

密集無線 LAN 環境における再送を考慮した 送信電力・信号検知閾値制御の検討

坂井 渉太¹ ZHAO WEN CHOW¹ 重野 寛¹

概要：密集無線 LAN 環境では、それぞれノードの通信範囲が重複し、重複した箇所では隠れ・さらし端末問題が発生する。また、隠れ・さらし端末問題はノードの密集度の増加にしたがって深刻化し、スループット性能の低下が著しくなる。このような密集環境で発生する問題に対して、送信電力、信号検知閾値を制御し、通信範囲を縮小することで周波数資源を効率的に利用することで、スループット性能を改善することができる。既存研究では、通信範囲を最小化することでスループット性能を向上させたが、隣接するノード間の干渉が考慮されておらずスループット性能が悪化する端末が発生していた。本稿では、再送を考慮し動的に送信電力、信号検知閾値を制御する。本制御では、再送率を受信ノード側の他 BSS ノードによる干渉の大きさの指標とし、他 BSS ノードによる再送率が悪化しない範囲で通信範囲を縮小をするように制御することで、各ノードのスループット性能の向上させる。

A Study of Transmit Power Control and Dynamic Sensitivity Control Considering Retransmission in dense Wireless LAN

SHOTA SAKAI¹ ZHAO WEN CHOW¹ HIROSHI SHIGENO¹

1. はじめに

近年、無線 LAN の普及により、無線 LAN を使用するノードは増加している。無線 LAN 利用ノードの増加に伴い、1つのアクセスポイント (AP) と複数台のステーション (STA) からなる Basic Service Set (BSS) は密集化している。また、アプリケーションも多様化しトラフィック量も増加している。このような密集環境では、それぞれのノード同士の通信範囲が重複し、重複した領域では、通信の衝突や送信機会の抑制を引き起こす隠れ・さらし端末問題が発生する。隠れ・さらし端末問題はノードや BSS の密集度合いに比例し、本来の無線 LAN のスループット性能から著しく低下させる。

そこで、新たに IEEE 802.11ax 規格 [1] では、伝送速度の向上を目的とした、フレームアグリゲーション、変調方式と符号化率 (Modulation and Coding Scheme: MCS) の拡張、ビームフォーミングや MIMO (Multiple Input

Multiple Output) が採用された。加えて、密集環境におけるスループット性能の低下問題の解決に向けて、周波数資源や時間を効率的に活用する空間再利用 (Spatial Reuse) に関する手法が採用された。空間再利用に関する主な手法は、送信電力制御 (TPC) と信号検知閾値制御 (DSC) の2つである。送信電力制御では、受信ノードにおける受信可能な SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) を保証する範囲で送信電力を削減することでノード間の干渉電力を抑制する。信号検知閾値制御では、検知可能な信号検知範囲を拡大、縮小することで隠れ・さらし端末問題を最大限改善する。このように送信電力・信号検知閾値制御を行うことで密集環境における問題が改善しスループット性能の向上が期待されている。送信電力、信号検知閾値制御に関する研究では、密集環境における隠れ・さらし端末問題を改善することでスループット性能を向上させた。しかし、送信電力、信号検知閾値制御によるチャネル状態の変化に伴う SINR の低下、再送率の増加を考慮している研究は少ない。

そこで本稿では、密集無線 LAN 環境における再送を考

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University, Yokohama, kanagawa, 223-8522, Japan

慮した送信電力・信号検知閾値制御を提案する。密集環境における CSMA/CA の信号検知範囲外からの干渉は、検知範囲が縮小するにつれて強くなる。また、送信電力制御において送信電力を削減することで、受信時の RSSI と SINR が減少するためスループット性能が従来の 802.11 規格と比較して低下する端末が発生する。よって、本制御では送信電力・信号検知閾値を動的に制御し干渉電力や送信電力制御による SINR の低下に伴う再送率増加が発生しないように通信範囲を縮小する。また周辺ノードの送信電力・信号検知閾値やトラフィック量の変化に伴う干渉電力の変化に対応し通信範囲を拡大することでスループット性能の向上を図る。

