

密集無線 LAN における公平性向上のための リンクアダプテーションをとめた 送信電力・信号検知閾値制御

坂井 渉太^{1,a)} 岩井 皓暉 シュウ チョウブン^{1,b)} 重野 寛^{1,c)}

受付日 2020年5月11日, 採録日 2020年11月5日

概要: 無線 LAN の普及によって, 無線 LAN を利用するノードどうしが密集化している. 無線 LAN では, このような密集環境において同一のチャネル干渉によりスループット性能が低下する. この問題に対して, 送信電力 (TxP), 信号検知閾値 (CCAT) を制御することでスループット性能の改善が期待できる. 既存制御手法では, TxP, CCAT を制御し通信範囲を可能な限り縮小することで, スループット性能を向上させた. しかし, 通信相手を基準にした制御を行っており, スループット性能は BSS によって大きく異なり公平性が損なわれている. 本論文では, 密集無線 LAN における BSS 群内協調によるスループット性能の維持と公平性向上を目的としたリンクアダプテーションをとめた動的送信電力, 信号検知閾値制御である Fair Carrier Sensing and Power Control with Link Adaptation (FCPL) を提案する. シミュレーション評価により, 既存手法と比較してスループット性能を維持しながら, 公平性の向上を示す.

キーワード: IEEE802.11, 送信電力制御, 信号検知閾値制御, リンクアダプテーション

Dynamic Carrier Sensing and Power Control with Link Adaptation for Improving Fairness in Dense Wireless Networks

SHOTA SAKAI^{1,a)} KOKI IWAI ZHAO WEN CHOW^{1,b)} HIROSHI SHIGENO^{1,c)}

Received: May 11, 2020, Accepted: November 5, 2020

Abstract: Wireless Local Area Networks (WLANs) have been deployed more densely according to high wireless demands. In a wireless LAN, throughput performance decreases due to the co-channel interferences in a dense environment. Transmission power (TxP) control and clear channel assessment threshold (CCAT) control improve the system performance by addressing this problem. Existing TxP and CCAT control methods improve system throughput compared to the legacy system. Throughput fairness among Basic Service Sets (BSSs), however, has not been enough since TxP and CCAT are controlled by cooperating only within a BSS. Furthermore, link adaptation has not been considered, and there is room for further improvement. This thesis proposes Fair Carrier Sensing and Power Control with Link Adaptation (FCPL), which is a dynamic TxP and CCAT control with link adaptation for improving fairness by coordinating among nodes in BSS Groups in dense wireless LAN. In the simulation evaluation, FCPL show improved fairness while maintaining throughput performance compared to existing methods.

Keywords: IEEE802.11, TPC, DSC, link adaptation

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

a) sakai@mos.ics.keio.ac.jp

b) shu@mos.ics.keio.ac.jp

c) shigeno@mos.ics.keio.ac.jp

1. はじめに

無線 LAN は, 1997 年に最初の IEEE802.11 規格が策定されてから, 後継規格が策定され, 技術的な進歩が続いている. 最近でもフレームアグリゲーション技術, 変調方式

と符号化率 (Modulation and Coding Scheme: MCS) の拡張, 複数アンテナによる多重伝送技術 (MIMO) などが導入されている. このように, 拡大する通信需要を満たすべく発展してきたことで, 無線 LAN は広く普及している. しかし, 工場やスタジアム, 集合住宅などの無線 LAN の需要が高い場所では, 無線 LAN が次々と無秩序に乱立して密集環境が形成されている. 無線 LAN の密集環境とは, 1つのアクセスポイント (AP) と複数のノード (STA) からなる Basic Service Set (BSS) における通信範囲が重複し相互に干渉を及ぼす環境を指す. このような環境では, 重複する BSS のノード間の干渉によって, 送信フレームの衝突による送信失敗や, 送信機会の喪失が発生しスループット性能の低下が発生する. 伝送速度は大幅に向上した一方で, 密集環境におけるスループット性能は著しく低下している [1].

密集環境における無線 LAN の効率化を目的とした, 有限な周波数資源の効率な空間再利用 (Spatial Reuse) に関する技術として, IEEE 802.11ax [2] では送信電力制御, 信号検知閾値制御が採用される. 信号検知閾値制御 (Dynamic Sensitivity Control: DSC) では, CSMA/CA におけるキャリアセンスを行う際の信号検知を判定する電力閾値を制御する. 密集環境においては, 各ノードの信号検知範囲を制御することで, 隣接する BSS 同士による不必要な信号の検知を抑制し, 送信機회를創出する. 送信電力制御 (Transmit Power Control: TPC) では, 宛先となるノードとの伝搬損失を基準に送信電力を制御する. 送信電力制御では, 正確にフレームが受信できる範囲で送信電力を削減することで, 送信電力の到達範囲を縮小し, 隣接する BSS に対して与える影響を抑制する. これによって, 隣接する BSS からの干渉を削減されるため, 送信失敗や送信機会の低下を削減することができる. よって, 送信電力・信号検知閾値制御を用いることで送信機회가創出されスループット性能の向上が期待できる.

