

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26730051

研究課題名(和文) 通信性能と省電力性能を高い次元で両立させるチャネル状態変動適応型無線LAN基盤

研究課題名(英文) Adaptive Wireless LAN to Time-Varying Channel Condition for Simultaneous Pursuit of Communication Quality and Power-Saving Performance

研究代表者

谷川 陽祐 (Tanigawa, Yosuke)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90548497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：無線チャネルが変動しかつユニキャスト通信とマルチキャスト通信が混在する無線LAN環境、さらにユニキャストについてはUDPとTCPのフローが混在する環境にも注目し、通信帯域、遅延等の通信性能と省電力性能を高い次元で両立させる無線LAN基盤技術を確立した。具体的には、チャネル状態悪化時に伝送レートを下げることで悪化に対するロバスト性を確保する従来方式と異なり、良いチャネル状態の期間を選んで高伝送レートで迅速に通信し、捻出された空き期間やチャネル状態が悪く状態改善まで待機すべき期間はスリープして電力消費を抑制する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：In wireless LAN environments where both unicast (including UDP and TCP) and multicast flows coexist, this research established wireless LAN technologies that are adaptive to time-varying channel condition for balancing communication quality, like communication bandwidth and delay, and power-saving performance. Specifically, in contrast to existing approaches that transmit packets at lower rates under fading channel conditions, more data packets are transmitted while the wireless channel quality is good and higher rates are available. In other duration during which each station should not send a packet because of other packets' transmission or lower available rates under the fading channel, stations sleep to save power consumption.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：チャネルアクセス制御 送信スケジューリング 省電力化 ネットワーク 情報通信工学

## 1. 研究開始当初の背景

無線 LAN は、既に我々の生活に欠かせないインフラとして広く普及している。一方、ネットワークアプリケーションの増加、多様化に伴って通信トラヒックも増加し続けており、通信帯域の向上が今後も求められ続けると予想される。しかし、現状の問題点として、理論的に向上した伝送レートを有効活用できず実効的な通信帯域が向上していないことが挙げられる。その原因の1つとしてチャンネル状態が時間と位置に依存して変動することが考えられ、悪化したチャンネル状態下で高伝送レートを使用するとパケットロスが頻発し、逆に低伝送レートを使用するとレートが低いだけ通信効率が悪化する。

一方、近年重要視されている別の課題として、端末局の省電力化が挙げられる。端末局として、ノートパソコンに加えてスマートフォンやタブレット端末等が急増しており、バッテリーの長寿命化等に対応するためには電力消費の抑制が不可欠である。

## 2. 研究の目的

本研究では、無線チャンネル状態が変動し、かつユニキャスト通信とマルチキャスト通信が混在する無線 LAN 環境において、通信帯域、遅延等の通信性能と省電力性能を高い次元で両立させる無線 LAN 基盤の実現を目的とする。目的達成のため、チャンネル状態悪化時に伝送レートを下げることで悪化に対するロバスト性を確保する従来のアプローチと異なり、良いチャンネル状態の期間を選んで高伝送レートで迅速に通信し、捻出された空き期間およびチャンネル状態が悪く状態改善まで待機すべき期間はスリープして電力消費を抑制する。

通信性能として通信帯域、チャンネル利用効率、パケット通信遅延を、省電力性能として消費電力量を挙げ、これらをネットワーク全体と個々の通信の両視点から詳細に検討、評価し、両性能を高い次元で両立させる。

## 3. 研究の方法

まず、ユニキャスト/マルチキャスト混在環境におけるチャンネル状態変動適応型送信スケジューリング法を確立する。送信スケジューリング法の設計にあたっては、基地局において把握した各受信端末局のチャンネル状態を基に、チャンネル状態が良いため高伝送レートが使える受信端末局宛てパケットの優先送信を基本とするが、同時に複数受信端末局へ送信できる効用がある一方パケットロスが発生した場合に各受信端末局への再送処理が複雑になるというマルチキャストパケットの特徴も考慮し、どのような順序で各パケットを送信するか詳細に検討する。

次に、省電力化制御法を確立する。チャネ

ル状態が悪いため別端末局宛てパケットが先に送信される期間だけパケット送信が行われない端末局やチャンネル状態が良いため高レート伝送により短期間でパケット送信が終了した端末局を中心とするスリープ制御法を詳細に検討する。

さらに、想定環境を複数無線 LAN が相互干渉する環境に拡張し、上述の送信スケジューリング法、省電力化制御法を基に、近接無線 LAN 同士が連携しながら相互干渉を抑制し、高効率かつ省電力な通信を可能にするパケット伝送制御法を確立する。

