results of our analysis, we show the lower-bound for power consumption in upstream TCP data transfer with ideal sleeping. We also discuss the trade-off between power saving and network performance in TCP data transfer.

Key words Wireless LAN, power consumption, TCP, analytical model

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

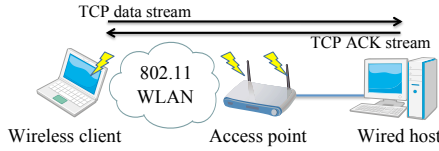


図1 無線 LAN 環境

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。

無線 LAN における無線端末の消費電力解析は、これまでも多数行われている [9–11]。[9] においては、複数の無線端末が存在している場合において、PSM で動作している単一の無線端末が、有線サーバからファイルをダウンロードするときに消費される電力をモデル化している。[10] においては、送信や受信などの各通信状態において消費される電力を分類し、それらが全体に占める割合が解析的に求められている。その結果、著者らは無線 LAN において消費される電力のうち約 80% が無駄な通信で消費されていることを明らかにしている。[11] においては、CAM あるいは PSM で動作している無線端末が TCP データ転送を行っている場合に消費される電力をモデル化している。これらの研究においては、主に MAC レベルにおける挙動に注目している。しかし、上位層プロトコルである TCP の挙動が主にパケット送受信タイミングを決定しているにもかかわらず、TCP の詳細な挙動については考慮されていない。

そこで本報告では、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手法を提案する。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する。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する。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する。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求める。数値解析の結果から、パケットの送受信がない区間において理想的にスリープした場合とそうでない場合を比較することで、消費電力を削減するうえで効果的な要因を明らかにする。さらに、TCP データ転送時の省電力とネットワーク性能間のトレードオフについて言及する。

以下、2. 章においては TCP の動作を考慮した消費電力モデルについて説明する。3. 章においてはそのモデルに基づいた数値解析の結果を示し、4. 章において結論および今後の課題について述べる。

2. 消費電力モデル

2.1 ネットワークモデルおよび仮定

消費電力モデルを構築するにあたり想定するネットワークを図 1 に示す。1 台の無線端末がアクセスポイント (AP) に接続しており、AP は有線ネットワークを介して有線ホストに接続している。このネットワークにおいて、無線端末は S_d サイズのファイルを TCP を利用して有線ホストに対して転送することを仮定する。このとき、無線端末が最初の TCP セグメントを送信してから、最後に送信した TCP セグメントに対する ACK セグメントを受信するまでに消費した電力をモデル化する。その他の仮定は以下の通りである。

- 無線端末から AP に対するフレーム送信には RTS/CTS を利用し、AP から無線端末へのフレーム送信には RTS/CTS を利用しない。
- 無線 LAN 内においてはフレーム衝突が発生せず、MAC

レベルにおいてはフレームが損失しない。

- 有線ネットワーク部分において、データセグメント廃棄イベントが確率 p で発生する。ACK セグメントの廃棄は発生しない。

- データセグメントの再送は考慮しない。
- TCP の fast recovery は考慮しない。
- Delayed ACK は無効とする。
- 特に断わらない限りは、[12, 13] における仮定をそのまま適用する。

2.2 IEEE 802.11 MAC に基づく消費電力モデル

本節においては、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^l 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。

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

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

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。

2.3 CAM で動作した場合における TCP データ転送の消費電力モデル

本節においては、無線端末が CAM で動作している場合の消費電力モデルを構築する。[13] と同様に、全データ転送を初期スロースタートフェーズと定常フェーズの 2 つに分割し、それぞれのフェーズにおいて消費される電力を求める。ここで、初期スロースタートフェーズにおいて消費される電力の期待値を J^{ss} 、定常フェーズにおいて消費される電力の期待値を J^{ca} とすると、全データ転送において消費される電力の期待値を以下のように求めることができる。

$$J = J^{ss} + J^{ca} \quad (3)$$

2.3.1 初期スロースタートフェーズ

J^{ss} を導出するために初期スロースタートフェーズをさらに二つの区間に分割する。ひとつはデータセグメントの損失が発生するまでのデータ転送区間であり、もうひとつはセグメントの損失が発生した後のデータ転送区間である。前者の区間において消費される電力の期待値を J_{data}^{ss} 、後者の区間において消費される電力の期待値を J_{loss}^{ss} とする。つまり、 $J^{ss} = J_{data}^{ss} + J_{loss}^{ss}$ である。

