

令和元年6月25日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H01718

研究課題名(和文) 超多端末時代におけるユーザ体感向上を目指す無線ネットワークの実証的基礎研究

研究課題名(英文) An Empirical Discussion on Wireless Networking for User Applications with Abundant Terminals

研究代表者

渡辺 尚(watanabe, takashi)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90201201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、通信端末密度の高い多端末環境においても、時間、空間、周波数の無線資源とエネルギーを効率的に利用して人々に高い満足を提供しうる無線ネットワーク基盤の基礎を確立する新たな技術を開発した。より具体的には、情報配信技術等の知見や実機実験の経験に基づき、無線LANの中核技術である無線アクセス制御技術、経路制御技術、フロー制御技術を中心に(1)電波資源を極大利用するL2技術、(2)低コスト性と柔軟性を兼ね備えたL3技術、(3)電波資源を柔軟に利用可能とするL4技術の新たな手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線全二重通信に関しては、従来困難であった無線での全二重通信が可能であることを実証的に示し、さらにこれによって達成される効率化を議論した点に学術的意義がある。また、社会の共有財産である電波を時間的、空間的、周波数的に効率利用することから社会的意義がある。また、これまで個別に議論されていたエンドツーエンドデータ伝送、センシング、電力伝送を統合しユーザ体感を高める新たな応用の創出が期待できる。例えば、遠隔手術、自動運転支援、遠隔教育、エンターテインメント等の応用と関連デバイス技術の発展に寄与する。さらに、有線と無線を相補的に活用するネットワークを効果的に構築する基盤を確立できる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we aim to establish the fundamental technology of wireless network infrastructure that can provide people with high satisfaction by high efficiency with time, space, frequency and energy in a dense terminal environment. More specifically, based on the previous knowledge of wireless access control technology, route control technology, flow control technology, information distribution technology, we developed new methods of technologies from three viewpoints, (1) L2 techniques to maximal usage of radio resources (2) L3 technology with low cost and flexibility, and (3) L4 technology that enables flexible use of radio resources.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：無線ネットワーク

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、高性能携帯端末の普及に伴い、無線ネットワークからのインターネット接続が急速に広がっている。総務省平成 25 年度、26 年度情報通信白書によれば、モバイルトラフィックは年間約 2 倍のペースで増加しており、その傾向はさらに強まっている。また、2015 年 2 月シスコ社の報告でも、2014 年に全世界では年間で 69%増加している。Wireless World Research Forum によれば、2020 年までに 7 兆台の無線機器が 70 億人の生活を支えるとされる。つまり一人あたり 1000 台の超多端末モバイル時代の到来である。実際、すでにスマートフォンの普及に伴いユーザの要求に応えられない状況が人口密集地で報告されている。携帯電話や PC などの人間が操作する機器のみならず、IoT や M2M などの機器同士が連携する機器対機器(商品 IC タグ、都市環境センサ、車路通信機器、医療測定機器等)通信の大幅な増加も予想されている。

この爆発的なモバイルトラフィックの増大に対して、電波を有効活用する無線ネットワーク技術開発は喫緊の課題である。特に、ユーザが直接利用する無線 LAN 環境は、乱立する AP の集中制御が困難なために周波数資源を有効利用できていないにも係わらず、携帯網からのオフロードにより大量のトラフィックが送受信されている。以上の背景の元、今後ユーザが実体感できる高品質なサービスを提供するためには、無線 LAN を中心とした無線ネットワークにおいて L2 から L4 までの中間層技術の包括的技術革新が必要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、申請者らが過去の研究によって培った無線ネットワーク技術を土台に、通信端末密度の高い多端末環境においても、時間、空間、周波数の無線資源とエネルギーを効率的に利用して人々に高い満足を提供しうる無線ネットワーク基盤の基礎を確立することを目的とする。具体的には、無線 LAN の中核技術である無線アクセス制御技術、経路制御技術、フロー制御技術、情報配信技術等の知見や実機実験の経験に基づき、(1)電波資源を極大利用する L2 技術、(2)低コスト性と柔軟性を兼ね備えた L3 技術、(3)電波資源を柔軟に利用可能とする L4 技術の新たな手法を開発しその特性を評価する。また、(4)実験システムによって提案手法を評価する。