## 4. 研究成果

研究期間全体を通して、無線チャンネルが変動しかつユニキャスト通信とマルチキャスト通信が混在する無線 LAN 環境、さらにユニキャストについては UDP と TCP のフローが混在する環境にも注目し、通信帯域、遅延等の通信性能と省電力性能を高い次元で両立させる無線 LAN 基盤技術について研究した。

得られた代表的な研究成果について、以下で説明する。

### (1) チャンネル状態変動適応型送信スケジューリング法

UDP/TCP フロー混在環境における提案法

まず、ユニキャストで伝送される UDP/TCP フロー混在環境における送信スケジューリング法を確立した。

本送信スケジューリング法は、基地局と各端末局間の無線チャンネル状態が時間的に変動する環境において、送信基地局がチャンネル状態の悪い受信端末局へのパケット送信を一旦見送り、距離や遮蔽物による制約内での最大伝送レートが利用可能なチャンネル状態の良い他の端末局宛てのパケットを先に送信することを基本制御とし、高レートを有効利用した効率的な伝送を行う。送信を見送られた端末局に対しては、チャンネル状態が改善した後に見送り分の補償を含めてパケット送信を行う。

このような送信スケジューリングを TCP パケットに対して行う場合、チャンネル状態が悪化している端末局へのパケット送信を一旦見送ることで TCP レベルで再送タイムアウト (RTO) が誤検出される危険性がある。そこで、各端末局宛てパケットの基地局内送信キュー滞在時間を平滑化させることで、RTO の発生頻度を減少させる TCP 適応型スケジューリング規律を確立した。

具体的には、基地局は、各パケットが送信キューに格納されてから (そのパケットの受信端末局から) ACK が返信されるまでの「送信キュー内滞在時間」を測定し、受信端末局ごとに指数加重移動平均によって算出された送信キュー内滞在時間の平均値 ( $T_q$ ) に基づいて送信パケットを決定する。特に、送

信キュー内滞在時間が  $T_q$  を既に超えているパケット、および  $T_q$  に達するようなパケットが存在する場合、当該パケットを最優先で送信する。ただし、このようなパケットが複数存在する場合は、送信キュー内滞在時間が最も大きいパケットを送信する。

以上のような提案送信スケジューリング法の代表的な性能評価結果を以下に示す。性能評価環境として、基地局を中心とした半径 135 m の円内に端末局をランダムに配置した。各端末局は、基地局と有線接続された FTP サーバから無限の大きさのファイルを TCP NewReno を用いて受信する。パケットサイズは 512 byte である。伝送レートについて、基地局から端末局の距離が 38 m 以内であれば 54 Mbps まで、38 m より遠く 100 m 以内であれば 36 Mbps まで、100 m よりも遠い場合は 24 Mbps までの値がそれぞれ利用できる。また、基地局から端末局の間を障害物が最大速度 1 m/s で移動しているような Rayleigh フェージングを発生させる。

全端末局での総受信スループット、各端末局における受信スループットの公平性 (Fairness Index) の結果をそれぞれ図 1、2 に示す。

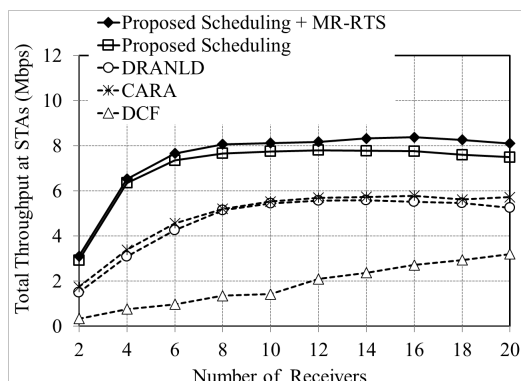


図 1 総受信スループット

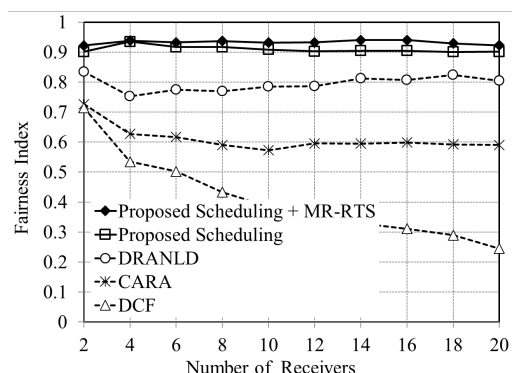


図 2 受信スループットの端末局間公平性

標準規格の DCF、チャネル状態の悪化に対し伝送レートを下げたパケット伝送を行うことで対処する既存方式 CARA、DRANLD と比較して、提案送信スケジューリング法 (Proposed Scheduling) により TCP フローの受信スループット、および受信スループット

