

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11774

研究課題名（和文）異種無線ネットワーク間の有機的連携に基づく大規模無線アクセス網の構成法

研究課題名（英文）A Construction Method of Large-Scale Wireless Access Networks Based on Adaptive Cooperation among Heterogeneous Wireless Networks

研究代表者

谷川 陽祐（TANIGAWA, Yosuke）

大阪公立大学・大学院情報学研究科 准教授

研究者番号：90548497

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：多数の無線LANと、無線LANより通信容量は小さいがカバレッジが広い広域カバレッジ型無線ネットワークを有機的に連携させて無線チャンネルの利用効率化を図ることで、それらで構成された無線アクセス網に収容可能なユーザ端末数を向上できることを示した。無線LANが相互電波干渉する環境でも同時伝送が可能なデータフレーム等は無線LAN、それら以外のデータフレームは広域カバレッジ型無線ネットワークをそれぞれ選択して伝送する方式や、制御フレームを広域カバレッジ型無線ネットワークで伝送するだけで経路設定とチャンネル利用予約を行った後に、データフレームを高伝送レートの無線LANチャンネルで無衝突伝送する方式等確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究期間中に無線LANでは新たに6 GHz帯のチャンネルが利用可能になり、IEEE 802.11ah準拠の製品も販売され、次世代のIEEE 802.11be規格では複数の周波数帯を同時に利用することでデータ伝送速度や遅延を改善することが検討されている等、複数の無線ネットワーク、周波数帯を有効利用することの重要性が増している。このような状況に対し、本研究成果は複数の無線ネットワークや周波数帯の利用法に関する1つの解を示すとともに、今後のより有効、効率的な複数の無線ネットワークや周波数資源の活用に対し、学術的研究の促進と社会実装の両面で貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The number of user terminals that can be accommodated in a wireless access network consisting of wireless LANs and a wide-area coverage type wireless network, which has smaller transmission capacity but wider coverage than wireless LANs, is demonstrated to be increased by the efficiently use wireless channels with this research achievement. We designed a network selection method that transfers data frames, which can be transmitted simultaneously even in environments where wireless LANs interfere with each other, with wireless LANs, and transfers the other frames with a wide-area coverage type wireless network. In another representative method, collision-protected data frame transfer with wireless LAN channels with larger transmission capacity is achieved, only by a two-way handshake between data frame transmitter and receiver stations with a wide-area coverage type wireless network.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：無線LAN IEEE 802.11ax 広域カバレッジ型無線ネットワーク ネットワーク間連携 高密度配置

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、スマートフォンやタブレット機器、ノートPC等のユーザ端末が送受信するデータ量が増加し続けており、大量のデータを収容可能な無線アクセス網の整備が必須である。大量のデータを収容するために多数の無線LANが街中等に配置されているが、高密度に配置された無線LAN間で電波干渉が発生し実効通信容量が低下するため、無線LAN間の電波干渉を回避し各ユーザ端末が必要とする通信容量を確保する必要がある。一方、無線通信の利用周波数帯を従来の2.4GHz、5GHz帯以外にも拡大させて無線通信容量を向上させる取り組みとして、テレビホワイトスペースやサブギガヘルツの周波数帯を用いたIEEE 802.11afやIEEE 802.11ahの無線ネットワークが新たに規格化されている。これらの無線ネットワークは、無線LANより総通信容量は小さいが無線通信距離が大きく1つの基地局で提供できるカバレッジが広いという特徴をもつ(そのため、これら無線ネットワークを以後「広域カバレッジ型無線ネットワーク」または「長距離無線ネットワーク」と総称、記述する)。しかし、この広域カバレッジ型無線ネットワークの具体的な活用法は十分に検討されておらず今後の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究は、相互に電波干渉するほど高密度に配置された多数の無線LAN、および無線LANより総通信容量は小さいがカバレッジが広い広域カバレッジ型無線ネットワークを有機的に連携させて無線チャネルの利用効率化を図ることで、ネットワークに収容可能なユーザ端末の上限数を向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