3. 研究の方法

申請者らはこれまで基盤研究 A 等で、超多端末モバイル環境における無線資源極限利用アーキテクチャや無線アドホックネットワークの研究を推進し、基礎的な技術は確立したが、高精度な動画像からセンサ情報までの多様な情報の伝達を支える無線 LAN ではさらに以下の課題を解決する必要があるとの認識に至った。

1) 無線全二重、重畳符号化、指向性通信の基礎は確立しつつある。例えば無線全二重は 110dB 以上のキャンセルをスタンフォード大学が達成しており、集中制御を前提としたセルラ基地局等への展開は可能な段階にある。しかし、無線 LAN では携帯網とは異なり集中制御が困難であり、個々の端末のトラフィックや個々の AP の設置場所等の最適化は難しい。そのため、超多数の端末が存在し多数の AP が稼働する無線 LAN 環境では、端末間干渉等により物理層のポテンシャルを十分に生かすアクセス制御は非常に難しい。

2) IoT や M2M では、大容量化だけではサポートできない応用が存在する。例えば、遠隔ロボット制御では、高信頼性と即時性のトレードオフをエンドツーエンドでバランスする情報伝達が不可欠である。このためには L3, L4 の議論も必要である。例えば L4TCP は ARQ 再送制御によって高信頼性を確保するが、複数の無線区間を含むネットワークを介してダビンチ等遠隔手術ロボットを実効制御するにはさらなる高信頼化と共に、手術台の映像を遠隔の医師に許容される遅延時間で伝達する即時性をも達成する必要がある。分割 TCP などの従来技術はトラフィックのみに注目しておりユーザ体感を十分に向上させることは困難である。

3) 無線電波を電力伝送に利用する技術(WPT)が登場し実用化に向けた議論が進んでいる。例えば、M2M や IoT において無線 LAN AP から微弱な電力を伝達する方式が欧米を中心に盛んに研究されている。しかしながら、数mの距離の無線電力供給は効率が悪い。従って完全に WPT に依拠した手法ではなく、WPT を前提とした省電力化手法とデータ通信と親和性高い手法が不可欠である。

より具体的には、(1)電波資源を極大利用する L2 技術、(2)低コスト性と柔軟性を兼ね備えた L3 技術、(3)電波資源を柔軟に利用可能とする L4 技術に関して、方式設計とそれらの数学解析、シミュレーションおよび(4)一部実験システムによる評価を行う。L2 基礎技術としては、指向性通信、NetMIMO、SPC、FD、レートレス符号化、無線電力伝送、アドホックネットワーク技術をさらに発展させる。L3、L4 に関しては、分担者木下、廣田による異種システムルーティング手法、分担者猿渡による End-to-End 空間センシングを発展させる。

4. 研究成果

1) H28 年度の成果

(1)電波資源を極大利用する L2 技術 (1-1) FD/SIC を高度に利用する方式：(1-1-1) 省電力化の検討：無線全二重通信(FD)の省電力化について検討した。送受信回路等のうち不要な回路をスリープさせる方式を考案し、IEEE Globecom などで発表を行った。(1-1-2) 端末の多様性