一方で, 周波数資源を有効活用するのではなく, 周波数資源を分割し, BSS ごとに分割したチャネルを割り当てることで通信の衝突を回避するチャネル割当てという手法があるが, 密集環境において多数の BSS が隣接しているためチャネルを細かく分割する必要がある, 分割することで帯域幅が減少し, スループット性能が低下する. よって, チャネル割当てでは隠れ・さらし端末問題の解決に対しては有効であるが, スループット性能の向上の観点から密集環境における問題の改善は不十分であると考えられる.

密集環境におけるスループット性能の向上を目的とした送信電力制御, 信号検知閾値制御の理論や手法が研究されている [5], [6], [7], [8]. これらの手法では, 従来の 802.11 規格と比較して大幅にスループット性能を向上させている. 送信電力・信号検知閾値制御に関する研究では, さらに端末問題を改善し, 送信機회를創出することでスループット

性能を向上させる研究があるが, 送信電力の到達範囲, 信号検知範囲の縮小にともない隠れ端末問題が悪化するという問題がある [3].

本論文では, 無線 LAN 環境における密集した複数の BSS の集合である BSS 群内の協調による, 公平性向上のためのリンクアダプテーションをともなった動的な送信電力・信号検知閾値制御を提案する. 提案手法では, BSS 群において, 群内の各ノードが動的に信号検知閾値, 送信電力, MCS を制御することで, システムスループット性能を維持しつつ, 密集環境における各ノードのスループット性能の公平性の向上を目指す. BSS 群内において送信機会が低いノードの送信機会が確保されるように信号検知閾値制御を行う. さらに, 密集環境における干渉により SINR が低いノードの SINR が改善されるように送信電力制御を行う. リンクアダプテーションにおいては, SINR と送信電力制御情報を基準に MCS を動的に選択することで, 動的な送信電力, 信号検知閾値の更新に対して推定される SINR に対して適切な伝送速度を割り当てる.

本論文では, 2章において, 関連研究について述べ, 3章で提案手法を説明し, 4章で密集シナリオを想定した通信シミュレーションによる評価を行う. 最後に5章で結論を述べる.

2. 関連研究

本章では, 送信電力・信号検知閾値制御についての研究を説明する. さらに, 提案手法のベースとなる送信電力・信号検知閾値を連動制御する Minimum Exposed Terminal Control (MiET) [4] について説明する. そして, リンクアダプテーションの既存手法を説明する.

2.1 送信電力・信号検知閾値制御

無線 LAN の送信電力・信号検知閾値制御について精力的に研究が行われている. 各ノードにおける RSSI を基準にした信号検知閾値制御手法 [5], [6] では, 通信相手との伝搬損失と隣接した BSS による干渉電力量をヒューリスティックに検証し最適な信号検知閾値を決定している. ACK の送信電力制御 [7] では, データフレーム受信中に干渉電力を推定し, 推定した干渉電力を基準に ACK の送信電力を決定する. しかし, 信号検知閾値や ACK の送信電力といった限定された手法であり, 送信電力・信号検知閾値制御の組合せについては考慮していない. 送信電力と信号検知閾値を反比例制御する手法 [8] では, スループットモデルから, 反比例定数 (IPS) の最適値を算出している. しかし, 現実的な環境における検証が明らかではない. このように多くの研究が行われているが, 送信電力・信号検知閾値制御によるノード間の信号検知範囲の異なることで発生する隠れ端末問題と帯域の占有と枯渇について検討されている例が少ない.

2.2 MiET

MiET [4] では、信号検知閾値を送信相手との伝搬損失を基準に最大化し、送信電力を最小化することで、信号検知範囲と送信電力到達範囲を最小化し与干渉を削減する。

送信電力制御では、はじめに通信相手の送信電力とフレーム受信時の RSSI から通信相手との伝搬損失を算出する。

$$E_{PL} = E_{TxP_{peer}} - E_{RSSI} \quad (1)$$

従来の 802.11 規格の信号検知閾値 $E_{CCAT_{Min}}$ から E_{Margin} dBm だけ保証した目標到達電力 E_{Target} と伝搬損失 E_{PL} を用いて送信電力 E_{TxP} を逆算する。

$$E_{Target} = E_{CCAT_{min}} + E_{Margin} \quad (2)$$

$$E_{TxP} = \min \left(\frac{E_{TxP_{Max}}}{E_{Target} + E_{PL}} \right) \quad (3)$$