まず J_{data}^{ss} を決定する。全体の時間から全データセグメントの送信時間と全 ACK セグメントの受信時間を引いた時間がアイドル時間となる。したがって、CAM で動作した場合の J_{data}^{ss} は次のように計算できる。

$$J_{data}^{ss} = E[S_d^{ss}] (J^t + J^r) + P^l \{ E[T^{ss}] - E[S_d^{ss}] (T^t + T^r) \} \quad (4)$$

なお、 T^t は無線端末が 1 つのデータフレームを送信するのにかかる時間、 T^r は無線端末が 1 つのデータフレームを受信するのにかかる時間、 $E[S_d^{ss}]$ は初期スロースタートフェーズにおいて送信されるセグメント数の期待値、 $E[T^{ss}]$ は初期スロースタートフェーズの合計時間の期待値を表す。 $E[S_d^{ss}]$ および $E[T^{ss}]$ は [13] において導出されている。

次に J_{loss}^{ss} を求める。TCP がパケット廃棄を検出する方法として、3 つの重複 ACK による検出と再送タイムアウト (RTO) の発生による検出の二通りある。それぞれによって送信されるデータセグメント数が異なるため、それぞれにおいて消費される電力量が異なる。そのため、重複 ACK によってパケット廃棄を検出した場合の消費電力の期待値を J_{TD}^{loss} とし、RTO の発生によってパケット廃棄が検出された場合の消費電力の期待値を

J_{TO}^{loss} とすると, J_{loss}^{ss} は J_{TD}^{ss} と J_{TO}^{loss} を組合せることで表すことができる. ここで, スロースタートフェーズが少なくとも1つのデータセグメントが廃棄される確率を l^{ss} とすると, [13] より $l^{ss} = 1 - (1-p)^{S_d}$ となる. さらに, 輻輳ウィンドウサイズを w とすると, [12] においてはパケット廃棄の検出が RTO の発生によって検出される確率 $Q(w)$ が導出されている. l^{ss} および $Q(w)$ を用いることにより, J_{loss}^{ss} は次のように求めることができる.

$$J_{loss}^{ss} = l^{ss} \{Q(E[W_{ss}])J_{TO}^{loss} + (1 - Q(E[W_{ss}]))J_{TD}^{loss}\} \quad (5)$$

なお, $E[W^{ss}]$ は $E[S_d^{ss}]$ 個のデータセグメントを送信したときの輻輳ウィンドウサイズであり, [13] において導出されている. また, [13] とは異なり, $E[W^{ss}]$ は無線帯域によって制限される.

3つの重複 ACK によってパケット廃棄が検出される場合, パケット廃棄が発生してからパケット廃棄を検出するまでに約1 RTT 必要となる. そのため, [13] においてはパケット廃棄の検出時間を単純に1 RTT としている. しかし, [13] においては ACK セグメントの受信時間は考慮されていない. 消費電力の観点からは無視できないため, その部分の時間を考慮する必要がある. それを考慮することによって, CAM で動作した場合の J_{TD}^{loss} は以下のように計算できる.

$$J_{TD}^{loss} = P^l RTT \cdot (2E[W^{ss}] - 1) / E[W^{ss}] \quad (6)$$

一方で, CAM で動作した場合の J_{TO}^{loss} は以下のように導出できる. [12] においては, RTO 期間の期待値 $E[Z^{TO}]$ およびその期間で送信されるデータセグメント数の期待値 $E[R]$ が導出されている. $E[Z^{TO}]$ および $E[R]$ を用いて, J_{TO}^{loss} は以下のように計算できる.

$$J_{TO}^{loss} = E[R]J^t + P^l (E[Z^{TO}] - E[R]T^t) \quad (7)$$

2.3.2 定常フェーズ

[12] においては, Triple Duplicate (TD) 期間と Timeout (TO) 期間の2つに分けることで, 定常フェーズにおける TCP の振舞いを解析している. 具体的には, TD 期間は3つの重複 ACK によってパケット廃棄が検出されてから再びパケット廃棄を検出するまでの期間を表し, TO 期間は RTO が発生している期間を表す. 通常複数の TD 期間の後に TO 期間が1回発生する. それを1つのサイクルと考えることによって, J^{ca} を算出する.