を考慮した FD 通信方式：FD 端末と半二重通信端末（HD）の混在を想定した制御（図 1，図 2）について検討し，IEEE VTC などで発表を行った．（1-2）環境観測技術とセンシング：（1-2-1）基本設計：環境観測技術の基礎のために集中制御によって，AP が空間の状況を把握している前提で，指向性通信，Clustered NetMIMO 等を行う場合の電力伝送効率・通信容量の理論モデルを構築した．（1-2-2）FD を用いた環境観測：FD を用いて，制御信号だけでなく周囲のセンシングを行う方式の基礎を検討した．（1-2-3）無線電力搬送(WPT)：複数の AP が連携して WPT を実現する方式を設計し，情報処理学会全国大会で発表した．（1-2-4）無線センシング技術：電波状況を複数 AP が協調してセンシングし，人の動きなどを推定する方式の基礎を検討した．

（2）低コスト性と柔軟性を兼ね備えた L3 技術の開発 （2-1）有線無線ハイブリッドアドホックネットワーク方式：OpenFlow を用いてフロー毎に動的に経路制御を行うことで輻輳回避やリンク障害回避技術を実現し，情報処理学会全国大会で発表した．（2-2）異種無線システム併用のための仮想化方式：周波数共用方式を援用して AP を仮想化し，実 AP を必要な資源量に応じて仮想 AP に割り当てる方式を検討し，情報処理学会全国大会で発表した．

（3）電波資源を柔軟に利用可能とする L4 技術の開発 柔軟性を定義する理論モデル：多様な要求に応えつつ資源を活用する L4 の基礎を検討した．

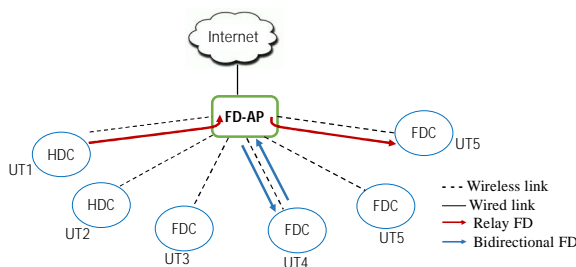
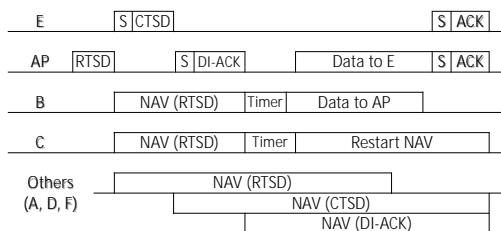


図 1 FD 端末と HD 端末が混在した状況

Proposed FD-MAC

AP Starts Transmission

- Other nodes who **don't** hear CTSD && hear DI-ACK && want to send data to AP will start their timer.
- The node will send data whose timer will stop first after sensing the channel.
- Just After receiving data from another node AP starts transmission to E.



1

図 2 提案方式（一部）

2) H29 年度の成果

（1）電波資源を極大利用する L2 技術：（1-1）FD によって電力効率化を達成する方式を考案しその詳細を調査した（図 3，図 4）。また，多様なトラフィックを扱うために，ダウンリンクとアップリンクの非対称性を考慮した手法（図 5）を検討した．（1-2）分割・集約トラフィックシェーピング MAC について検討した．（1-3）レートレス符号等と FD を用い，制御信号によっていち早く周波数資源を解放する方式を検討した．また，無線電力搬送とデータ伝送を同時に行うために，複数の AP が連携して電力を供給する方式を設計し詳細に評価した．さらに，無線センシング技術として，周囲の電波状況をセンシングし，人数などを推定する方式の実験を行った．

（2）低コスト性と柔軟性を兼ね備えた L3 技術の開発：（2-1）有線無線ハイブリッドアドホックネットワーク方式：OpenFlow を用いてフロー毎に動的に経路制御を行うことで輻輳回避やリンク障害回避技術を行う方式を設計し，パス遅延や復旧時間などを計測し性能を評価した．（2-2）異種無線システム併用のための仮想化方式：L2 情報を利用したより適切な割り当てを実現する方式拡張を検討した．また，802.11 および Zigbee が混在した環境において動作する手法を開発し，その実現性と性能を検討した．