ここで、 E_{Margin} は予備実験によって決められた定数で、 $E_{TxP_{Max}}$ は AP のとき +23 dBm、STA のとき +15 dBm を用いる。

信号検知閾値制御では、全 AP/STA 間で共通の送信電力レベル $E_{TxP_{common}}$ と、送信電力制御によって求められた送信電力 E_{TxP} の差分だけ、 $E_{CCAT_{Min}}$ から増加させる。

$$E_{CCAT} = E_{CCAT_{Min}} + E_{TxP_{common}} - E_{TxP_{Data}} \quad (4)$$

ここで、 $E_{TxP_{common}}$ は AP の最大送信電力である +23 dBm を用いる。

2.3 リンクアダプテーション

リンクアダプテーションとは、WLAN の変化するチャネル状態に合わせて各リンクパラメータを調整することである。リンクアダプテーションを効果的に行うことで、WLAN システムのスループットが向上する。リンクアダプテーションのコア技術は MCS (Modulation and Coding Scheme) 選択である。

Automatic Rate Fallback (ARF) [9] は、ACK 受信の連続成功時にレートを上げ、連続失敗時に伝送速度を下げるシンプルなものである。

Minstrel [10] では、通信品質の良い状態から悪い状態まで 4 つのステージに分けて、それぞれのステージで使われる MCS を決めておく。フレーム送信の際にステージごとにあらかじめ決められた試行回数以上の再送が発生した場合、ステージを下げて伝送速度を下げる。各ステージで使用する MCS は、MCS ごとに Packet Error Rate (PER) の統計値を基準に決定されている。1 つ目のステージでは、MCS と PER からスループットが最大となる MCS を選択する。2 つ目のステージでは、2 番目にスループットが最大となる MCS を選択する。3 つ目のステージでは、PER が最も低い MCS を選択する。4 つ目のステージでは、最も

レートが低い MCS を選択する。また、Minstrel では PER の統計値を得るために、一定割合のパケットでランダムな MCS を設定する。

送信電力・信号検知閾値制御、リンクアダプテーション手法は、密集環境におけるスループット性能を向上させる技術であるが、これらのすべてが連動するような制御については検討されていない。

3. 提案

本章では、公平性向上を目的とした送信電力・信号検知閾値および MCS の動的制御手法 FCPL (Fair Carrier Sensing and Power Control with Link Adaptation) を提案する。

3.1 提案概要

本提案の目的は、BSS 群内協調制御によって隣接する BSS 間の帯域の占有と枯渇を軽減しシステムのスループットを維持・向上させつつ、スループット性能の公平性を向上させることである。信号検知閾値制御によって、BSS 群内の送信機会を均等になるようにすることで、スループット性能の公平性を向上させる。加えて、送信電力制御によって低 SINR ノードの SINR を改善し、MCS 制御によって SINR 基準で受信確率の最も高い MCS を選択しスループット性能の向上を図る。BSS 群とは、AP が互いに通信可能な範囲内にある隣接した複数の BSS のグループを指す。図 1 に形成された BSS 群を示す。形成された BSS 群内の各 AP は BSS 群内においてビーコンフレームを用いて BSS 情報を共有する。ここで BSS 情報とは、配下の STA の送信機会、SINR などの情報である。FCPL では、はじめに MiET による制御を行い、その後一定間隔ごとに、AP は得られた BSS 情報を基準に送信電力、信号検知閾値、MCS 制御を行い、配下の STA に制御指示する。STA は AP からの指示を受けて制御を実施する。

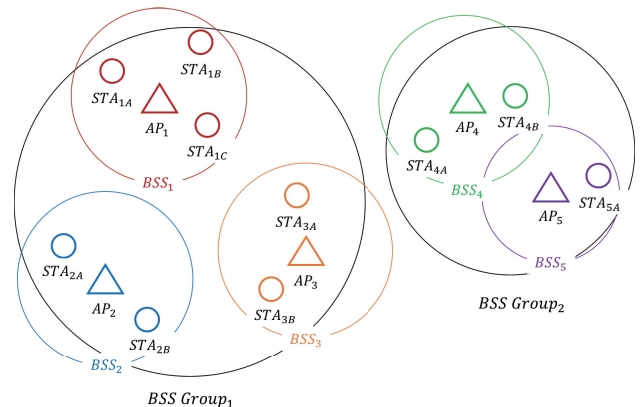


図 1 想定環境の構成図

Fig. 1 System configuration.

