




Transport-Layer Solutions for Achieving Fairness and Energy Efficiency in Wireless LANs
無線 LAN におけるフロー間の公平性と省電力の実現のための
トランスポート層プロトコル

橋本 匡史
 大阪大学 大学院情報科学研究科
 情報ネットワーク学専攻



研究の背景

- 無線 LAN の発展
 - 多くの場所で無線 LAN が利用可能
 - 多くのモバイル端末が無線 LAN をサポート
 - 様々なアプリケーションの登場
 - 下りトラヒックだけではなく上りトラヒックも発生

↓


- 多くのユーザが無線 LAN アクセスポイントを共有
 - 限られた無線資源を共有するため、**公平性**が重要
- 無線 LAN の利用機会の増加による無線通信の増加
 - 無線端末は通常バッテリー駆動であるため**省電力化**が重要

博士学位論文公聴会 2


研究の背景

- 無線 LAN とトランスポート層プロトコルの関係
 - 公平性
 - MAC レベルでは CSMA/CA によって公平性が実現
 - トランスポート層レベルでは必ずしも公平性が実現されるわけではない
 - TCP を利用するとフロー間に深刻な不公平が発生
 - 省電力化
 - 省電力化にはスリープが有効
 - パケットの送受信タイミングはトランスポート層プロトコルとそれを利用するアプリケーションによって決定
 - 効果的なスリープのためには、トランスポート層プロトコルの挙動を考慮する必要がある

博士学位論文公聴会 3



研究の目的と博士論文の構成

目的
トランスポート層プロトコルの挙動を考慮した、無線 LAN におけるフロー間の公平性と省電力化を実現する手法の確立

博士論文の構成


- Chapter 1 Introduction TCP フロー間の公平性
- Chapter 2 A Transport-Layer Solution to Improve Fairness among TCP Flows in a WLAN 無線端末の省電力化
- Chapter 3 Energy Consumption Models of a Single TCP Flow in a WLAN
- Chapter 4 SCTP Tunneling: A Transport-Layer Solution to Reduce Energy Consumption in a WLAN
- Chapter 5 Conclusion

博士学位論文公聴会 4



Chapter 2
A Transport-Layer Solution to Improve Fairness among TCP Flows in a WLAN

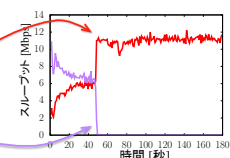
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "A transport-layer solution for alleviating TCP unfairness in a wireless LAN environment," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E94-B, no. 3, pp. 765-776, Mar. 2011.
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Trade-off evaluation between fairness and throughput for TCP congestion control mechanisms in a wireless LAN environment," in *Proceedings of SPECTS 2010*, July 2010.
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Experimental evaluation of TCP congestion control mechanisms in wireless LAN environment with a novel performance metric," *Technical Report of IEICE (NS2009-126)*, vol. 109, no. 326, pp. 33-38, Dec. 2009. (in Japanese).
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Fairness improvement of hybrid TCP congestion control mechanisms in wireless LAN environment," *Technical Report of IEICE (6th QoS Workshop of Technical Committee on Communication Quality)*, Dec. 2008. (in Japanese).


本章の背景と目的

→ TCP-DATA パケットのフロー
→ TCP-ACK パケットのフロー
 矢印の向き: フローの方向
 矢印の色: 同色が同じ TCP コネクション

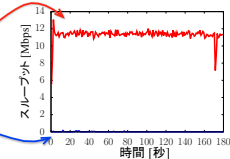
上り TCP フロー間の不公平

輻輳によりパッファ溢れが発生
 TCP-ACK が廃棄



上下 TCP フロー間の不公平

TCP-ACK が廃棄
 TCP-DATA が廃棄



目的
無線 LAN における TCP フロー間の公平性を改善

6

提案方式の概要

問題点

- TCP はデータパケットの損失のみを輻輳の指標に利用
 ↳ アクセスポイントの輻輳に起因する
 ↳ TCP フロー間の不公平を改善できない

解決策

- TCP-ACK パケットの損失を輻輳の指標に利用することによって、TCP フロー間の不公平を改善
 - TCP の輻輳制御に追加
 - パケット順序の入れ替えによるパケット損失の誤判断を防止

TCP-ACK パケットの損失
 タイムアウトの発生
 輻輳ウィンドウサイズ
 時間
 TCP Reno
 博士學位論文公聴会
 提案方式

提案方式の実験評価

合計 TCP フロー数: 10 本

実験環境

上り TCP フロー間の公平性

TCP Reno

提案方式

上りフロー間の公平性を大きく改善

上下 TCP フロー間の公平性

上下フロー間の公平性を大きく改善

平均スループット [Mbps]
 フロー番号
 平均スループット [Mbps]
 フロー番号
 フローあたりの平均スループット [Mbps]
 フロー数
 上りフロー数 下りフロー数