本稿では、第 2 章では、送信電力制御、信号検知閾値制御について紹介する。第 3 章では提案手法を説明し、第 4 章では、密集環境を想定したシミュレーション評価を行う。第 5 章では結論を述べる。

2. 関連研究

本章では、送信電力制御、信号検知閾値制御の既存研究について説明する。はじめに、送信電力制御、信号検知閾値制御による効果について述べる。

● 送信電力制御

送信電力制御では、周囲に対しての送信電力の到達範囲を制御する。送信電力を適切に制御することで、自身の通信の品質を損なうことなく、周囲に与える影響を削減し全体のスループット性能を向上させることができる。以下に、密集環境における送信電力制御の効果を示す。

－ 送信電力を増加させた場合

自身の通信相手で観測される SINR が高くなる。一方で、周囲のノードに対する干渉が増え、さらし端末問題が悪化する。

－ 送信電力を減少させた場合

周囲のノードに対する干渉が減り、さらし端末問題が改善する。一方で、自身の通信相手で観測される SINR が低下し、PER が悪化する。

● 信号検知閾値制御

信号検知制御では、チャンネルの状態を判定する閾値である CCAT を制御することで送信機会の創出を行う。CSMA/CA では、チャンネルを IDLE 判定とする条件を以下の 3 つとしている。

- － $-82\text{dBm}/20\text{MHz}$ (信号検知閾値) 以上の 802.11 プリアンブルを検知しない
- － $-62\text{dBm}/20\text{MHz}$ 以上のあらゆる電波が受信されない
- － RTS/CTS によって予約されていない時間帯である

これらの条件をすべて満たしたとき、チャンネルを IDLE と判定する。図 1 に密集環境における信号検知閾値制

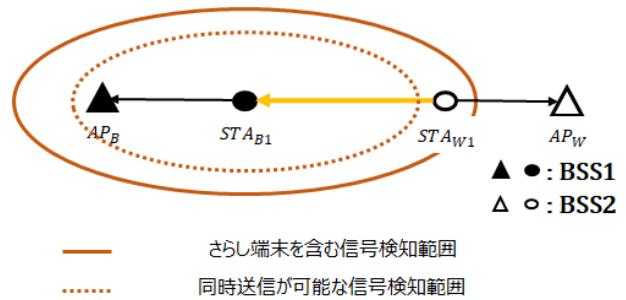


図 1: 密集環境における信号検知閾値制御

御について示す。密集環境では、BSS 同士が隣接しているため、他 BSS ノードによる送信によって -82dBm 以上の 802.11 プリアンブルを検出し、自身の BSS 内で送信を行っているノードが存在していなくても Busy 状態と判定され不要な送信機会の抑制が発生する。このような状態をさらし端末といい、BSS 同士が隣接する度合いに比例してさらし端末による影響が悪化する。そこで、信号検知閾値制御では信号検知閾値を上げて、他 BSS による送信を無視することでチャンネルを IDLE 状態と判定しさらし端末問題を解決する。

送信電力制御、信号検知閾値制御について説明したが、802.11ax では明確な手法が決められていない。そこで、密集環境を想定した送信電力・信号検知閾値制御に関する研究がされている。ACK の送信電力制御 [3] では、隣接するノードからの干渉電力を推定し、干渉電力を考慮した送信電力に決定した。通信相手との受信電力強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) を基準にした信号検知閾値制御 [4] [5] では、干渉電力をマージン値としてヒューリスティックに最適なマージン値を決定した。送信電力と信号検知閾値を反比例制御する研究 [6] では、想定した環境におけるスループットモデルから、反比例定数 (IPS) を算出し制御することで大幅にスループット性能を向上させた。