$E[M]$ を1サイクルにおいて転送されるデータセグメント数の期待値とすると, [12] においては次のように導出されている.

$$E[M] = E[n] \cdot E[Y] + E[R] \quad (8)$$

なお, $E[n]$ は1サイクルにおける TD 期間数の期待値であり, $E[Y]$ は TD 期間において送信されるデータセグメント数の期待値である. $E[Y]$ は [12] において導出されている.

(8) 式と同様に構成することによって, 1サイクルにおける消費電力の期待値 J^{cycle} は次のように計算できる.

$$J^{cycle} = E[n] \cdot J^{TD} + J^{TO} \quad (9)$$

なお, J^{TD} は TD 期間における消費電力の期待値であり, J^{TO} は TO 期間における消費電力の期待値である.

データセグメントサイズを S_p とすると, 定常フェーズにおいて送信されるセグメント数は $S_d/S_p - E[S_d^{ss}]$ となるから, それを $E[M]$ で割ることによって定常フェーズにおけるサイクル数を計算できる. [12] によると $E[n]$ は $1/Q(w)$ となるため, (8) 式と (9) 式を用いて, J^{ca} は以下のように計算できる.

$$J^{ca} = (S_d/S_p - S_d^{ss}) \frac{J^{TD} + Q(E[W]) \cdot J^{TO}}{E[Y] + Q(E[W])E[R]} \quad (10)$$

なお, $E[W]$ は TD 期間において最初にセグメントが廃棄されたときのウィンドウサイズの期待値を表す. $E[W^{ss}]$ の場合と同様に, $E[W]$ は無線帯域によって制限される.

まず, J^{TD} を導出する. [12] によると, 1つの TD 期間においては, 無線端末は $E[Y]$ 個のデータセグメントを送信し, $(E[Y] - (E[W] - E[\beta]))$ 個の ACK セグメントを受信する. なお, $E[\beta]$ は TD 期間においてパケット廃棄を検出された後に送信されるデータセグメント数の期待値である. したがって, CAM で動作したときの J^{TD} は以下のように決定できる.

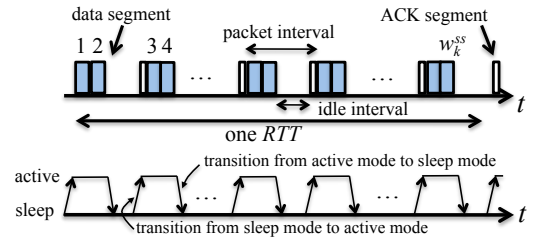


図2 スロースタートフェーズの k 番目のラウンドにおけるパケットシーケンス

$$J^{TD} = E[Y]J^t + (E[Y] - E[W] + E[\beta])J^r + P^l \{E[A] - E[Y]T^t - (E[Y] - E[W] + E[\beta])T^r\} \quad (11)$$

なお, $E[A]$ は TD 期間における合計時間の期待値を表す.

さらに [12] においては, $E[A]$ は $(E[W]/2 + 1)RTT$ のように導出されている. しかし, [13] と同様に, TD 期間の最後のウィンドウ分のデータセグメントの転送において, 送信される2番目のデータセグメントから最後に送信されるデータセグメントに対する ACK セグメントを受信するまでの時間が考慮されていない. したがって, それを考慮すると, $E[A]$ は以下のように決定できる.

$$E[A] = (E[W]/2 + (2E[W] - 2)/(E[W]))RTT \quad (12)$$

一方で, CAM で動作した場合における J^{TO} は (7) 式と同様に以下のように導出できる.

$$J^{TO} = E[R]J^t + P^l (E[Z^{TO}] - E[R]T^r) \quad (13)$$

2.4 理想的なスリープをした場合における TCP データ転送の消費電力モデル

本節においては, 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, ラウンドという概念を導入することにより, 理想的なスリープをした場合の消費電力を導出する. 1ラウンドとは, 1ウィンドウ内において最初のデータセグメントの送信から対応する ACK セグメントの受信までとする.