まず、我々が事前に提案している複数フレームの同時伝送法やIEEE 802.11ax規格で導入されたOrthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)伝送を用いて、近接無線LAN間で連携して相互電波干渉の影響を最小化しつつ各無線LANの通信容量を向上させる方式を確立する。その後、無線LANと長距離無線ネットワーク間で連携し、上記の複数フレーム同時伝送法の効率的動作に有効なデータフレーム等は無線LAN、有効な同時伝送が行えない等で効率的動作に支障をきたすデータフレームは長距離無線ネットワークをそれぞれ選択して伝送する制御法、さらにはデータフレーム伝送の経路や期間等に関する情報を格納した制御フレームを長距離無線ネットワークで伝送する処理だけで伝送経路設定と無線チャネルの利用予約を行った後に、データフレームを高伝送レートの無線LANチャネルでマルチホップ伝送する方式等を確立する。

4. 研究成果

主な研究成果として、無線LANと長距離無線ネットワーク間連携について、データフレーム伝送の経路や期間等に関する情報を格納した制御フレームを長距離無線ネットワークで伝送する処理だけで伝送経路設定と無線チャネルの利用予約を行った後に、データフレームを高伝送レートの無線LANチャネルでマルチホップ伝送する方式の成果を以下で説明する。

本提案方式における想定環境を図1に示す。この図において、緑色、青色で表記されているリンクはそれぞれ無線LAN、長距離無線ネットワークを用いた通信である。複数の端末局が1つの基地局へ接続し、それら各局は無線LANおよび長距離無線ネットワークの両網での通信機能をもつ無線アクセス網を想定する。なお、長距離無線ネットワークはIEEE 802.11afまたはIEEE 802.11ah相当の通信距離とチャネル伝送レートをもつことを想定する。

端末局が無線LANの通信範囲外に位置する場合でも、長距離無線ネットワークを利用することで基地局と通信できるが、チャネル伝送レートは無

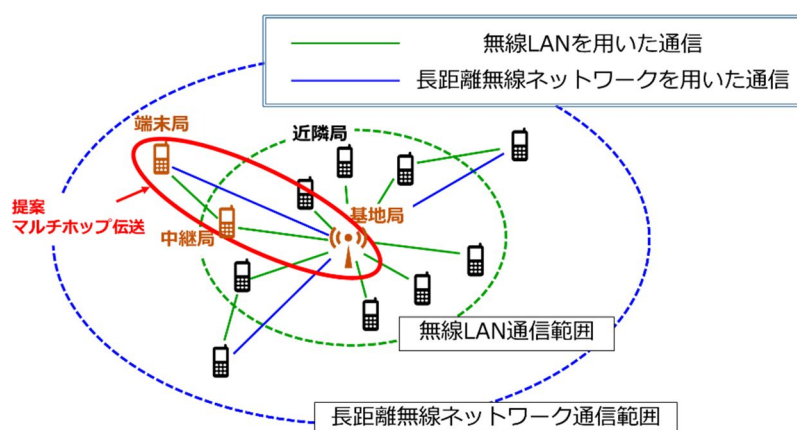


図1 本提案方式の想定環境

線LAN通信を用いた場合より低下する。本研究では、無線LANの通信範囲外に位置する端末局と基地局間の通信について、図1に示すように、無線LAN通信を用いたマルチホップ伝送を無線LAN通信範囲内に存在する端末局(中継局)を経由して行うことで、より高い伝送レートで実現

する方式を提案した。マルチホップ伝送を行うためにはその伝送経路を設定する処理を追加する必要があり、フレーム送信頻度の増加によりフレーム衝突の危険性も増すが、本提案方式では長距離無線ネットワーク上で Longer-Distance Request To Send/Longer-Distance Clear To Send (LDRTS/LDCTS) という制御フレームを用いた簡易なハンドシェイクを行うだけで、伝送経路設定と無線 LAN チャンネルを排他的に利用するためのチャンネル予約を行うことによるフレーム衝突回避を実現した。以下では、最も簡易な制御でマルチホップ伝送を実現する手法として、マルチホップ伝送の中でも特に 2 ホップ伝送を実現する手法について述べる。ただし、制御フレームに中継局を複数記載してハンドシェイクを行うことで本手法は 3 ホップ以上の伝送にも対応可能である。