最後に、送信電力と信号検知閾値を連動制御する Minimum Exposed Terminal Control (MiET) [7] [8] について説明する。送信電力制御では、対象となるノードとの伝搬損失から送信電力を対象ノードにおける受信時の RSSI が決められた値になるように送信電力を削減する。そして、信号検知閾値制御では、削減した送信電力量に連動させて信号検知閾値を従来の 802.11 規格の信号検知閾値から増加させる。このように通信範囲を通信相手との伝搬損失を基準に最小化させたことでスループット性能を向上させた。

これらの研究では、送信電力を下げて、信号検知閾値を上げることでさらし端末問題を改善し送信機を増加させることでスループット性能を向上させた。しかし、密集環境において、送信電力・信号検知閾値制御によって変化したチャンネル状態を考慮した研究例は少ない。

3. 提案

本章では、密集無線 LAN 環境における再送を考慮した送信電力・信号検知閾値制御について説明する。

3.1 提案概要

本制御では、送信電力・信号検知閾値制御によって SINR が低下し再送率が増加することに着目し、再送率を基準に動的に送信電力・信号検知閾値を更新することで通信範囲の過度な縮小を抑制する。本制御の目的は、隠れ端末や、隣接するノードからの干渉によって再送が増加しない範囲において、送信機会を増加させることでスループット性能を向上させることである。送信電力制御では、再送率が悪化しない範囲で送信電力を削減し周囲のノードに対する干渉を削減し、周囲のノードの SINR を改善する。送信電力制御において、自身の通信品質を落としている。そこで、信号検知閾値制御では、自身の送信電力を削減し SINR を落とす代わりに、信号検知閾値を上げて検知範囲を縮小することで、送信機会を増加させ、自身のスループット性能の向上させる。はじめに、基準とする再送率について説明する。次に、再送率を基準にした送信電力・信号検知閾値の更新手法について説明する。最後に動的な更新アルゴリズムについて説明する。

3.2 再送率の算出

無線 LAN における再送は、ACK フレームのタイムアウトとブロック ACK フレームによる選択的再送によって行われる。また、送信したフレームが再送となると、そのノードでは CW サイズを 2 倍に設定し、再送を行う。本提案では、1 つのフレームを送信する際に発生した再送回数から、ノード i の再送率 P_r を定義する。

$$P_r[\%] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m n_k \cdot 100[\%] \quad (1)$$

このとき、送信したフレーム数を m 個、各フレーム k の再送回数を n_k とする。ただし、フレームアグリゲーションを行う場合、アグリゲーション後のフレームに対して再送率を算出する。

3.3 送信電力・信号検知閾値の更新

本提案では、通信範囲の過度な縮小によって再送率が増加すると仮定し、再送率を基準に通信範囲の拡大、縮小を決定する。図 2a より、再送率が高いと判定されたノードに対しては、送信電力を増加、信号検知閾値を減少させる。送信電力を上げることで、SINR を改善、信号検知範囲を拡大することで、隣接するノードとの通信の競合を改善させ、受信確率を保証し再送率を改善する。図 2b より、再送率が低いと判定されたノードに対しては、送信電力を減

少、信号検知閾値を増加させる。送信電力を下げることで、干渉を削減し、信号検知閾値を増加させることで信号検知範囲を縮小させ送信機会の創出を図る。よって、既存研究で考慮していない帯域の占有・枯渇、過度な通信範囲の縮小に対して、再送率による判定を導入し、帯域の占有を抑制し、帯域が枯渇するほど密集している場合は各ノードにおいて送信機会の創出は行わず、再送率を保証することで各ノードのスループット性能の改善を図る。