2.4.1 初期スロースタートフェーズ

まず, 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.

$$2RTT/w_k^{ss} - (2T^t + T^r) > T^{as} + T^{sa} \quad (14)$$

$E[T_{ss}^s]$ 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. (14) 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 $E[W^{ss}]$ 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, (14) 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.

$$W_{ss}^{max} = \lfloor 2RTT/(2T^t + T^r + T^{as} + T^{sa}) \rfloor \quad (15)$$

w_k^{ss} は $2^{k-1}w_1$ となるため, (15) 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.

$$r_{ss} = \lfloor \log_2(W_{ss}^{max}/w_1) + 1 \rfloor \quad (16)$$

上述の導出から, 最終的に r_{ss} は次のように決定できる.

$$r_{ss} = \min \{ \lfloor \log_2(W_{ss}^{max}/w_1) + 1 \rfloor, \log_2(E[S_d^{ss}]/w_1 + 1) \} \quad (17)$$

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.

$$E[N_{ss}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ss} < 1 \\ 1 + w_1(2^{r_{ss}-1} - 1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

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.

$$E[T_{ss}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{ss} < 1 \\ RTT - w_1T^t - T^r & \text{if } r_{ss} = 1 \\ r_{ss} \cdot RTT - w_1T^t(2^{r_{ss}-1} - 1) - w_1T^r(2^{r_{ss}-1} - 1) - E[N_{ss}^s](T^{as} + T^{sa}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

(4) 式, (18) 式および (19) 式を用いて, 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.

$$J_{data}^{ss} = E[S_d^{ss}](J^t + J^r) + P^s E[T_{ss}^s] + E[N_{ss}^s](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) + P^l \{ E[T_{ss}^s] - E[S_d^{ss}](T^t + T^r) - E[T_{ss}^s] - E[N_{ss}^s](T^{as} + T^{sa}) \} \quad (20)$$

以下では, 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. 3 つの重複 ACK によってパケット廃棄を検出した場合において, すべてのアイドル間隔でスリープできるか否かは, すべてのアイドル間隔が (14) 式を満たすか否かによって決定される. したがって, k 番目のラウンドのアイドル間隔が (14) 式を満たすときに, すべてのアイドル間隔でスリープすることができる. このときのスリープ状態への遷移回数は $E[W^{ss}] - 1$ となる. また, k 番目のラウンドのアイドル間隔が (14) 式を満たさない場合においては, 無線 NIC はスリープできない. 以上より, 理想的にスリープした場合の J_{TD}^{loss} は以下のように計算できる.

$$J_{TD}^{loss} = \begin{cases} P^s \left\{ \frac{2E[W^{ss}]-1}{E[W^{ss}]} RTT - (E[W^{ss}]-1)(T^{as} + T^{sa}) \right\} + (E[W^{ss}]-1)(P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) & \text{if } 2RTT/E[W^{ss}] - (2T^t + T^r) > T^{as} + T^{sa} \\ P^l \frac{2E[W^{ss}]-1}{E[W^{ss}]} RTT & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

RTO の発生によってパケット廃棄を検出した場合においては, 通常 RTO 期間は 1 RTT より長い場合, RTO 期間内は常にスリープが可能である. したがって, 理想的にスリープした場合の J_{TO}^{loss} は次のように計算できる.

$$J_{TO}^{loss} = E[R]J^t + P^s (E[Z^{TO}] - E[R](T^t + T^{as} + T^{sa})) + E[R](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (22)$$

2.4.2 定常フェーズ

次に定常フェーズにおける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における (10) 式の J^{TD} および J^{TO} を導出する.

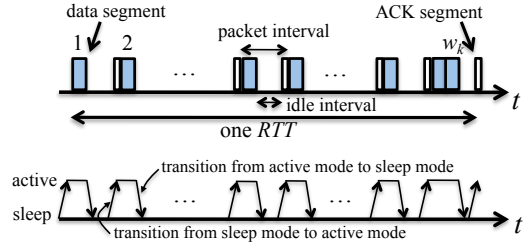


図3 TD期間の k 番目のラウンドにおけるパケットシーケンス

TD 期間においては, 図3のようにパケットの送受信が行われる. TD 期間においては, 1 ウィンドウ中のすべての ACK セグメントを受信したときにウィンドウサイズが 1 増加する. したがって, TD 期間の k 番目のラウンドにおけるウィンドウサイズを w_k とすると, k 番目のラウンドにおけるパケット間隔の総数は $w_k - 1$ となる. 1 RTT 中に受信される ACK セグメントの間隔が等間隔であると仮定すると, k 番目のラウンドにおけるアイドル間隔でスリープするためには, 次の条件を満たす必要がある.