下りマルチホップ伝送の手順を図 2 に示す。なお、この図において緑色、青色で表記されているフレームはそれぞれ無線 LAN、長距離無線ネットワークを用いて伝送されることを意味し、この表記法は図 3 でも同様とする。送信基地局は、バックオフ待機を終えると長距離無線ネットワークを用いて LDRTS を送信する。ここで、LDRTS の Duration フィールドを、中継端末局が ACK を送信し始める

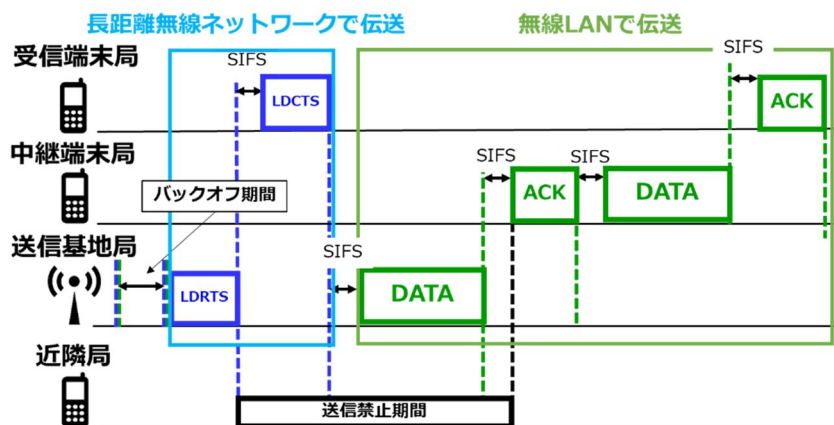


図 2 下りマルチホップ伝送の流れ

までの期間に設定する。受信端末局は LDRTS を受信すると、後述の処理により直後のマルチホップ伝送で利用する中継端末局を選択し、その中継端末局の MAC アドレスを記載した LDCTS を SIFS 期間後に長距離無線ネットワークを用いて送信基地局へ返信する。下りマルチホップ伝送で用いる LDCTS には中継局の MAC アドレスを記載するフィールドが用意されており、受信端末局が選択した中継端末局の MAC アドレスを記載する。中継端末局はこの LDCTS を受信することで自局が中継端末局として選択されたことを認識し、中継を行う状態へ移行する。一方、マルチホップ伝送に関与しない上記以外の近隣局は、LDRTS を傍受するとその Duration フィールドに記載されている期間だけ送信禁止状態に移行する。そして、LDCTS を受信した送信基地局は SIFS 期間後に無線 LAN を用いてデータフレームを中継端末局へ送信し、以降は図 2 に示す手順に従って、無線 LAN 通信を用いたマルチホップ伝送により受信端末局へデータフレームを伝送する。

上りマルチホップ伝送の手順を図 3 に示す。送信基地局は、バックオフ待機を終えると長距離無線ネットワークを用いて LDRTS を送信する。ここで、上り伝送の場合、近隣局はこの LDRTS を傍受しても送信禁止状態に移行しない。これは、以下で行うデータフレームのマルチホップ伝送による電波干渉の影響を受けない領域に存在する局が不必要に送信禁止状態に移行することを防ぐためである。