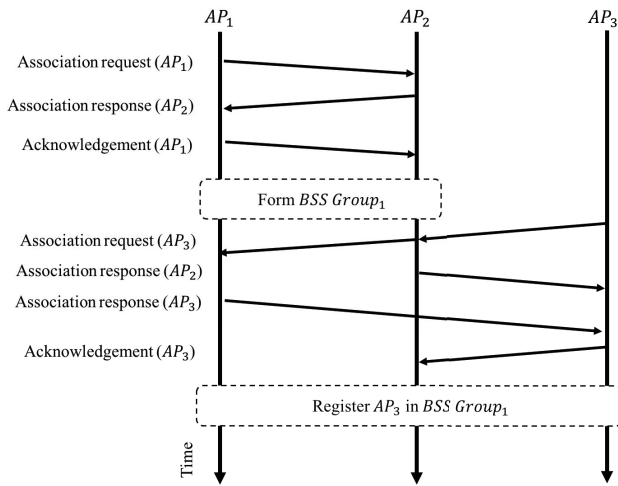


図 2 BSS 群の形成シーケンス
Fig. 2 Form BSS group.

3.2 BSS 群の形成

密集環境において、同一のチャネルを利用する場合隣接する BSS の間で帯域の占有と枯渇が発生する．そこで提案方式では、隣接する BSS どうしを BSS 群と定義し BSS 群内において帯域の占有と枯渇を軽減することで公平性の向上を目指す．帯域の占有と枯渇は BSS 内だけでなく、隣接する BSS 間で発生する．よって帯域の占有と枯渇を解決するためには、BSS 群において BSS 間の干渉を改善する必要がある．BSS 群の形成は、AP 間の Association によって行う．図 2 に BSS 群 Group₁ の形成時の手順の例を示す．2 つの AP 間で、Association Request フレーム、Response フレーム、ACK フレームを交換することで、同一 BSS 群に属することを認識し、新たな BSS 群を形成する．また、すでに BSS 群形成されている場合は各 AP からの Response フレームのうち最も RSSI が高い BSS 群、すなわち、伝搬損失上最も隣接した BSS 群に所属する．したがって、すべての AP が必ず 1 つの BSS 群のみに所属する．なお、BSS 群は上記のフレーム交換を通じて形成する場合のほか、管理者の設定により定義される場合もある．

本論文では AP の位置が固定されていて静的な環境を想定しており、上記の手順は主として AP が最初にネットワークに参加する際の初期的な BSS 群の形成手順を示している．AP の台数や位置が運用途中で変更されるような動的な環境における BSS 群形成と維持については別途検討が必要である．

3.3 BSS 群内における情報交換

本提案では、各 AP は自身とその配下の STA の情報をビーコンフレームにピギーバックさせて、同じ BSS 群内の他の AP に通知する．また、同じ BSS 内での AP と STA の間の情報交換についてはデータフレームに情報をピギーバックさせて行う．

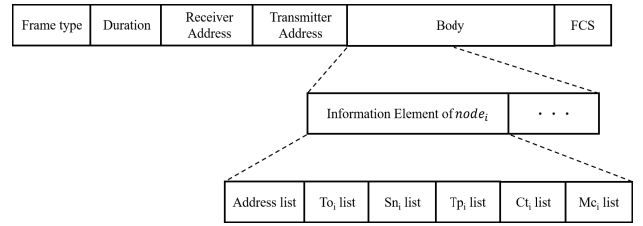


図 3 ビーコンフレームフォーマットの拡張
Fig. 3 Extended beacon frame format.

交換する情報は、各 BSS 内の AP 含むすべてのノードの MAC アドレス、送信機会 To_i 、SINR $Sn_{i,j}$ 、TxP Tp_i 、CCAT Ct_i 、MCS Mc_i の情報とする．ビーコンフレームに記載する情報は、各 BSS 内のノードの MAC アドレス、送信機会 To_i 、SINR $Sn_{i,j}$ 、TxP Tp_i 、CCAT Ct_i 、MCS Mc_i の情報である．図 3 に情報交換のためのビーコンフレームを示す．本提案における送信機会 To_i は送信を試みた時間のうち、実際に送信を行っていた時間の割合を示す．送信機会 To_i は次式で表される．

$$To_i = \frac{T_{xtime_i}}{T - T_{e_i}}. \quad (5)$$

ここで、 T はある特定の観測期間、 T_{xtime_i} は T 期間におけるノード i の送信時間、 T_{e_i} は T 期間におけるノード i の送信キューが空であった時間を表す．SINR $Sn_{i,j}$ は、観測期間 j に受信側で観測された送信ノード n_i からの送信フレームの SINR である．送信フレームに対する $Sn_{i,j}$ は、次式で更新する．

$$Sn_{i,j} = Sn_{i,j-1} \cdot \alpha + HistSn_i \cdot (1 - \alpha). \quad (6)$$

ここで、 $HistSn_i$ は現在の観測期間で測定された SINR の平均値であり、 $Sn_{i,j-1}$ は前回算出された SINR である．また、 α は移動平均指数であるため、SINR $Sn_{i,j}$ は重み付き平均となる．送信電力、信号検知閾値、MCS は現在使用している値とする．