$$RTT/(w_k - 1) - (T^t + T^r) > T^{as} + T^{sa} \quad (23)$$

しかし, $(w_k - 1)$ 個目のデータセグメントに対する ACK セグメントを受信したとき, 2 つのデータセグメントが連続で送信される. そのため, k 番目のラウンドにおける最後のアイドル間隔は $RTT/(w_k - 1) - 2T^t - T^r$ となる. したがって, k 番目のラウンドにおけるすべてのアイドル間隔でスリープするためには以下の条件を満たす必要がある.

$$RTT/(w_k - 1) - (2T^t + T^r) > T^{as} + T^{sa} \quad (24)$$

2.4.1 節と同様に, すべてのアイドル間隔が (23) 式を満たす最大のラウンド番号 r_{td} を考える. TD 期間のすべてのアイドル間隔が (23) 式を満たすとき, r_{td} 番目のラウンドにおけるウィンドウサイズは $w_{r_{td}} = E[W]$ となる. [12] によると, このときのラウンド数は $E[W]/2$ のように導出されている. つまり, $r_{ss} = E[W]/2$ となる. また, それ以外の場合では, 以下のように r_{ss} を決定できる. W_{td}^{max} をスリープできる最大ウィンドウサイズとすると, 次のように計算できる.

$$W_{td}^{max} = \lfloor RTT/(T^t + T^r + T^{as} + T^{sa}) \rfloor + 1 \quad (25)$$

$w_k = E[W]/2 + k - 1$ であるので, (25) 式から, $w_k = W_{td}^{max}$ となるような r_{td} は以下のように求められる.

$$r_{td} = W_{td}^{max} - E[W]/2 + 1 \quad (26)$$

以上の導出から, 最終的に r_{td} は以下ようになる.

$$r_{td} = \min (W_{td}^{max} - E[W]/2 + 1, E[W]/2) \quad (27)$$

なお, $r_{td} < 1$ であるときは TD 期間においてスリープできないことを意味する.

しかし, (27) 式の r_{td} は最後のアイドル間隔においてスリープできない場合を考慮していない. そのため, 最後のアイドル間隔においてスリープできないラウンド数の合計 N_{last} を求める. W_{last}^{max} を最後のアイドル間隔においてスリープできる最大のウィンドウサイズとすると, W_{last}^{max} は以下のように計算できる.

$$W_{last}^{max} = \lfloor RTT/(2T^t + T^r + T^{as} + T^{sa}) \rfloor + 1 \quad (28)$$

(28) 式を用いることにより, N_{last} は以下のように計算できる.

$$N_{last} = \max (E[W] - W_{last}^{max}, 0) \quad (29)$$

以上の検討を踏まえて, TD 期間におけるスリープ状態への遷移回数の期待値 $E[N_{td}^s]$ を導出する. TCP は最初のラウンドにおいて $E[W]/2$ 個のデータセグメントを送信する. 各ラウンドにおいてデータセグメントは等間隔で送信されると仮定すると, 最初のラウンドにおけるパケット間隔の数は $E[W]/2$ となる. k 番目のラウンドにおいては, パケット間隔の数は $w_k - 1$ となる. そのため, (27) 式および (29) 式から, $r_{td} > 1$ であるときの $E[N_{td}^s]$ は以下のように計算できる.

$$E[N_{td}^s] = \frac{r_{td}}{2} (E[W] + r_{td} - 3) + 1 - N_{last} \quad (30)$$

表1 無線LANパラメータ

項目	値	項目	値
データレート	54 Mbps	PLCP プリアンブル	16 μ s
Slot time	9 μ s	MAC ヘッダ	24 バイト
SIFS	16 μ s	LLC ヘッダ	8 バイト
DIFS	34 μ s	CW_{min}	15