（3）電波資源を柔軟に利用可能とする L4 技術：時間変動する資源を活用するために，L4 の信頼

性，帯域，遅延に関して基礎検討した。

(4)実験システムによる実証実験：無線通信基礎実験装置を設計して評価実験の準備を行った。特に，デジタルキャンセルに関する実験装置を製作した。

3) H30 年度の成果

(1)電波資源を極大利用する L2 技術：(1-1-1)省電力化の検討：H29 年度で考案した FD による電力効率化を達成する方式を開発し，実装についても検討した。省電力に関してはバックスキヤッタ方式(図6)も検討した。(1-1-2) 端末の多様性を考慮した FD 通信方式：前年度からの継続課題として，多様なトラフィックを扱うために，ダウンリンクとアップリンクの非対称性を考慮した手法の評価を行った。(1-2-1) 符号化方式を高度に利用する方式として，Massive MIMO で利用されるプリコーディングとポストコーディングの割り当て方式を検討した。

提案手法1: LPFD-PKT

□ビーコン間隔毎に 3 つのステップをパケット交換により実行

1. バッファ状態の通知
2. スケジュールの決定
3. データの送受信と到達確認

オーバーヘッドが大きい

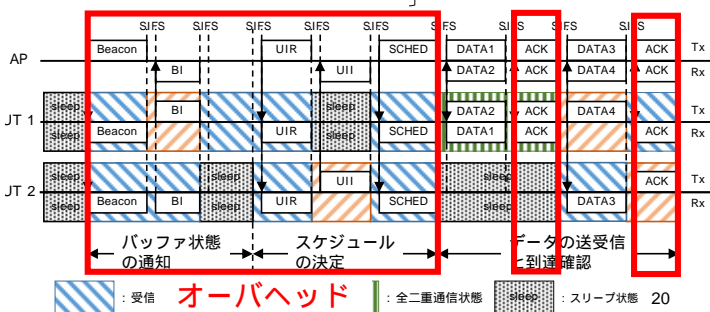


図3 電力効率化を達成する FD 方式

□端末数とエネルギー効率

- 縦軸: BPJ [Mbytes/J]
- 横軸: 端末数 N
- キャンセル回路の消費電力 $P_{cancel,on} = 30.0$ [mW]

- LPFD-PKT, LPFD-FBM は HDPSM, RTS/FCTS よりエネルギー効率が向上
 - 省電力全二重スケジューリングの効果
- LPFD-FBM は端末数が増加しても，高いエネルギー効率を維持
 - 周波数ビットマップによるオーバーヘッド削減の効果

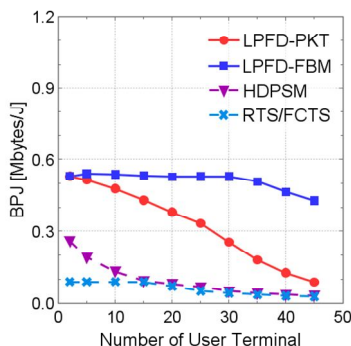


図4 性能評価結果

A. Throughput Analysis (unsaturated condition):

- For a fixed packet arrival rate, the mean throughput increases as the number of UTs increases.
- If AP has downlink data, the probability of having no uplink data within the average waiting time is higher and thus the throughput is higher, if the number of UTs is lower (blue line).
 - However, this probability decreases as the number of UTs increases.