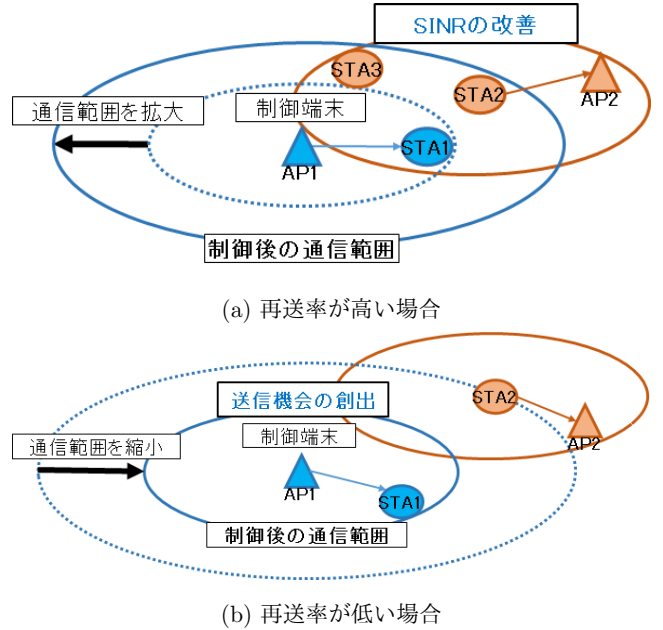


図 2: 送信電力・信号検知閾値制御の効果

3.4 動的な更新アルゴリズム

密集環境におけるチャネル状態は変化し、SINR は変動する。特に、密集環境において送信電力、信号検知閾値を行う場合、自身の制御に周囲の送信電力・信号検知閾値制御によるチャネル状態の変化を考慮する必要がある。よって、本制御では AP がビーコンフレームを送信する間隔である 100ms を基準にビーコンフレーム間隔毎に再送率を計算し送信電力と信号検知閾値を更新することで、変化するチャネル状態に合わせることができる。

アルゴリズム 1 に送信電力、信号検知閾値の更新の流れを示す。全ノードにおいて、あらかじめ再送率を判定する閾値 U_r 、 L_r を定義する。そして、現在の再送率を P_r としたときに U_r 、 L_r と比較する。上限の閾値である U_r よりも大きい場合は再送率が高いとして、通信範囲を $step$ dBm だけ拡大する。下限の閾値である L_r よりも低い場合は通信範囲を $step$ dBm だけ縮小する。以上の手順をビーコン間隔毎に行う。

4. シミュレーション評価

提案手法の有用性を密集環境を想定してシミュレーショ

Algorithm 1 動的な送信電力・信号検知閾値の更新

Input: P_r , Retransmission rate of the node n_i

TxP_{old} , $CCAT_{old}$, Current TxP and CCAT

Variables: $Step$, Step size

U_r , Upper P_r threshold

L_r , Lower P_r threshold

TxP_{Max} , Maximum TxP

$CCAT_{Min}$, $CCAT_{Max}$, Minimum/Maximum CCAT

```

1: if  $P_r > U_r$  then
2:   if  $(TxP_{old} + step) < TxP_{Max}$  and
      $(CCAT_{old} - step) > CCAT_{Min}$  then
3:      $TxP_{new} = TxP_{old} + step$ 
4:      $CCAT_{new} = CCAT_{old} - step$ 
5:   end if
6: else if  $P_r < L_r$  then
7:   if  $CCAT_{old} + step > CCAT_{Min}$  then
8:      $TxP_{new} = TxP_{old} - step$ 
9:      $CCAT_{new} = CCAT_{old} + step$ 
10:  end if
11: end if

```

ンにより評価する．本章では，評価指標を説明し，次に提案手法について既存手法 MiET [7]，既存の 802.11 規格である Legacy と比較検討をする．

4.1 評価環境

想定されるアパートメントシナリオは，3 階建のアパートメントで，各フロアには 10 部屋あり，1 部屋のサイズは $10\text{m} \times 10\text{m} \times 3\text{m}$ の立方体である．無線 LAN の配置は図 3 に示す．図 3 より，1 部屋に 3 台の AP が配置される．AP の位置はすべての部屋において同一である．STA は図 3 において点線によって区切られた空間内に，4 台ランダムに配置し，区切られた空間内の AP の配下となる．シミュレーションの実行は STA の位置のみをランダムには変えながら 5 回シミュレーションを行った．また，その他無線 LAN における設定は表 1 に示す．

