

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

大阪大学 大学院情報科学研究科
橋本 匡史
長谷川 剛
村田 正幸

研究の背景

- 小型の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である
- 無線端末の消費電力の 10% から 50% を無線通信が占めている [1]

↓

無線端末の駆動時間を長期化するには、無線通信の省電力化が重要

[1] Atheros Communications, "Power consumption and energy efficiency comparisons of wlan products," Atheros White Papers, May 2003.

2012/06/21 IN 研究会 2

無線 LAN 環境における省電力化の問題

無線端末の省電力化には、パケットが送受信されていない時間(アイドル時間)にスリープすることが有効

複数の TCP フローが混在
下り TCP フロー
上り TCP フロー

状態遷移には電力の消費と時間がかかる
アクティブ状態 スリープ状態

スリープのタイミングを正確に制御するのは困難
頻繁なスリープはスリープによる省電力効果を低減する

2012/06/21 IN 研究会 3

研究の目的

アイデア

- 無線端末とアクセスポイントの間で複数の TCP フローを集約する
- 複数のパケットをまとめてバースト的に転送することによって1回あたりのスリープ時間を長くする

無線 LAN 環境において、複数の TCP データ転送を行なっている無線端末の通信を省電力化する

1. TCP データ転送の省電力化を行う SCTP トンネリングを提案
 - Stream Control Transmission Protocol (SCTP) を利用
2. SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築し、提案方式の省電力効果を評価

2012/06/21 IN 研究会 4

SCTP トンネリングの概要

- 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
 - SCTP マルチストリーミングを利用
- 各 SCTP パケットをバースト転送することによって 1 回あたりアイドル時間を長くする
 - Delayed ACK を利用

2012/06/21 IN 研究会 5

SCTP の特徴

SCTP パケットの構成

SCTP パケットは1つ以上のチャンクから構成

DATA: ユーザメッセージが格納されるチャンク
SACK: 受信したパケットの確認応答用のチャンク...

SCTP マルチストリーミング

1つのアソシエーションに複数のストリームを多重化可能

2012/06/21 IN 研究会 6

SCTPトンネリング - TCPフローの集約 -

1. カプセル化
2. バッファリング
3. 転送
4. カプセル化解除
5. 本来の宛先へ転送

■ TCP パケット
■ SCTP-DATA チャンク
■ SCTP パケット

1. TCP パケットを SCTP-DATA チャンクに格納する
2. SCTP-DATA チャンクを送信キューにバッファリングする
3. 送信可能なタイミングで SCTP-DATA チャンクから SCTP パケットを生成する
 - 送信タイミングは SCTP 輻輳制御機構にしたがう
4. 受信した SCTP パケットから TCP パケットを取り出す
5. TCP パケットを本来の宛先に転送する

2012/06/21 IN 研究会 7

SCTPトンネリング - バースト転送 -

Delayed ACK によるバースト転送

複数パケットに対する確認応答を1つの SCTP-SACK チャンクで行う

1. m 個の SCTP パケットを受信すると SCTP-SACK チャンクが生成される
2. 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 パケットが送信可能となる

パケット送受信の時系列と状態遷移

頻繁な状態遷移により省電力効果が低減

バースト転送

1回あたりのスリープ時間を長くし、スリープの回数を削減

2012/06/21 IN 研究会 8

消費電力モデルの仮定

複数の TCP フローが混在

無線端末の無線通信による消費電力をモデル化する

仮定

- TCP フローの平均スリープ率は既知
- MAC レベルにおいてデータフレームは確率的に廃棄
- 無線端末は RTS/CTS を利用し、アクセスポイントは RTS/CTS を利用しない
- 無線 NIC には送信状態、受信状態、アイドル状態、スリープ状態があり、それぞれの状態で消費される電力は異なる
- 無線 NIC は適切なタイミングでスリープできる

2012/06/21 IN 研究会 9

消費電力モデルの概要

SCTPトンネリングの消費電力モデル

MAC レベルのサブモデル

CSMA/CA のフレーム交換

CSMA/CA のフレーム交換に基づき、データフレームの送信/受信時の消費電力を計算

SCTP レベルのサブモデル

SCTP 輻輳ウィンドウの変化

輻輳ウィンドウにしたがって単位時間あたりに送信されるパケット数を基に、消費電力を求める

2012/06/21 IN 研究会 10

CSMA/CA のフレーム交換による消費電力量

データフレームが複数回 (i 回) 送信される確率

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

q : データフレーム送信失敗確率
 N : 最大フレーム再送回数

連続してデータフレーム送信に失敗したときに、i 回目のデータフレーム送信にかかる平均消費電力量

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

■ アイドル時の消費電力量
■ フレーム送信による消費電力量
■ フレーム受信による消費電力量

1つのデータフレームの送信にかかる消費電力量の期待値

$$E[J^i] = \sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^i J^j(i) Q(j)$$

2012/06/21 IN 研究会 11

SCTPトンネリングの消費電力

SCTP の輻輳制御

- アソシエーション全体で輻輳制御を行う
- 輻輳制御アルゴリズムは TCP と同じ

SCTP 輻輳制御の振る舞いを、1本の TCP フローの輻輳制御の振る舞いにみせる

SCTP レベルのモデルは TCP フローの消費電力モデル [12,13] を基に構築

TCP 輻輳制御の詳細な挙動に基づいて、TCP データ転送の消費電力量を導出

[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 ISCTT 2011, Oct. 2011.