3.4 信号検知閾値の更新

信号検知閾値制御では、平均送信機会を基準に送信機会の少ないノードの信号検知閾値を増加させ送信機会を創出する．一方で、送信機会の多いノードでは信号検知閾値を減少させ意図的に送信機会を抑制し占有している送信機会を開放することで、送信機会の少ないノードの送信機会創出を促す．各 AP は情報交換によって得られた各ノードの送信機会を基準に信号検知閾値制御の判断を行い、配下の STA へ制御指示を行う． AP_x は BSS 群 G_x に属するノードの To から平均送信機会 To_{avg} を次式で求める．

$$To_{avg} = \frac{\sum_{i \in G_x} To_i}{N_x} \quad (7)$$

ここで、 N_x は、BSS 群 G_x に属するノードの台数である．

そして、 AP_x は G_x に属するノード n_i について、 Utc , Ltc を用いて、次式のように信号検知閾値制御を行う。

$$Ct_i = \begin{cases} Ct_i - Ssc & (\text{if } To_i > To_{avg} * Utc) \\ Ct_i + Ssc & (\text{if } To_i < To_{avg} * Ltc) \\ Ct_i & (\text{else}) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 Utc , Ltc は平均送信機 To_{avg} に対して周波数資源の占有・枯渇を判断する割合であり、 Ssc は信号検知閾値の更新ステップサイズである。

式 (5) では送信の成否ではなく、帯域の占有時間に着目している。これは、伝送に失敗していても、送信自体は行われ、帯域を占有するからである。また、伝送に失敗しているが送信機は確保できている場合、FCPL は信号検知閾値を下げて検知範囲を拡大し、送信機を抑制する。このような検知範囲の拡大により、より多くの周辺ノードからの送信を検知できるようになる。この結果、拡大前に比べて干渉量が多いときの送信が抑制され、SINR の低下による受信失敗の可能性の低減が期待できる。

3.5 送信電力の更新

送信電力制御では、密集環境における隣接するノードの干渉による SINR の低下を改善する。また、受信ノードにおける SINR が高い場合は、現在の送信電力が過剰であることから送信電力を削減し、隣接ノードに対する干渉を抑える。送信電力制御では、送信電力を変更にともなって、受信ノード側での SINR が変化する。よって、AP は制御を行うノードの通信相手 n_k の SINR $Sn_{k,j}$ を基準に制御ノードの送信電力を更新する。 AP_x は配下のノード n_i と AP_x について、次式のように送信電力制御を行う。

$$Tp_i = \begin{cases} Tp_i - Sst & (\text{if } Sn_{k,j} > Usn) \\ Tp_i + Sst & (\text{if } Sn_{k,j} < Lsn) \\ Tp_i & (\text{else}) \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 Usn , Lsn は、高 SINR ノードと低 SINR ノードを判断する閾値である。また、 Sst は定数で送信電力の更新ステップサイズである。

密集環境において SINR が極端に低いノードの SINR を改善すると同時に、必要以上に高い SINR を確保しているノードにおいては電力を抑え、周囲への干渉を抑制する。加えて、閾値 Lsn に MCS 選択を考慮し MCS Index が 3 の場合の許容される SINR [11] とする。MCS 選択において低い MCS が選択された場合、受信成功率は上昇するが帯域を長時間占有するため、帯域の使用効率は低下する。このことは、全体のスループット性能の低下につながる。FCPL では、低 MCS による送信を防ぐために、閾値 Lsn を高 MCS (MCS Index = 7) を基準に設定する。

3.4 節、3.5 節で、送信電力制御と信号検知閾値制御につ

いて説明した。信号検知閾値制御では、送信機会を増加させるために検知範囲を縮小する。一方で、送信電力制御では SINR の改善のために送信電力を増加させ送信電力の到達範囲を拡大する。よって、これら 2 つの制御が同時に行われた場合、検知範囲の縮小によって周囲のノードの送信を無視するため SINR が低下する可能性があり、送信電力制御による SINR の改善に干渉する。このように、送信電力制御と信号検知閾値制御は干渉する可能性がある。しかし、密集環境では、SINR が低く再送が発生していることに加え、送信機会が確保できていないためスループット性能が著しく低いノードが存在する。このようなノードのスループット性能を改善するためには、SINR の改善を目的とした送信電力制御と送信機会の増加を目的とした信号検知閾値制御を行う必要がある。

3.6 リンクアダプテーション

MCS 制御は、ノードの SINR 情報と送信電力制御情報に基づく。Algorithm 1 に提案手法の AP_x の MCS 選択アルゴリズムの流れを示す。 AP_x は B_x に所属するノード n_i について、TxP 制御後の SINR $\widehat{Sn}_i$ を次式で推測する。

$$\widehat{Sn}_i = \begin{cases} Sn_i - Sst & (\text{if } Sn_i > Usn) \\ Sn_i + Sst & (\text{if } Sn_i < Lsn) \\ Sn_i & (\text{else}) \end{cases} \quad (10)$$