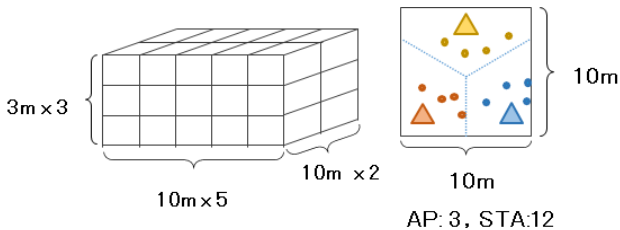


図 3: アpartmentシナリオの概略図

4.2 評価項目

提案手法，既存手法 MiET，Legacy の 3 つの手法で比較

表 1: シミュレーション設定

パラメータ	
シミュレータ	Scenargie2.0
本番シミュレーション時間	接続：7 秒，通信：60 秒
BCF	有効
モビリティ	なし
無線通信規格	IEEE802.11ac
使用周波数帯	5 GHz
周波数帯域幅	160MHz
チャネル選択	D NLOS [9]
トラフィックモデル	CBR
最大送信電力	AP:23 dBm, STA:15 dBm
最小 CCAT	-82 dBm
アンテナゲイン	AP: +0 dBi, STA: -2 dBi
ノイズ指数	7 dBm
伝搬損失モデル	3 次元空間距離ベース
Fading/Shadowing	有効
最大アグリゲーション	64
最大再送回数	9 回
CW	最大値：1023, 最小値：15
RTS/CTS	無効
U_r/L_r	0.8/1.2
ステップサイズ	1 dBm

評価した．1 部屋を 1 世帯とみなし世帯間平均スループット，各ノードのスループット性能，平均再送率，平均送信時間の 4 つで評価した．以下に，評価項目について説明する．

● 世帯間の平均スループット

1 部屋内のスループット性能の平均値である．アップリンク (UL) では，12 台の STA によるアップリンクスループット性能の合計であり，ダウンリンク (DL) では 3 台の AP のスループット性能の合計値である．

● 平均再送率

ノードにおける再送率の平均値である．また，平均再送率は式 1 によって算出する．

● 平均 SINR

平均 SINR とは，受信側で観測される平均 SINR である．

● 平均送信時間

シミュレーションの実行時間内最後の 20 秒間において各ノードがフレームを送信していた時間の平均値を表す．各ノードにおける送信機会を評価する指標として用いる．

4.3 世帯間の平均スループット

アップリンク (UL)，ダウンリンク (DL) における世帯間の平均スループットを図 4 に示す．アップリンク，ダウ

ンリンクスループットともに、提案手法は MiET と比較して 11.3 ポイント、9.5 ポイント向上している。さらに、Legacy と比較した場合、アップリンクのスループット性能は約 1.6 倍に向上している。提案手法において、信号検知閾値を送信機会の増加に加えて再送率を抑制することで、スループット性能が向上したと考えられる。さらに、信号検知閾値の過度な引き上げを抑制したことで、AP、STAともに送信機会を確保できたため、アップリンク、ダウンリンクともにスループット性能が向上したと考えられる。

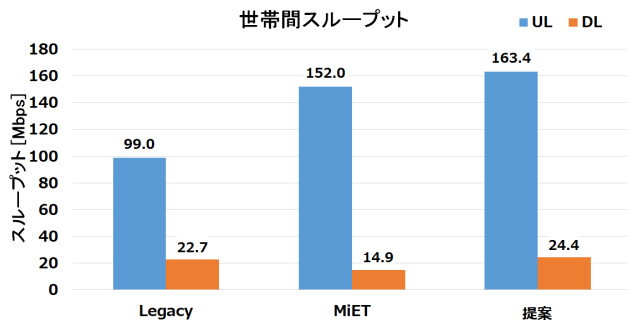


図 4: 世帯間の平均スループット

4.4 平均再送率

UL、DL における平均再送率を図 5 に示す。提案手法では、Legacy、MiET と比較して平均再送率が改善されたことがわかる。MiET ではアップリンク、ダウンリンクそれぞれ 112.5 %、88.3 % であるが提案手法では、75.8 %、50.1 % とアップリンク、ダウンリンクともに改善している。提案手法では、再送率を基準に送信電力の削減、信号検知閾値の引き上げを抑制したことで再送率の増加を抑えることができたと言える。また、Legacy と比較した場合、アップリンク、ダウンリンクそれぞれ約 70 %、21 % 改善している。Legacy では送信電力は最大値で受信ノードにおける RSSI は最大値であるが、隣接ノードの干渉電力も大きいため再送率が高いと考えられる。