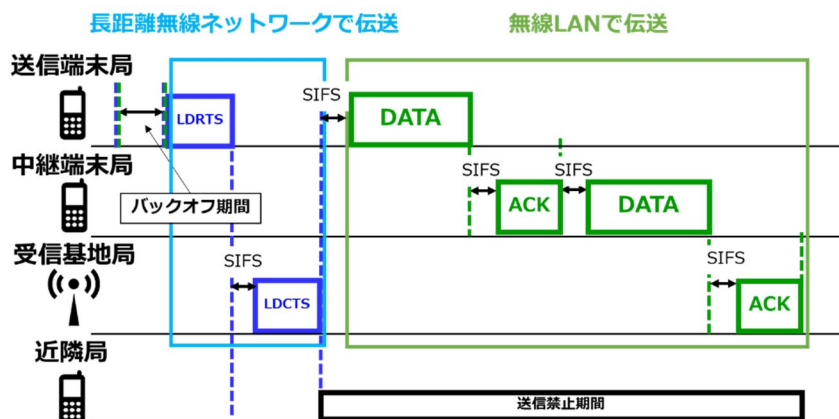


図 3 上りマルチホップ伝送の流れ

る。ただし、LDRTS の Duration フィールドには、1 ホップ目のデータフレームおよび ACK の伝送期間に SIFS 期間の 2 倍を加えた期間を設定する。受信基地局は 1 ホップ目のデータフレーム伝送に用いる伝送レートがわからず当該伝送に要する期間を算出できないが、受信した LDRTS の Duration フィールドにより当該期間を知ることができ、当該期間に 2 ホップ目のデータフレームおよび ACK の伝送期間、さらに SIFS 期間の 2 倍を加えた期間を LDCTS の Duration フィールド

ドに記載し、その LDCTS を送信端末局へ返信する。LDCTS を受信した送信端末局は SIFS 期間後に無線 LAN を用いてデータフレームを中継端末局へ送信し、以降は図 3 に示す手順に従って、無線 LAN 通信を用いたマルチホップ伝送により受信基地局へデータフレームを伝送する。

無線 LAN 通信範囲外の端末局は、本提案方式のマルチホップ伝送を行う際に利用する中継局の候補を予め探索しておき、LDRTS/LDCTS ハンドシェイクの処理中において後続のマルチホップ伝送に利用する中継局を選択する。具体的には、無線 LAN 通信範囲内端末局から無線 LAN 通信を用いて基地局へ送信されるフレームを傍受すると、当該端末局を中継局候補とし、当該端末局から受ける受信電力、当該端末局と基地局間の無線 LAN 通信で利用されているチャンネル伝送レート、当該端末局の MAC アドレスに関する情報を取得、管理し、これらの情報を用いてマルチホップ伝送で利用する中継局を選択する。

中継局の選択法として、以下の MAX POWER および ROUND-ROBIN 方式を提案した。MAX POWER 方式では、基地局との無線 LAN 通信で利用されているチャンネル伝送レートが最も高い中継局候補の端末局、そのような端末局が複数存在した場合はその中で受信電力が最も大きい端末局を、マルチホップ伝送の中継局として選択する。ROUND-ROBIN 方式では、基地局との無線 LAN 通信で利用されているチャンネル伝送レートが高い中継局候補の端末局から順に、またチャンネル伝送レートが同一の中継局候補間では受信電力が大きい順に上位 N 局の端末局から 1 局ずつ切り替えて中継局として利用する。MAX POWER 方式と異なり、中継局を切り替えることで中継時の通信負荷を分散させる設計になっている。ただし、無線 LAN 通信範囲外の各端末局の近隣に無線 LAN 通信範囲内の端末局が存在しない、存在しても無線 LAN 通信を行わないために当該端末局の情報が得られない等の理由で中継局候補の端末局が全く探索できない場合、無線 LAN 通信範囲外の端末局は長距離無線ネットワークを使用して基地局と直接通信するものとする。