に関する端末局間の公平性が向上することを確認した。これは、TCP の RTT を防いでウィンドウサイズの低下を抑制できるためである。なお、紙面の都合上説明は省略するが、提案送信スケジューリング法に対し各受信端末局のチャネル状態変化をより迅速に検出可能な MR-RTS ハンドシェイク法を別途提案しており、それを組み合わせたスケジューリング (Proposed Scheduling + MR-RTS) によりさらなるスループット向上が達成できることも合わせて確認した。

#### ユニキャスト/マルチキャスト混在環境における提案法

次に、想定環境をユニキャスト/マルチキャストフロー混在環境に発展させ、チャネル状態変動適応型送信スケジューリング法の拡張を行った。

マルチキャストパケットはユニキャストに比べて受信端末局が複数存在することから受信端末局グループ全体のチャネル状態が良好でグループ全体に高レートで伝送できる確率が相対的に低く、またパケットロスが発生した場合に各受信端末局への再送処理が複雑になることが予想される。そのため、チャネル状態の良い受信端末局グループ宛てのマルチキャストパケットを優先的に送信する。ただし、ユニキャストパケットの伝送遅延悪化を防ぐため、優先送信するマルチキャストパケットの範囲を受信端末局数に応じて送信キュー先頭から一定の範囲に制限する。

このような送信スケジューリング法により、ユニキャストとマルチキャストともに通信帯域が向上することを、性能評価により確認した。

#### (2) 省電力化制御法

本省電力化制御法では、データパケットを伝送する前に行われる RTS/CTS ハンドシェイクにより伝送に関与しない近隣端末局に設定される送信禁止期間 (NAV 期間) に各端末局がスリープすることを基本制御にして、省電力化を行う。これにより、上述の送信スケジューリング法におけるチャネル状態が悪いため別端末局宛てパケットが先に送信される期間に各端末局がスリープでき、また各端末局がデータパケットの送受信を行えないにもかかわらずスリープできない期間が発生するという IEEE 802.11 標準規格で規定されている PSM (Power Saving Mode) を代表とする既存方式における問題を解決できる。

このような基本制御に対し、各端末局の 1 回あたりのスリープ期間 (= 送信禁止期間) を延長させ、かつ頻繁なスリープの開始と終了による電力消費を防ぐことで省電力性能を向上させるため、RTS/CTS ハンドシェイク後に複数のデータパケットをまとめて双方向で伝送する双方向バースト伝送を連携さ

せた。

この双方向バースト伝送においては、バースト伝送により逆に近隣局のデータパケット送信が遅延しそれらパケットの伝送遅延が増大することを防ぐため、基地局と各端末局が保持している送信対象パケットの許容遅延や量を基に、近隣局のパケット送信に影響を与えない範囲でバースト伝送されるパケット量を決定する。

このような提案省電力化制御法の代表的な性能評価結果を以下に示す。性能評価環境として、基地局を中心とした半径 30 m の円内に端末局をランダムに配置した。基地局から各端末局に対して 1Mbps、各端末局から基地局に対して 1Mbps のフローをそれぞれ送信する。伝送レートは 54Mbps とした。