ここで、 Sst は送信電力の更新ステップサイズである。

n_i が Tp_i を増加させる場合、 Sn_i を Sst 分だけ増加させて $\widehat{Sn}_i$ とする。これは自身の送信電力の引き上げに対して SINR が増加することを見越した制御である。一方、 Tp_i を減少させる場合、 Sn_i を Sst 分だけ減少させて $\widehat{Sn}_i$ とする。そして、最小要求 SINR を満たす MCS の中で最大のものを選択し、 Mci を決定する。最小要求 SINR は各 MCS においてフレームの PER が 1%未満となる SINR であり、具体的なパラメータ値は文献 [11] を参照した。信号

Algorithm 1 AP における MCS 選択アルゴリズム

Input: I , Information of nodes which belong to G_x

Mt , SINR to MCS table

Variables: Cm , MCS control table of B_x

$\widehat{Sn}_i$, Estimated Sn_i after TxP control

```

1: for  $n_i$  in  $B_x$  do
2:   Get  $Sn_i$  from  $I$ 
3:   if  $Cp[i] > 0$  then
4:      $\widehat{Sn}_i \leftarrow Sn_i + Sst$ 
5:   else if  $Cp[i] < 0$  then
6:      $\widehat{Sn}_i \leftarrow Sn_i - Sst$ 
7:   else
8:      $\widehat{Sn}_i \leftarrow Sn_i$ 
9:   end if
10:   $Cm[i] \leftarrow Mt[\widehat{Sn}_i]$ 
11: end for
12: Multicast  $Cm$  to nodes which belong to  $B_x$ 

```

検知閾値、送信電力制御時と同様に AP_x は $n_i \in B_x$ のすべてのノードについて判断を終えるとビーコンフレームを用いて配下の STA に制御指示を出す。そして、各 AP は自身の判断に基づいて、各 STA は AP からの制御指示に基づいて MCS 選択を行う。

FCPL におけるリンクアダプテーションでは、SINR が低い通信について、低い MCS を選択するように制御が働く。よって、他 BSS による干渉が強くなるため再送が原因でスループット性能が低下しているノードではその性能を改善することが期待できる。

4. シミュレーション評価

本章では提案手法 FCPL のシミュレーション評価について述べる。FCPL、提案のリンクアダプテーションを除いた FCPL (FCPLwoLA), MiET, 既存の 802.11 Legacy の 4 手法について密集環境を想定したシミュレーションにより比較評価する。

4.1 シミュレーション環境

本論文では、アパートメントに多数の無線 LAN が密集配置された環境を想定したシミュレーションにより提案手法の評価を行う。なお、アップリンクとダウンリンクを同時に評価する。通信シミュレータとして Scenargie2.0 を利用し、シミュレーションパラメータは IEEE 802.11ax Task Group で定義されたシナリオ [12] を参考に決定した。表 1 にシミュレーションパラメータを示す。図 4 に評価で用いたアパートメントシナリオ [4] の概略図を示す。本シナリオは 3 階建のアパートメントに無線 LAN が密に配置されている環境を想定している。1 階は 10 部屋からなり、1 部屋は 10 m 四方である。無線 LAN の配置は、すべての部屋において配置されていて、1 部屋内に 3 つの BSS が存在している。1 つの BSS は AP が 1 台、STA が 4 台接続されている。よって、全ノード数は 450 台であり、AP が 90 台、STA が 360 台配置されている。図 4 より、AP の位置は固定である。STA は点線で区切られた領域内に 4 台ランダムで配置され、領域内の AP と接続している。なお、STA と AP の接続は同世帯内のみに限定している。また、提案手法 FCPL における BSS 群は、世帯間で BSS の管理者が異なること、壁損失があり世帯間における BSS 間の通信が確実ではないため、1 部屋内に配置されている 3 つの BSS で形成するものとし、BSS 群を手動で与えた。なお、FCPL における更新サイズと閾値 ($Utc / Ltc / Usn / Lsn$) は予備実験によって選択した。予備実験は、同じアパートメントシナリオにおいて、更新サイズを 1 dBm、閾値を 0.1 間隔で変更しながら検証し、スループット性能の公平性が最も改善された値を設定した。これらの値は、ノードの密集度に依存している。3.5 節で述べたとおり、送信電力制御と信号検知閾値制御の干渉があり、ノードの密集度によ

表 1 シミュレーション環境

Table 1 Simulation parameters [12].