ここで、ウィンドウサイズが $E[W]$ であるときに全てのアイドル間隔でスリープできる場合には、さらに $r_{td} + 1$ 番目のラウンドの全てのアイドル間隔においてもスリープできる。なお、このとき、 $r_{td} = E[W]/2$ である。そのため、無線NICはさらに $2E[\beta]$ 回スリープすることができる。したがって、 $E[N^s]$ は最終的に以下のように求めることができる。

$$E[N_{td}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{td} < 1 \\ 1 & \text{if } r_{td} = 1 \\ \frac{r_{td}}{2} (E[W] + r_{td} - 3) - 1 + E[W] & \text{if } r_{td} = \frac{E[W]}{2} \\ \frac{r_{td}}{2} (E[W] + r_{td} - 3) + 1 - N_{last} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (31)$$

次に TD 期間における合計スリープ時間の期待値 $E[T_{td}^s]$ を導出する。最初のラウンドにおいては 1 RTT の間に、 $E[W]/2$ 個のデータセグメントが送信され、1 つの ACK セグメントが受信される。そのため、このときのアイドル間隔は $RTT - E[W]T^t/2 - T^r$ となる。 k 番目のラウンドにおいては、TCP は w_k 個のデータセグメントが送信され、 $w_k - 1$ 個の ACK セグメントが受信される。そのため、このときのアイドル間隔の合計は $RTT - w_k T^t - (w_k - 1)T^r$ となる。以上から、 $r_{td} > 1$ の場合の $E[T_{td}^s]$ は以下のように決定できる。

$$E[T_{td}^s] = r_{td} RTT - \frac{r_{td}}{2} (E[W] + r_{td} - 1)T^t - E[N_{td}^s](T^{sa} + T^{as}) - \frac{1}{2}((r_{td} - 1)E[W] + r_{td}(r_{td} - 3) + 4)T^r \quad (32)$$

また、 $r_{td} = E[W]/2$ であるときは全てのアイドル間隔においてスリープ可能であり、 $r_{td} = 1$ であるときは $E[T_{td}^s] = RTT - E[W]T^t/2 - T^r$ である。したがって、 $E[T_{td}^s]$ は最終的に以下のように計算できる。

$$E[T_{td}^s] = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{td} < 1 \\ RTT - E[W]T^t/2 - T^r & \text{if } r_{td} = 1 \\ E[A] - E[Y]T^t - (E[Y] - E[W]/2)T^r - E[N_{td}^s](T^{as} + T^{sa}) & \text{if } r_{td} = E[W]/2 \\ r_{td} RTT - \frac{r_{td}}{2} (E[W] + r_{td} - 1)T^t - E[N_{td}^s](T^{sa} + T^{as}) - \frac{1}{2}((r_{td} - 1)E[W] + r_{td}(r_{td} - 3) + 4)T^r & \text{otherwise} \end{cases} \quad (33)$$

(31) 式および (33) 式を用いると、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。

$$J^{TD} = E[Y]J^t + (E[Y] - E[W]/2)J^r - P^l E[N_{td}^s](T^{as} + T^{sa}) + P^l \{ E[A] - E[Y]T^t - (E[Y] - E[W]/2)T^r - E[T_{td}^s] \} + P^s E[T_{td}^s] + E[N_{td}^s](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (34)$$

一方で、(22) 式と同様に、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。

$$J^{TO} = E[R]J^t + P^s (E[Z^{TO}] - E[R](T^r + T^{as} + T^{sa})) + E[R](P^{as}T^{as} + P^{sa}T^{sa}) \quad (35)$$

3. 数値解析

3.1 パラメータ設定および評価指標

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する。無線LAN規格にはIEEE 802.11aを想定し、無線LANに関するパラメータは表1のものを利用した。(1)式および(2)式内の伝搬遅延 τ を決定するため、無線端末はAPから4m離れて設置していると仮定した。また、無線LANにおいてフレームが損失しないと仮定しているため、バックオフ時間の期待値は $T_{backoff} = CW_{min}/2$ となる。

Atheros AR5004チップのデータシート[4]より、 P^t 、 P^r 、 P^l および P^s はそれぞれ1.4W、0.9W、0.8Wおよび0.016Wとした。また、[6]にしたがい、 $P^{as} = P^l$ および $P^{sa} = P^t$ とし、[14]を参考に、 T^{as} および T^{sa} はそれぞれ1msとした。TCPデータセグメントサイズは1500バイトとし、TCP ACKセグメントサイズは40バイトとした。