本提案方式の性能を、QualNet 9.0 を用いた計算機シミュレーションにより評価した。基地局を原点とした極座標において、基地局からの無線 LAN 通信範囲内に 20 局の端末局 (ID : 1, 2, ..., 20) を偏角が $2 \times (i - 1)/20$ (i は ID) となるように、また無線 LAN 通信範囲外に 20 局の端末局 (ID : 21, 22, ..., 40) を偏角が $2 \times (i - 21)/20$ となるようにそれぞれ配置した。ID 1-20 の端末局は基地局から 180 - 250 m の範囲、ID 21-40 の端末局は基地局から 360 - 430 m の範囲で、各端末局と基地局間の距離をランダムに設定した。これは、ID 21-40 の端末局が最低でも中継局を 1 局確保可能な設定となっている。無線 LAN で用いるチャンネルの周波数帯域と伝送レート、および通信可能距離は、それぞれ 2.4 GHz と 18 Mbps、および 356.973 m とした。一方、長距離無線ネットワークで用いるチャンネルの周波数帯域と伝送レート、および通信可能距離は、それぞれ 670 MHz と 8 Mbps、および 657.790 m とした。シミュレーション時間は 300 秒に設定した。本性能評価ではチャンネル伝送レートが固定されているため、MAX POWER 方式、ROUND-ROBIN 方式において無線 LAN 通信範囲外の各端末局は通信範囲内の端末局から受ける受信電力のみに基づいて中継局を選択する。

各端末局、基地局からそれぞれ上り、下り方向に Constant Bit Rate (CBR) フローを発生させ、それぞれ基地局、各端末局へ伝送した。具体的には、平均 $1/\mu$ の指数分布に従うランダムな時間間隔で CBR フローが発生し、一度フローが発生すると平均 $1/\mu$ の指数分布に従うランダムな期間だけ継続する。 $\lambda = 0.07$ 、 $\mu = 0.08$ に設定し、各フローにおいて 1,460byte のパケットを 0.12 秒間隔で発生させた。

提案方式のマルチホップ伝送を中継局の選択法に MAX POWER 方式および ROUND-ROBIN 方式 ($N = 3$ に設定)を用いて行う方式(それぞれ ``MAX POWER`` および ``ROUND-ROBIN``)を、経路設定を静的に行う方式(``STATIC ROUTING``) および無線マルチホップ網で用いられる代表的な Reactive 型ルーティングプロトコルである Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) を用いて行いながらマルチホップ伝送を無線 LAN のみを用いて行う方式(``AODV``)と比較した。STATIC ROUTING 方式では、無線 LAN 通信範囲外に位置する ID 21, 22, ..., 40 の各端末局がそれぞれ ID 1, 2, ..., 20 の端末局を中継局として選択するよう経路を静的に設定する。提案方式では、シミュレーション開始時において無線 LAN 通信範囲外に位置する端末局は STATIC ROUTING と同様の中継局を選択してマルチホップ伝送を行えるものとし、中継局候補の情報が得られると MAX POWER 方式または ROUND-ROBIN 方式に基づいてより適切な中継局を選択する。AODV 方式において、作成された経路表の各エントリは最後に参照されてから 3、15 秒経過後に、それぞれ無効化、削除される。これらは RFC の推奨値である。また、無線 LAN 通信範囲外の端末局に対して IP 転送を行わない設定にした。これは、無線 LAN 通信範囲外の端末局を経由した経路の構築を防止するためである。

無線 LAN 通信範囲外の端末局数を 2 局から 20 局の範囲で 2 局ずつ増やすことでマルチホップ伝送のフロー数を増加させながら、各方式の性能を評価した。下りおよび上り通信におけるアプリケーション層で観測されたパケット到達率、End-to-End パケット伝送遅延の結果を図 4 から 7 に示す。図中の凡例について、(In)、(Out) はそれぞれ無線 LAN 通信範囲内、範囲外の端末局に関する結果を意味する。これらの結果より、提案方式を用いた MAX POWER 方式、ROUND-ROBIN