2012/06/21 IN 研究会 12

SCTPトンネリングの消費電力

SCTPの輻輳ウィンドウサイズの変化

× パケット廃棄イベントの発生
 TD 期間: 輻輳回避フェーズ (3つの重複ACK)
 TO 期間: 輻輳回避フェーズ (タイムアウト)

ウィンドウサイズ

時間

1周期

SCTPトンネリングの消費電力の期待値

TD 期間の消費電力の期待値 TO 期間の消費電力の期待値

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

TD 期間の長さの期待値 TO 期間の長さの期待値

2012/06/21 IN 研究会 13

TD 期間の消費電力量

パケット廃棄

パケットの受信

パケットの送信

アクティブスリープ

時間

時間

TD 期間の輻輳ウィンドウの変化

TD 期間の消費電力量の期待値

SCTPパケットの送信による消費電力量

SCTPパケットの受信による消費電力量

状態遷移による消費電力量

$$J^{TD} = E[Y]E[J^s] + E[Y] - E[W]/2 E[J^s]$$

$$+ P^s E[T_{td}^s] + E[N_{td}^s] (P^{as} T^{as} + P^{sa} T^{sa})$$

$$+ P^l \{ E[A] - E[Y]E[T^l] - (E[N_d^s] - E[W]/2)E[T^l] - E[T_{td}^s] - E[N_{td}^s] (T^{as} + T^{sa}) \}$$

スリープ時の消費電力量 スリープできない時(アイドル時)の消費電力量

2012/06/21 IN 研究会 14

TD 期間の長さ

SCTPトンネリングのパケット送受信の時系列

パケット送信

パケット受信

$T^{interval}$

w

w/R_{sctp}

SCTPパケットの送信間隔

$$T^{interval} = 1/R_{sctp}$$

無線帯域

$$R_{sctp} = \min(R, R_{sctp}^{max}, B_{wireless})$$

TCPパケットの到着率 SCTPの最大送信速度

TD 期間の長さの期待値

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

TD 期間に転送される SCTP パケット数

2012/06/21 IN 研究会 15

SCTPトンネリングによる遅延の増加

バースト転送するためにパケットをバッファリングする必要がある

各 TCP パケットに遅延が生じる

IEEE 802.11 無線LAN

Sctp アソシエーション

無線端末

アクセスポイント

TCPパケットの平均バッファリング遅延

バースト転送するパケット数

$$D = \frac{m-1}{2} \frac{1}{R}$$

TCPパケットの到着率

2012/06/21 IN 研究会 16

数値解析 - パラメータ設定 -

複数のアプリケーションが TCP データ転送を行う

無線端末

IEEE 802.11a 無線LAN

アクセスポイント

インターネット

ホスト

データフレームは確率的に廃棄

パラメータ設定

- IEEE 802.11a
 - データレート: 54 Mbps
- TCP-DATA パケットサイズ: 1500 バイト
- TCP-ACK パケットサイズ: 40 バイト
- 1本あたりのTCPフローの平均スループット: 150 KB/s

無線 NIC の消費電力 [15]

送信	受信	アイドル	スリープ
1.4 W	0.9 W	0.8 W	0.016 W

スリープからの復帰にかかる時間は 1 ms
消費電力は送信時と同じとした

評価メトリック

- 消費電力
- 平均バッファリング遅延

[15] Wistron Net Corp., "CM9: WLAN 802.11 a/b/g mini-PCI Module" available at <http://site.microcom.us/CM9.pdf>

2012/06/21 IN 研究会 17

数値例 - 消費電力 -

上り TCP フローのみの場合の消費電力

データフレーム転送の失敗確率 $q = 0.1$
 最大フレーム再送回数 $N = 7$
 バースト転送するパケット数 m

消費電力 [W]

TCP フローの合計スループット [KB/s]

スリープなし

スリープ (バースト転送 $m=5$)

スリープ (バースト転送 $m=2$)

スリープ (バースト転送なし)

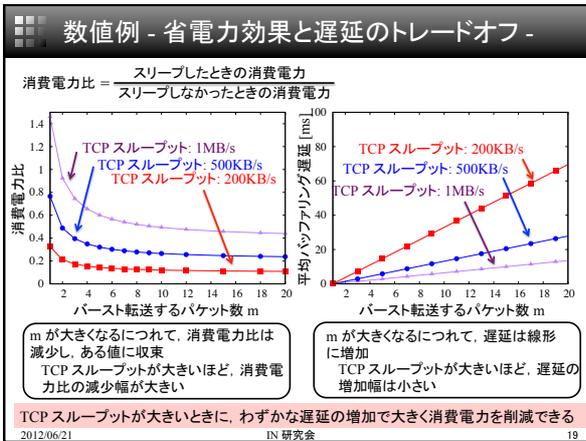
スリープした場合の消費電力がスリープしなかった場合の消費電力を超えている

スリープによって削減される消費電力より、状態遷移による消費電力が大きいため

十分な間隔がなければスリープしないことで回避可能

スリープすることによって消費電力を大きく削減
 合計スループットが大きい場合でも、 m を大きくすることで省電力化できる
 状態遷移回数を削減し、状態遷移にかかる電力を削減できたため

2012/06/21 IN 研究会 18



まとめ

まとめ

- 無線 LAN 環境において、複数の TCP データ転送を行なっている無線端末の通信を省電力化する SCTP トンネリングを提案
 - 複数の TCP フローを集約し、各パケットをバースト転送することで1回あたりのスリープ時間を長期化
- SCTP トンネリングの消費電力モデルを構築
- 数値解析
 - SCTP トンネリングはわずかな遅延の増加で消費電力を大きく削減できる

今後の課題

- SCTP トンネリングを実装し性能評価を行う

2012/06/21 IN 研究会 20