Paramter	Value
Simulator	Scenargie2.0
Standard	IEEE 802.11ac
Frequency	5 GHz
Bandwidth	160 MHz
Simulation Time	20 s
Traffic Model	CBR
Traffic	full buffer (100 Mbps)
Channel	Single Channel
Spatial Stream	1
Available MCS	0-7
Data Payload	1,472 Bytes
Maximum TxP	AP: 23 dBm, STA: 15 dBm
Minimum CCAT	-82 dBm/20 MHz
Propagation Loss Model	3-D Distance
Fading / Shadowing	Enable
Wall Loss	5 dBm
Contention Window Size	15-1023
Max Retry Count	9
Guard Interval	Long
Max Number of Aggregation	64
Max PPDU Duration	5,476 μ s
Max AMPDU Size	100 kbytes
RTS/CTS	Enable
BSS Color Filtering	Enable
Beacon Period	100 ms
Ssc / Sst	1.0 / 0.5
$Utc / Ltc / Usn / Lsn$	1.5 / 0.5 / 22 / 12
α	0.8

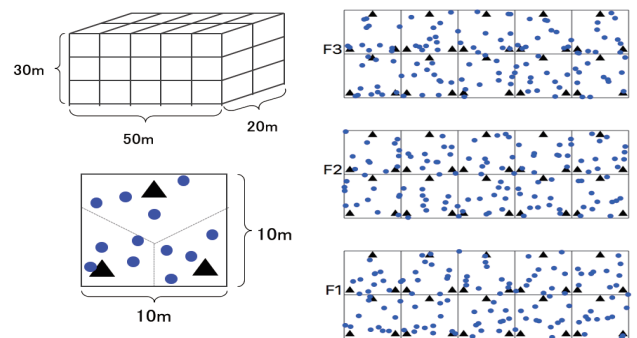


図 4 アパートメントシナリオ

Fig. 4 Apartment scenario.

て適切な値を設定する必要がある。

4.2 評価概要

比較手法は、提案手法 FCPL, FCPL (LA なし), 既存手法 MiET [4], 既存の 802.11 Legacy の 4 手法である。また、FCPL を除く手法におけるリンクアダプテーションは、通信相手の SINR を基準に最もスループット性能が高い MCS に固定するものとする。評価項目は、システムスループット、スループット性能の公平性、平均 SINR である。また、リンクアダプテーションの効果を検証するために、既存手法 Arf [9], Minstrel [10] とシステムスループットについて比較を行った。各評価項目の定義は以下のとおりである。

● システムスループット

システムスループットとは、UL、DL フローそれぞれにおける全ノードの合計スループットを表す。

● スループット性能の公平性

スループット性能の公平性の指標として、BSS 群内におけるスループットの Fairness Index の平均値を用いる。BSS 群内のフローを i 、各フローにおけるスループットを $Throughput_i$ 、BSS 群内のフロー数を k とするとスループットの Fairness Index は次式で表される。

$$FairnessIndex = \frac{(\sum_i^k Throughput_i)^2}{k \cdot \sum_i^k Throughput_i^2} \quad (11)$$

● 平均 SINR

各ノードにおける受信時の平均 SINR を表す。SINR は受信ノード側で観測されるため、アップリンク (UL) の SINR は、AP で観測された SINR の平均値となる。

● 平均再送率

各ノードにおけるアップリンク、ダウンリンク別の平均再送率を表す。このとき再送率は次式より算出する。

$$RO_i[\%] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m n_k \cdot 100[\%] \quad (12)$$

ここで、正常に送信したフレーム数を m 個、フレーム k の再送回数を n_k とする。なお、このときのフレームとは、再送を完了したフレームとする。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。よって、1つのフレームを送信する際に、再送が1回発生した場合、 RO_i は 100% となることに注意する。

4.3 システムスループット

図 5 に各手法におけるシステムスループットを示す。アップリンク (UL) とダウンリンク (DL) の合計スループットに関して、FCPL は MiET と同程度かやや劣る程度の性能を達成している。Legacy に対しては約 1.2 倍であり、Legacy からは改善されている。一般に、システムスループットとスループット公平性にトレードオフの関係にあり、FCPL は後で見ると公平性を重視した制御を行っているため、MiET に対してはスループットで不利になっている。FCPL と FCPLwoLA の比較から、提案のリンクアダプテーションがスループットの観点からは不利に働いていることが分かる。これはリンクアダプテーションによって、FCPLwoLA における事前のトレーニングで選択される理想的な MCS と比較して低い MCS が選択されたことで送信時間が増加し、伝送レートが低下したため若干スループット性能が低下したと考えられる。

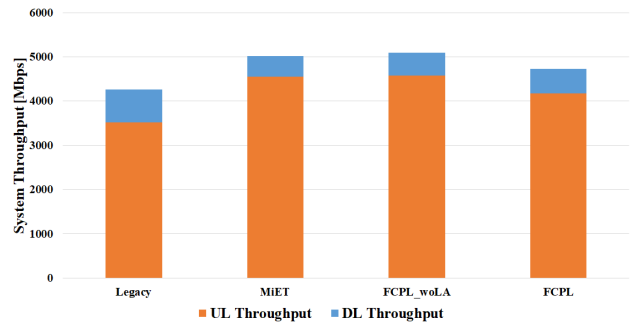


図 5 各手法におけるシステムスループット

Fig. 5 System throughput of each method.