方式において、無線 LAN 通信範囲内外の端末局に関する上下フローの packets 到達率および伝送遅延が比較方式より改善することが確認できる。この理由として、提案方式により無線 LAN 通信範囲外の端末局と基地局間でのマルチホップ伝送を、無線 LAN チャンネルを排他的に利用しながら他フレームとの衝突や中継局におけるバックオフ待機を生じさせずに効率的に行えることが挙げられる。さらに、このマルチホップ伝送により無線 LAN チャンネルの効率的利用や無線 LAN 通信範囲内の端末局が送受信するフレームとの衝突回避も行えるため、無線 LAN 通信範囲内の端末局に関する packets 到達率および伝送遅延も改善されたと考えられる。提案方式間の比較では、ROUND-ROBIN 方式が MAX POWER 方式よりもわずかに良い性能を示した。これは、MAX POWER 方式では無線 LAN 通信範囲外の各端末局から中継局として選択される端末局は 1 局に絞られ、フレーム中継負荷が集中するのに対し、ROUND-ROBIN 方式では中継局候補間で負荷分散が図られることに起因すると考えられる。一方で、AODV 方式と STATIC ROUTING 方式では、シングルホップフローとマルチホップフロー間でもフレーム衝突が発生し、マルチホップ伝送の中継局でもバックオフ待機が生じるため、packets 到達率、伝送遅延ともに提案方式より悪化する。AODV 方式では、伝送経路設定を行うための制御パケット伝送によりフレーム衝突頻度がさらに増大し、また衝突したデータフレームの再送試行回数が再送上限に達した場合はリンクが切断されたと判断し、送信局にバッファリングされたパケットが全て削除される。よって AODV 方式の方が STATIC ROUTING 方式より packets 到達率がさらに低下する状況が多い。一方、伝送遅延については、受信局まで到達したパケットのみをサンプルとした結果として算出され、上記のようなバッファリング中に削除されたパケットは伝送遅延の結果に反映されないため、AODV 方式の方が STATIC ROUTING 方式より小さい値を示している。