本章のまとめ

- 無線 LAN における TCP フロー間の公平性改善のために、トランスポート層レベルの改善手法を提案・評価
 - TCP 輻輳制御を変更
 - アクセスポイントの輻輳の指標として TCP-ACK パケットの損失を利用
 - 実機を利用した実験評価により、提案方式が実無線 LAN 環境において適用でき、TCP フロー間の公平性を大きく改善できることを確認

博士學位論文公聴会

Chapter 3

Energy Consumption Models of a Single TCP Flow in a WLAN

- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "An analysis of energy consumption for TCP data transfer with burst transmission over a wireless LAN," submitted to *International Journal of Communication Systems*, Dec. 2012.
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Energy efficiency analysis of TCP with burst transmission over a wireless LAN," in *Proceedings of ISCT 2011*, pp. 292-297, Oct. 2011.
- 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 ICC Workshop (GreenComm 2011)*, pp. 1-6, June 2011.
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Energy efficiency analysis of TCP with delayed ACK in a wireless LAN environment," *Technical Report of IEICE (NS2011-50)*, vol. 111, no. 144, pp. 1-6, July 2011.
- M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Analysis of power consumption of a single TCP flow with burst transmission in a wireless LAN environment," in *Proceedings of the IEICE General Conference*, pp. S-107-S-108, Mar. 2011. (in Japanese).

本章の背景

- 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うち、最大 50% を無線通信が占める[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有効
- 省電力化にはパケット送受信していない時間 (アイドル時間) にスリープすることが有効
 - パケットの送受信タイミングはトランスポート層プロトコルやそれを利用するアプリケーションによって決定
 - ↳ トランスポート層プロトコルの挙動を考慮する必要がある

[1] Atheros Communications, "Power consumption and energy efficiency comparisons of wlan products," Atheros White Papers, May 2003. 11

本章の目的

無線 LAN において、消費電力を削減するために効果的なトランスポート層プロトコルの要素を明らかにする

- MAC レベルと TCP レベルの詳細な挙動を考慮して、無線端末の通信の消費電力量をモデル化
- 消費電力量を削減するために、トランスポート層レベルのバースト転送を提案

博士學位論文公聴会

ネットワークモデルと仮定

上り TCP データ転送をした場合に、無線端末の通信における消費電力量をモデル化

仮定

- パケット送受信タイミングは TCP の輻輳制御機構によって決まり、無線ネットワークインターフェイス (WNI) は適切なタイミングでスリープできる
 - TCP の挙動による消費電力量への影響に注目するため
- 無線区間ではデータフレームが確率的に廃棄され、その確率は既知である
- 有線区間では TCP-DATA パケットが輻輳によって廃棄される、TCP-ACK パケットは廃棄されない

博士学位論文公開会 13

消費電力量モデルの概要

消費電力量モデル

MAC レベルのサブモデル

無線端末 CSMA/CA のフレーム交換
CSMA/CA のフレーム交換に基づき、1 データフレームあたりの送信/受信時の消費電力量の期待値を計算

TCP レベルのサブモデル

TCP 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、消費電力量の期待値を求める

消費電力量 [J]

パケット送信時の消費電力量	パケット受信時の消費電力量	アイドル時の消費電力量
スリープなし $E[J_{cam}] = E[J^t] + E[J^r] + E[J_{cam}]$	スリープ時の消費電力量	アクティブ/スリープ間の状態遷移の消費電力量
スリープあり $E[J_{sleep}] = E[J^t] + E[J^r] + E[J_{sleep}] + E[J^s] + E[J^{st}]$		

博士学位論文公開会 14

トランスポート層レベルのバースト転送

省電力化のために、トランスポート層レベルのバースト転送を提案
TCP では Delayed ACK を利用することで実現可能

利点 アクティブ/スリープ状態間の遷移回数を削減 → **省電力化**
欠点 一時的にパケットをバッファリングする必要がある → **遅延の増加**

通常の TCP
バースト転送

合計のスリープ時間はほぼ同じ
1 回あたりのスリープ時間の長さが異なる

博士学位論文公開会 15

TCP レベルの消費電力量モデルの概要 (例: スリープ時間)

TCP データ転送におけるウィンドウサイズの変化

初期スロースタートフェーズ 定常フェーズ

TCP-ACK パケットの到着間隔におけるスリープ時間

$$E[t^s(w_k)] = [t^a(w_k) - mE[t^t] - E[t^r] - t^{st}]^+$$

定常フェーズにおけるスリープ時間の期待値

$$E[t_\eta] = E[n_{cycle}] \times \{ E[n] (E[t_d^s(r_{td}, w_k^{ca})] + E[t_{to}^s(r_{td}, w_k^{ca})]) + E[t_{to}^s] \}$$