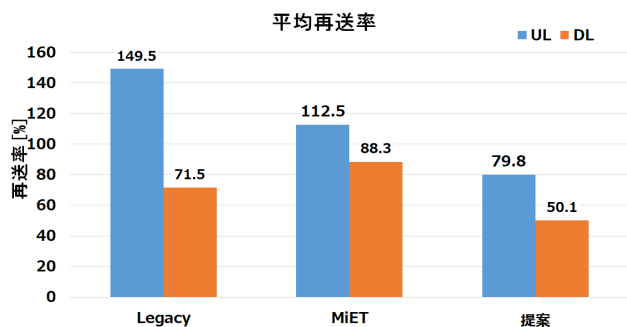


図 5: 平均再送率

4.5 平均 SINR

図 6 に各制御手法におけるアップリンク、ダウンリンクの平均 SINR を示す。提案手法では、MiET と比較してアップリンクは 1.6 ポイント、ダウンリンクでは 1.7 ポイント向上している。受信ノード側における PER は SINR の低下とともに増加する。よって、送信電力制御によって過度な送信電力の削減が発生すると SINR は低下し PER が増加する。PER の増加に伴い、再送率も増加する。よって、提案手法では、再送率を基準に送信電力・信号検知閾値制御を行ったことで送信電力の過度な削減を抑制し、SINR の低下を防ぐことができたと考えられる。さらに、Legacy と比較した場合、提案手法の方がやや劣るものの SINR を維持することができている。Legacy では送信電力はすべてのノードにおいて最大値であり、信号検知閾値も最小値であるため、SINR は高くなる傾向にある。一方、提案手法では、自身の再送率を悪化させない範囲で送信電力を削減したことで受信ノードにおける RSSI は低下するが周囲ノードからの干渉が減ったため SINR が維持することができたと考えられる。

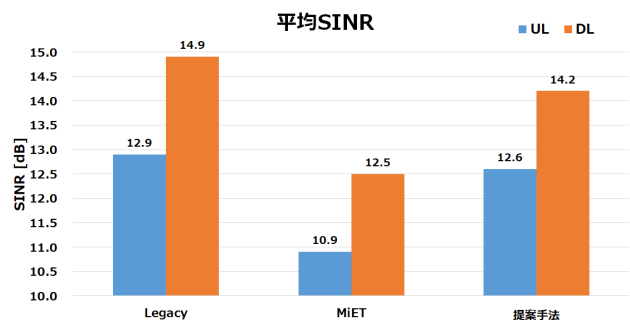


図 6: 平均 SINR

4.6 平均送信時間

図 7 に各制御手法の実行時間 20 秒間の各ノードにおけるアップリンク、ダウンリンクの送信時間の平均値を示す。MiET では UL において 1.43sec、提案手法では 1.04sec と MiET の方が 0.39 秒長いことが確認できる。一方 UL では送信時間の差はほとんどないことがわかる。また、Legacy と比較した場合、Legacy の送信時間は UL、DL それぞれ 0.82sec、0.59sec であることから、提案手法の方が、0.22sec、0.10sec 向上したことが確認できる。よって、通信範囲が最も狭い MiET が最も送信時間が長いことが確認できた。しかし、スループット性能では提案手法のほうが MiET より大きいことがわかる。スループット性能獲得の要因の一つに送信時間は含まれるが、送信機会創出に特化した MiET ではその他の再送率や SINR が悪化したことでスループット性能が提案手法に対して低くなったと考えられる。