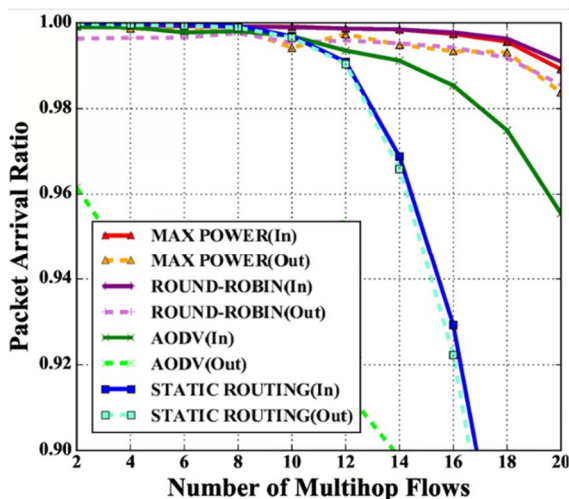


図 4 下りパケット到達率

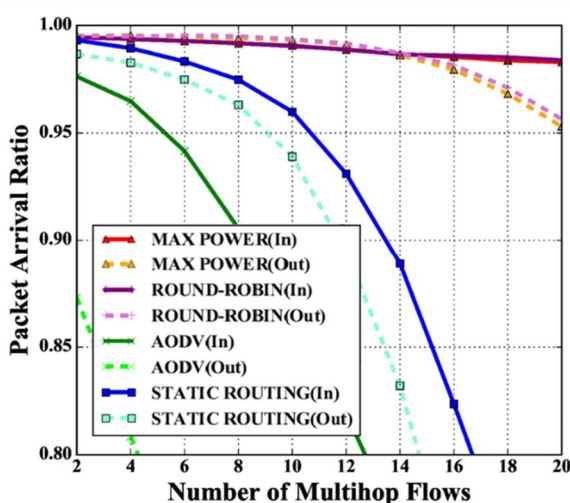


図 5 上りパケット到達率

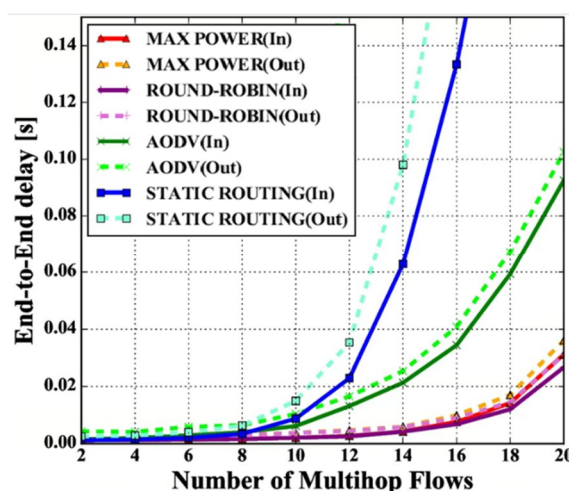


図 6 下りパケット伝送遅延

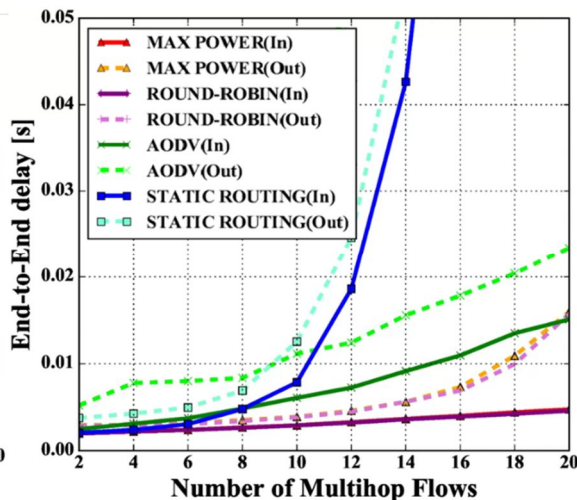


図 7 上りパケット伝送遅延

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 R. Takahashi, Y. Tanigawa, and H. Tode	4. 巻 E104.B
2. 論文標題 Uplink Frame Transmission with Functions of Adaptive Triggering and Resource Allocation of OFDMA in Interfering IEEE 802.11ax Wireless LANs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 664-674
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020EBT0006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 H. Yamakata, Y. Tanigawa, and H. Tode
2. 発表標題 Selective OFDMA Transmission Method Based on Downlink Communication Quality Requirements in IEEE 802.11ax Wireless LANs
3. 学会等名 2024 IEEE 21st Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2024) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山方颯人, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 IEEE 802.11ax無線LANにおける端末局の通信品質要求を考慮した下りOFDMA伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 123, no. 107, NS2023-40
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤田樹生, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 複数無線LANが相互干渉する環境における長距離無線ネットワークとの連携に基づく端末局の接続切替制御法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 122, no. 406, NS2022-184
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山方颯人, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 IEEE 802.11ax 無線LANにおける端末局の通信品質要求を考慮した下りOFDMA伝送法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2023総合大会講演論文集, B-6-69
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 辻浦沙季, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 長距離無線通信の支援による無線LANマルチホップ伝送における否定的ハンドシェイク応答の導入および中継局のフレーム優先送受信法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 433, NS2021-143
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 辻浦沙季, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 長距離無線通信の支援と中継局からのフレーム優先送信を導入した無線LANマルチホップ伝送法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2021総合大会講演論文集, B-6-56
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Nagayoshi, Y. Tanigawa, and H. Tode
2. 発表標題 A Collision-Protected Multihop Frame Transmission Method with Wireless LAN Communication Supported by Longer-Distance Wireless Communication
3. 学会等名 The 45th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高橋良一, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 相互干渉する複数のIEEE 802.11ax無線LAN環境における送信フレームバッファリング量と複数フレーム同時伝送の可能性を考慮したOFDMA伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 413, NS2020-166
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永吉涼佑, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 長距離無線通信の支援によるチャネル予約と中継局選択を導入した無線LAN通信による衝突防止型マルチホップ伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 120, no. 413, NS2020-167
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田樹生, 谷川陽祐, 戸出英樹
2. 発表標題 複数無線LANが相互干渉する環境における長距離無線ネットワークの支援による伝送スループット向上法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2021年総合大会講演論文集, B-6-8
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	戸出 英樹 (TODE Hideki) (20243181)	大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (24403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------