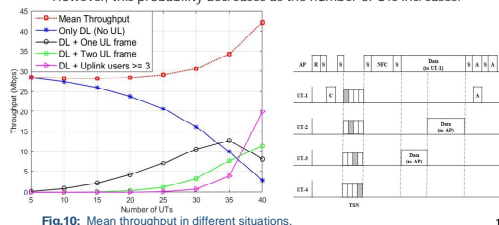


図5 非対称トラフィックを扱うFD方式

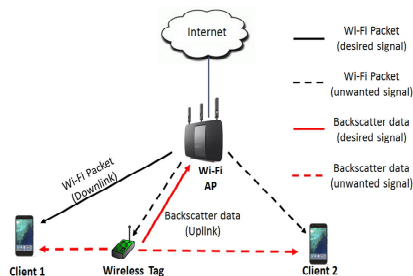


図6 バックスキヤッタ方式

(2)低コスト性と柔軟性を兼ね備えた L3 技術：(2-1) 有線無線ハイブリッドアドホックネットワーク方式：前年度まで取り組んできた方式のまとめを行った．FD 通信では，双方向に通信するトラフィックが存在しないと FD 本来の性能を發揮しきれない．実環境でのアップとダウンの差について得た知見に基づいて，トラフィックを集中/分散させるのが良いかを検討した．(3)電波資源を柔軟に利用可能とする L4 技術の開発：(3-1) 柔軟性を定義する理論モデル：多様なアプリケーションからの種々の要求に応えつつ，時間変動する資源を活用するために，下位層を考慮しながら高信頼性などアプリケーションの要求を満たす L4 通信方式であるトランスポートプロトコルを検討した．特にビデオトラフィックに関してダウンロードのみならずアップロード時の有効な方式（図 7，図 8）を開発した．

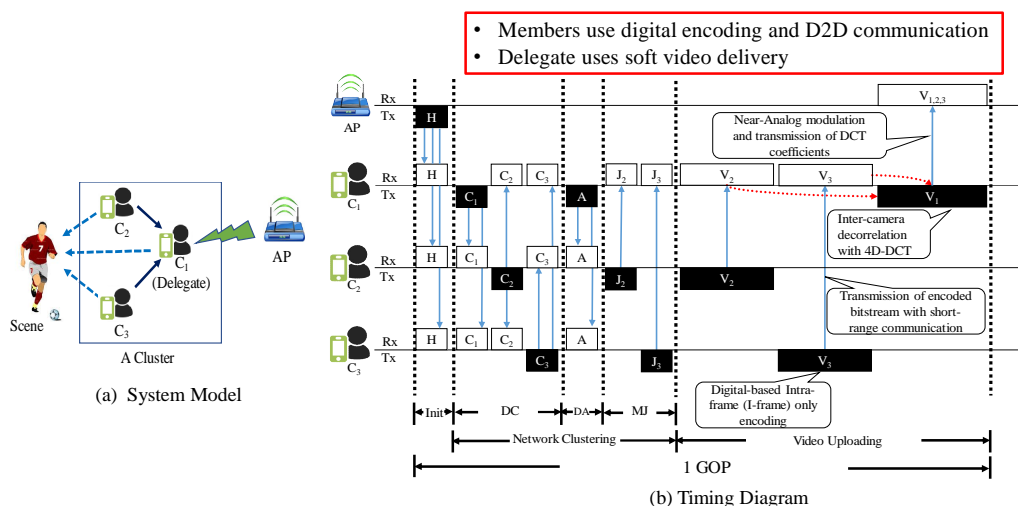


図 7 効果的なアップロード方式

Transmission Power Consumption

- Transmission power consumption is linear to the number of transmission symbols
- Stable channel SNR \rightarrow 18 dB