3.2節においては、省電力効果および省電力とTCP性能間のトレードオフの2つの観点からスリープ制御の性能評価を行う。具体的には、2.3節および2.4節において構築した消費電力モデルを利用して評価する。

また、消費電力と全てのデータを転送するまでの時間の関係に注目する。全データを転送するのにかかる時間を L とすると、 L は以下のように計算できる。

$$L = (S_d/S_p - E[S_d^{ss}]) \frac{E[A] + Q(E[W])E[Z^{TO}]}{E[Y] + Q(E[W])E[R]} \quad (36)$$

なお、100MBのデータを転送する場合においては、データ転送の大部分を定常フェーズが占めるため、ここでは初期スロースタートフェーズは無視する。2.4節において構築した消費電力モデルでは遅延が増加しないように理想的なスリープができていた。しかし、実際の環境においては、ネットワークの状態やTCPの動作に影響を受けるため、TCPセグメントの送受信タイミングを推定するのは困難である。送受信タイミングの推定誤りが生じた場合にはスリープ状態からアクティブ状態への遷移が遅れるため、その分だけTCPセグメントの送受信タイミングが遅れる。その結果、データ転送時間が増加する。そこで、スリープによる遅延の増加を避けるため、アイドル間隔が十分大きい場合にスリープするような戦略をとると考え、2.4節のモデルを修正する。具体的には、(25)式および(28)式をそれぞれ以下のように修正する。ここで、 δ はマージンの大きさである。

$$W_{td}^{max} = \left[RTT/(T^t + T^r + T^{as} + T^{sa} + \delta) \right] + 1 \quad (37)$$

$$W_{last}^{max} = \left[RTT/(2T^t + T^r + T^{as} + T^{sa} + \delta) \right] + 1 \quad (38)$$

最悪の場合を考えるため、 δ だけ余裕をもってスリープ状態からアクティブ状態に遷移したにもかかわらず、常にその前にACKセグメントが受信され、それに続くパケット送受信のタイミングが遅れる状況を想定する。このとき、1回のスリープによってパケットの送受信タイミングが遅れることで増加する遅延を $T^{sa}(1 - \gamma)$ とする。なお、 γ は増加する遅延を調節するパラメータであり、 $0 \leq \gamma \leq 1$ である。ここで、 N_{total}^s をスリープ状態への遷移回数合計とすると、2.4節と同様に計算すると、 N_{total}^s は次のように計算できる。

$$N_{total}^s = (S_d/S_p - E[S_d^{ss}]) \frac{E[N_{td}^s] + Q(E[W])E[R]}{E[Y] + Q(E[W])E[R]} \quad (39)$$

(39)式を用いると、スリープによって増加する遅延の合計は $N_{total}^s T^{sa}(1 - \gamma)$ となる。したがって、全データ転送における L^s は次のように計算できる。

$$L^s = L + N_{total}^s T^{sa}(1 - \gamma) \quad (40)$$

3.2 解析結果

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4に、消費電力比を図5に示す。図4および図5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4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減少するためである。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考えられる。 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。