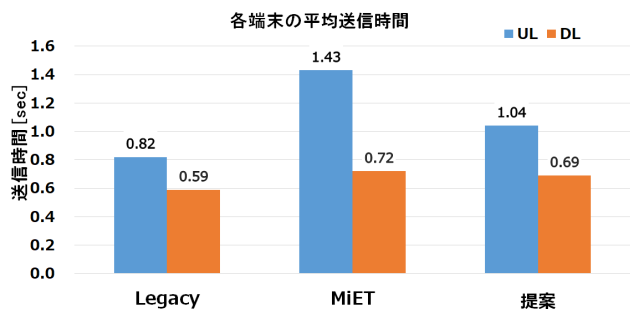


図 7: 平均送信時間

5. おわりに

本稿では、密集環境における再送を考慮した動的な送信電力・信号検知閾値制御を提案した。本制御では、過度な通信範囲縮小によって再送率が上昇することに着目し、再送率を基準に再送率が増加しないよう送信電力・信号検知閾値を動的に制御する。

密集環境を想定したアパートメントシナリオにおけるシミュレーション評価を行なった。アパートメントシナリオにおいて、UL, DL スループットがそれぞれ既存手法 MiET に対して 11.4Mbps (7.5 ポイント), 9.5Mbps (63.7 ポイント) 向上した。また、再送率は、MiET と比較して UL, DL それぞれ 32.5 ポイント, 33.2 ポイント改善した。以上より、提案手法では他 BSS ノードによる再送を考慮し動的に通信範囲を制御することで、スループット性能を向上することが確認できた。さらに、通信品質を維持しつつ、送信機会を創出することができた。

今回の提案手法では再送率の閾値の決定がヒューリスティックになりアパートメントシナリオにおいて最適な閾値を使うことでスループット性能の向上を達成できたに過ぎない。よって、各ノードの位置関係やノード情報から最適な通信範囲を理論的に決定する制御方式を検討することが今後の課題である。

参考文献

- [1] Ieee draft standard for information technology – telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks – specific requirements part 11: Wireless lan medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications amendment enhancements for high efficiency wlan. *IEEE P802.11ax/D6.0*, November 2019, pp. 1–780, 2019.
- [2] Simone Merlin and et al. TGax simulation scenarios. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00ax-simulation-scenarios.docx>, 2015. Accessed: 2019-01-21.
- [3] S. Kim, J. Yi, Y. Son, S. Yoo, and S. Choi. Quiet ACK: ACK transmit power control in IEEE 802.11 WLANs. In *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications*, pp. 1–9, May 2017.
- [4] M. S. Afaqui, E. Garcia-Villegas, E. Lopez-Aguilera,

G. Smith, and D. Camps. Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11ax. In *Proceedings of the 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1060–1065, March 2015.

- [5] K. Murakami, T. Ito, and S. Ishihara. Improving the spatial reuse of IEEE 802.11 WLAN by adaptive carrier sense threshold of access points based on node positions. In *Proceedings of the 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp. 132–137, Jan 2015.
- [6] K. Yamamoto, X. Yang, T. Nishio, M. Morikura, and H. Abeysekera. Analysis of inversely proportional carrier sense threshold and transmission power setting. In *Proceedings of the 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pp. 13–18, Jan 2017.
- [7] Masahito Mori Takeshi Itagaki and Kazuyuki Sakoda. Dynamic CCA control and TPC simulation results with SS1 SS3. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1045-00-00ax-dynamic-cca-control-and-tpc-simulation-results-with-ss1-ss3.pptx>, September 2015. Accessed: 2019-01-21.
- [8] 大陸稲田, 皓暉岩井, 寛重野, 悠介田中. 密集無線 lan 環境における他 bss 最近傍ノードを基準とした送信電力/信号検知閾値制御. 第 27 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 105–110, nov 2019.
- [9] Graham Smith. Dynamic sensitivity control-v2. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/13/11-13-1012-04-0wng-dynamic-sensitivity-control.pptx>, 2013. Accessed: 2020-01-27.