全端末局の合計消費電力量、下り合計スループット、上り合計スループットの結果をそれぞれ図 3、4、5 に示す。

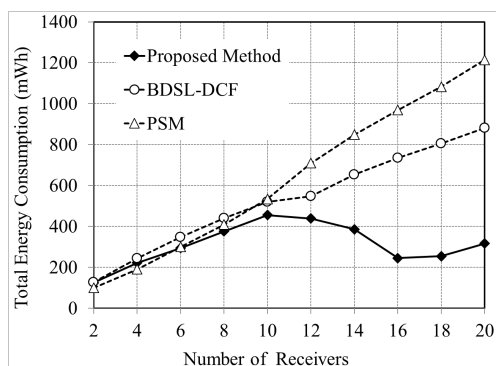


図 3 全端末局合計消費電力量

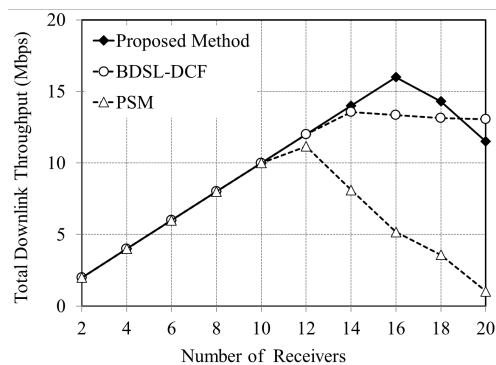


図 4 下り合計スループット

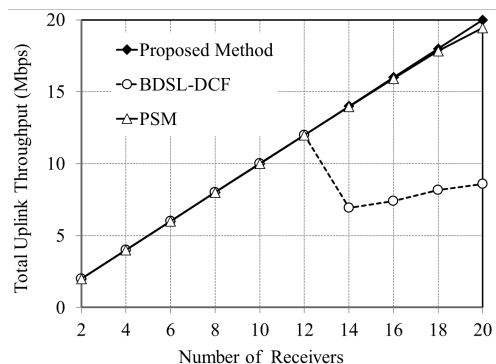


図 5 上り合計スループット

提案省電力化制御法を用いることで、既存の代表的な省電力化方式である BDSL-DCF や標準規格の PSM と比較して、各端末局の消費電力が低下するとともに、バースト伝送によるチャネル利用の効率化が図れることによるパケット伝送スループットの向上が確認できる。また、紙面の都合上結果の掲載は省略するが、パケット伝送遅延についても本提案手法において許容範囲に抑えられることも合わせて確認した。

### (3) 近接無線 LAN 間における連携制御

想定環境を複数無線 LAN が相互干渉する環境に拡張し、上記で確立した送信スケジューリング法、省電力化法を基に、近接無線 LAN 同士が連携しながら相互干渉を抑制し、高効率かつ省電力な通信を可能にするパケット伝送制御法を確立した。

具体的には、まず、各局（基地局および端末局）が近隣の他局から受ける受信信号強度を送信元局ごとに管理し、さらにその管理情報を他局に通知する。そして、各パケット送信局は他局と共有した管理情報を基に、現在行われている先行パケット伝送に対し自局が送信するパケットが同時伝送可能か判断し、可能と判断される場合はパケット送信することでチャネル利用効率や伝送スループットを向上させる。一方、同時伝送が不可能と判断される場合には、送信局は先行パケットの伝送が終了するまでスリープすることで、省電力化を図る。

計算機シミュレーションによる評価を通じ、複数無線 LAN が近接配置されている環境において、広帯域かつ省電力なパケット伝送が実現できることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

K. Omori, Y. Tanigawa, and H. Tode, Power-Saving Method of Wireless Stations based on Adaptive Control of Bidirectional Burst Transmission in Wireless LANs, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol. E100-B, no. 6, pp. 986-996, June 2017.  
DOI: 10.1587/transcom.2016EBT0003

S. Yoshioka, Y. Tanigawa, and H. Tode, Smart Packet Transmission Scheduling combined with Rate Adaptation for Enhancing Total Throughput against Channel Fading in Wireless LAN, IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol. E98-B, no. 12, pp. 2496-2507, Dec. 2015.

DOI: 10.1587/transcom.E98.B.2496

[学会発表](計 31 件)

Y. Nishida, Y. Tanigawa, and H. Tode,  
Cooperative Packet Transmission  
Scheduling between Multicast and  
Unicast Flows for Communication  
Efficiency in Wireless LAN,  
Proceedings of CCNC 2018, 査読有, Jan.  
2018.

Y. Tanigawa, S. Yoshioka, and H. Tode,  
Packet Transmission Scheduling  
against Long-term Deteriorating  
Channel Condition for Enhancing TCP  
Throughput in Wireless LAN,  
Proceedings of IEEE ICCE-TW 2017, 査  
読有, June 2017.

S. Dejima, Y. Tanigawa, and H. Tode,  
Hop Counts Reduction of ZigBee Nodes  
by Cooperating Wireless LAN in ZigBee  
Network, Proceedings of IEEE CCNC 2017,  
査読有, Jan. 2017.

Y. Umeno, Y. Tanigawa, and H. Tode,  
Dynamic Multi-Rate Parallel  
Transmission for Power Saving of  
Stations in Wireless LAN Multicast,  
Proceedings of IEEE SECON 2014, 査読  
有, June 2014.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

谷川 陽祐 (TANIGAWA, Yosuke)

大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：9 0 5 4 8 4 9 7