博士学位論文公開会 16

解析による数値例

ファイルサイズ: 10 MB
有線ネットワークのパケット廃棄率: 0.01

消費電力量比 = スリープ利用時の消費電力量 / スリープ未使用時の消費電力量

消費電力量

消費電力量比

データ転送時間

転送時間 [秒]

m が大きくなるにつれて、消費電力量比は減少し、ある値に収束
RTT が小さいほど、消費電力量比の減少幅が大きい

m が大きくなるにつれて、遅延は線形に増加
RTT が小さいほど、遅延の増加幅は小さい

RTT が小さい場合に、バースト転送はわずかな遅延の増加で大きく消費電力を削減できる

博士学位論文公開会 17

本章のまとめ

- 無線 LAN における TCP フローの消費電力量をモデル化し、効果的な省電力化のための要素を検討
 - 消費電力量モデルは MAC レベルのモデルと TCP レベルのモデルの組み合わせ
 - トランスポート層レベルのバースト転送が省電力化に有効であることを示した
 - RTT が小さい場合において、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

博士学位論文公開会 18

Chapter 4

SCTP Tunneling: A Transport-Layer Solution to Reduce Energy Consumption in a WLAN

1. M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "SCTP tunneling: Flow aggregation and burst transmission to save energy for multiple TCP flows over a WLAN," submitted to *IEICE Transactions on Communications*, Oct. 2012.

2. M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Exploiting SCTP multistreaming to reduce energy consumption of multiple TCP flows over a WLAN," in *Proceedings of GREE NETS 2012*, Oct. 2012.

3. M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Study on exploiting SCTP to save energy of TCP data transfer over a wireless LAN," in *Proceedings of the IEICE Society Conference*, pp. S-20-S-21, Sept. 2012. (in Japanese).

4. M. Hashimoto, G. Hasegawa, and M. Murata, "Proposal of SCTP tunneling for energy-efficient TCP data transfer over a wireless LAN environment," *Technical Report of IEICE (IN2012-26)*, vol. 112, no. 88, pp. 13-18, June 2012. (in Japanese).

本章の背景および目的

3章において、バースト転送によって消費電力を削減できることを示した

問題点
 複数の TCP フローが混在
 下り TCP フロー
 上り TCP フロー

複数の TCP フローが混在する場合スリープタイミングを正確に制御するのは困難

無線端末とアクセスポイント間で複数の TCP フローを集約する

目的
 無線 LAN において、トランスポート層レベルのバースト転送に基づく、無線端末の省電力化を実現する方式の確立

博士學位論文公報 20

提案方式の概要

Stream Control Transmission Protocol (SCTP) を利用

提案方式 (SCTP トンネリング) の特徴

- フローの集約
 - 複数の TCP フローを1本の SCTP アソシエーションに集約
 - SCTP マルチストリーミングを利用
- バースト転送
 - 複数のパケットをまとめてバースト的に転送する

博士學位論文公報 21

提案方式の消費電力モデルの概要

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なせる

3章で構築した消費電力量モデルを拡張

消費電力 [W]

スリープなし $P_{cam} = \frac{E[J_{cam}^n]}{E[T_{\eta}^{all}]}$ 転送時間

スリープあり $P_{sleep} = \frac{E[J_{sleep}^n]}{E[T_{\eta}^{all}]}$

TCP パケットの平均バッファリング遅延

バースト転送のためにバッファリングが必要

一度に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 λ

博士學位論文公報 22

解析による数値例

m 一度にバースト転送するパケット数
 D_{th} : 許容出来る最大の平均遅延

消費電力比 = スリープ利用時の消費電力量 / スリープ未使用時の消費電力量

上りフローのみの場合の消費電力

スリープなし (バースト転送なし) 回避可能

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)

許容遅延時間と消費電力比の関係

$D_{th} = 0$ [ms] (バースト転送なし)

$D_{th} = 3$ [ms]

$D_{th} = 5$ [ms]

$D_{th} = 10$ [ms]

許容遅延時間を満たす範囲で m を最大化

約60%削減

合計スループットが大きい場合において、 m を大きくすることでさらに省電力化ができる

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

遅延の増加を許容すると、消費電力を大きく削減することが可能

合計スループットが 800 KB/s のときに 10 ms の遅延の増加を許容すると、遅延の増加を許容しない場合に比べて、消費電力を約 60% 削減できる

博士學位論文公報 23

本章のまとめ

- 無線 LAN における無線端末の省電力化を実現する方式として、SCTP トンネリングを提案および評価
 - SCTP トンネリングの特徴
 - フローの集約とバースト転送
 - 数値解析により SCTP トンネリングの有効性を示した
 - 遅延を許容することができれば、消費電力を大きく削減できることを示した

博士學位論文公報 24