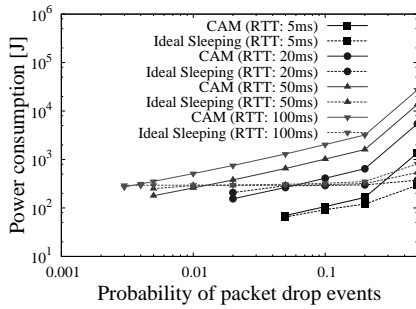


図4 消費電力

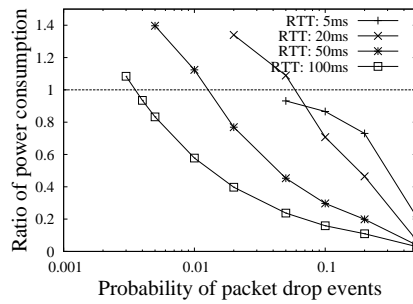


図5 消費電力比

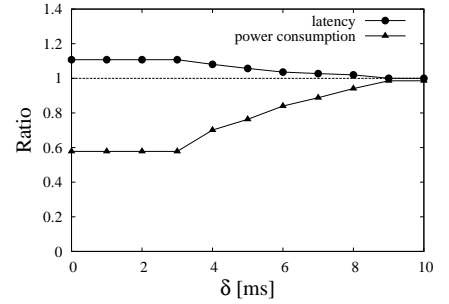


図6 省電力効果と転送時間のトレードオフ

また、CAMで動作した場合においては、RTTにかかわらず p が減少するにつれて消費電力が大きく減少している。一方で、理想的にスリープした場合には、 $RTT = 5 \text{ ms}$ の場合を除いて、 $p < 0.2$ であるときに消費電力がほとんど減少しないことがわかる。これはスリープ状態における消費電力は相対的に小さいため、データ転送時間の短縮による省電力効果が小さいためである。 $RTT > 5 \text{ ms}$ であるときは、CAMで動作した場合と同様に理想的なスリープをした場合でも p が小さくなるにつれて消費電力が小さくなっている。これは以下の理由によると思われる。輻射ウィンドウサイズが大きくなるにつれてパケット間隔が小さくなるため、理想的にスリープした場合には、 p が小さくなるにつれて (23) 式および (24) 式を満たすアイドル間隔の数が減少する。そのため、スリープできるアイドル間隔の数が減少するため、スリープ状態への遷移回数が少なくなる。したがって、スリープ状態への遷移回数の減少による消費電力の減少と、アイドル間隔でスリープしないことによる消費電力の増加が起こる。このとき、後者より前者の方が大きかったため、最終的に理想的なスリープをした場合の消費電力が低下したと考えられる。

図5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がわかる。例えば、 $p = 0.01$ および $RTT = 100 \text{ ms}$ 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6に、 $p = 0.01$ および $RTT = 100 \text{ ms}$ であるときの消費電力比と転送時間の比を示す。なお、理想的なスリープをした場合の消費電力は (37) 式および (38) 式を利用して計算し、転送時間の比の計算には (36) 式および (40) 式を利用した。また、(40) 式の γ は0とした。 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6から、 $\delta \leq 3 \text{ ms}$ 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、 $\delta \geq 9 \text{ ms}$ 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。

4. おわりに

本報告では、無線LAN環境においてTCPデータ転送を行った場合における消費電力モデルを示した。また、構築した消費電力モデルを利用して、有線ホストに対してTCPデータ転送を行う、単一の無線端末において消費される電力を解析した。数

値解析の結果から、長いスリープ時間を維持したままスリープ状態への遷移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。

今後の予定として、消費電力モデルをマルチMACやマルチパス環境を想定したモデルに拡張したい。また、今回の結果を踏まえたTCP転送方式を考案したい。

5. 謝辞

本研究の一部は、独立行政法人情報通信研究機構「新世代ネットワーク技術戦略の実現に向けた萌芽的研究」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*, 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] Wistron NeWeb Corp., "CM9: WLAN 802.11 a/b/g mini-PCI Module." available at <http://site.microcom.us/CM9.pdf>.
- [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*, pp. 146–159, June 2008.
- [8] IEEE 802.11-2007, Part 11: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications*. IEEE, June 2007.
- [9] G. Anastasi, M. Conti, E. Gregori, and A. Passarella, "Saving energy in Wi-Fi hotspots through 802.11 psm: an analytical model," in *Proceedings of WiOpt 2004*, pp. 24–26, Mar. 2004.
- [10] M. Ergen and P. Varaiya, "Decomposition of energy consumption in IEEE 802.11," in *Proceedings of ICC 2007*, pp. 403–408, June 2007.
- [11] P. Agrawal, A. Kumar, J. Kuri, M. K. Panda, V. Navda, and P. Ramjee, "Analytical models for energy consumption in infrastructure WLAN STAs carrying TCP traffic," in *Proceedings of COMSNETS 2010*, Jan. 2010.
- [12] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 28, pp. 303–314, Oct. 1998.
- [13] N. Cardwell, S. Savage, and T. Anderson, "Modeling TCP latency," in *Proceedings of INFOCOM 2000*, vol. 3, pp. 1742–1751, Mar. 2000.
- [14] C. Andren, T. Bozyc, B. Road, and D. Schultz, "PRISM power management modes: Application note AN9665," Feb. 1997.