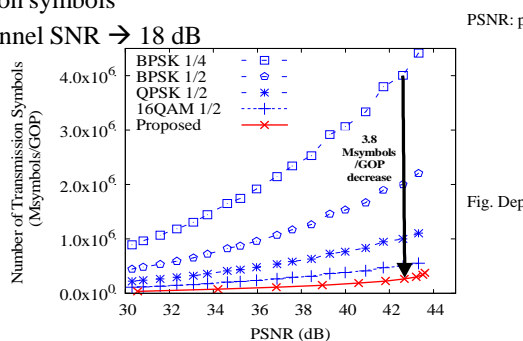


図 8 効果的なアップロード方式の性能

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 12 件) 以下は主な物

- [1] Takuya Fujihashi, Toshiaki Koike-Akino, Takashi Watanabe, Philip V. Orlik, "FreeCast: Graceful Free-Viewpoint Video Delivery", IEEE Transactions on Multimedia, pp. 1-11, 2019. (DOI: 10.1109/TMM.2018.2870074) (査読有)
- [2] Makoto Kobayashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "Buffering Time for Wireless Full-duplex Systems under Random Arrival", IEEE Access, 7, pp. 1208-1223, 2018. (DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2886713) (査読有)
- [3] MD.Abdul Alim, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "In-band Full-Duplex Medium Access Control Protocol for Asymmetric Traffic in Wireless LAN", Wireless Networks, Springer, pp. 1-16, 2018. (DOI: 10.1007/s11276-018-1827-8) (査読有)
- [4] Than Than Nu, Takuya Fujihashi, Takashi Watanabe, "A Traffic Reduction Method for Crowdsourced Multi-view Video Uploading", IEEE Access, 6, pp. 36544-36556, 2018. (DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2852293) (査読有)
- [5] Makoto Kobayashi, Ryo Murakami, Kazuhiro Kizaki, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "Wireless Full-duplex Medium Access Control for Enhancing Energy Efficiency", IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2, pp. 205-221, 2018.

(DOI:10.1109/TGCN.2017.2756883) (査読有)

[6] Takuya Fujihashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "Multi-view Video Transmission over Underwater Acoustic Path", IEEE Transactions on Multimedia, pp. 1-16, 2018. (DOI: 10.1109/TMM.2018.2791800) (査読有)

[7] Md. Abdul Alim, Makoto Kobayashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "In-band Full-duplex Medium Access Control Design for Heterogeneous Wireless LAN", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, pp. 1-22, 2017. (DOI: 10.1186/s13638-017-0867-6) (査読有)

〔学会発表〕(計 43 件) 以下は主な物

[1] Takumi Uekumasu, Makoto Kobayashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "An Access Strategy for Downlink and Uplink Decoupling in Multi-channel Wireless Networks", The Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC'17), 2017. (査読有)

[2] Md. Abdul Alim, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "Backscatter MAC Protocol for Future Internet of Things Networks", IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (IEEE WiMob'17), 2017. (査読有)

[3] Kazuki Ginnan, Keita Kawano, Kazuhiko Kinoshita, Takashi Watanabe, "Access Point Virtualization for Multiple Services in Heterogeneous WLANs", The 14th Annual IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), 2017. (査読有)

[4] Md. Abdul Alim, Takashi Watanabe, "Full Duplex Medium Access Control Protocol for Asymmetric Traffic", 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference(VTC2016-Fall), 2016. (査読有)

[5] Ryo Murakami, Makoto Kobayashi, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "An Energy Efficient MAC for Wireless Full Duplex Networks", 2016 IEEE Global Communication Conference the first International Workshop on Full Duplex Wireless Communications (IEEE GLOBECOM WS FDWC), 2016. (査読有)

[6] 村上 遼, 小林 真, 渡辺 尚, "無線全二重通信におけるエネルギー消費効率化のための MAC プロトコルの基礎検討", 情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOMO2016), 5H-4, 2016. (査読無)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：猿渡 俊介

ローマ字氏名：Shunsuke Saruwatari

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大阪大学情報科学研究科

職名：准教授

研究者番号 (8 桁) : 50507811

(2)研究分担者

研究分担者氏名：廣田 悠介

ローマ字氏名：Yusuke Hirota

所属研究機関名：大阪大学 (H29 より情報通信研究機構)

部局名：情報科学研究科

職名：助教

研究者番号 (8 桁) : 20533136

(3)研究分担者

研究分担者氏名：木下 和彦

ローマ字氏名：Kazuhiko Kinoshita

所属研究機関名：徳島大学

部局名：ソシオテクノサイエンス研究部

職名：教授

研究者番号 (8 桁) : 40304018

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。