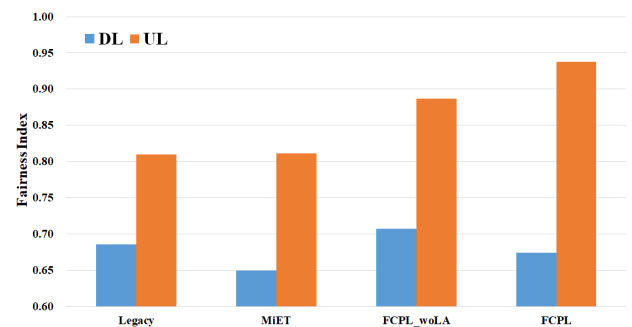


図 6 各手法における Fairness Index

Fig. 6 Fairness index for each throughput of each method.

4.4 スループット性能の公平性

図 6 に各手法におけるアップリンク (UL)、ダウンリンク (DL) のスループットの Fairness index を示す。提案手法は、Legacy、MiET と比較して、アップリンクの Fairness Index を大きく改善している。また、ダウンリンクの Fairness Index については Legacy と同程度であり、MiET に対しては若干向上している。FCPL における信号検知閾値制御では、BSS 群内において送信機会の低いノードが送信機会を獲得できるように制御している。高送信機会ノードが信号検知閾値を下げ帯域を明け渡したことで、低送信機会ノードが送信機会を獲得し、Fairness Index が改善されたと考えられる。また、近接する BSS を考慮していない既存手法 MiET と BSS 群形成を行う FCPL の比較より、BSS 群による制御が公平性の改善に有効であることが分かる。FCPL と FCPLwoLA の比較から、FCPL のリンクアダプテーションが、アパートメントシナリオにおいてアップリンクに対して有利に働いていることが分かる。リンクアダプテーションによって、FCPLwoLA における理想的な MCS と比較して低い MCS が選択されるため、SINR が低く再送が発生していたノードではスループット性能が改善される。一方で、MCS が低いと、送信時間が増加する。よって、元々送信機会が得られていたノードによる占有が高まるため、FCPL における信号検知閾値制御が強く働く。アパートメントシナリオにおいてスループット性能はダウンリンクよりアップリンクの方が高いこと

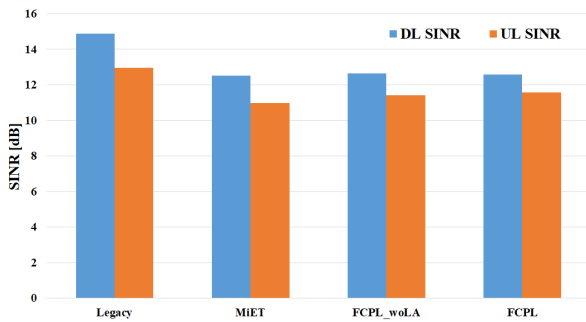


図 7 各手法における平均 SINR

Fig. 7 SINR of each method.

から、送信時間が増加したことでアップリンクにおける送信機会の占有が高まり、アップリンクにおける送信機会を分配する制御がより強く働いたと考えられる。また、リンクアダプテーションによって SINR が低いノードのスループット性能が改善され、アップリンクにおける各 STA のスループット性能が均等に近づいたため、公平性がより改善されたと考えられる。

4.5 平均 SINR

図 7 に各手法の平均 SINR を示す。アップリンクにおいて FCPL は MiET より高い SINR を達成している。FCPL の送信電力制御において低 SINR ノードの送信電力を増加させるためアップリンクにおける SINR が増加したと考えられる。一方、ダウンリンクにおいては、MiET, FCPL, FCPLwoLA の SINR は同程度であることが分かる。FCPL の送信電力制御において、低 SINR ノードの閾値 L_{sn} は、12dB に設定されている。よって、12dB 以上の SINR ノードでは送信電力の増加は発生しないため、平均 SINR が 12dB を超えているアップリンクにおいて SINR は向上しなかったと考えられる。4 つの手法を比較してアップリンク、ダウンリンクともに Legacy の平均 SINR が最も高い。Legacy では送信電力は最大値であり、受信ノードでの RSSI が最も高いため SINR も最も高い。そのかわり、周波数資源の効率的な空間的再利用ができないため、先に述べたようにスループット性能が劣る。

4.6 平均再送率

図 8 に各手法における平均再送率を示す。FCPLwoLA では、MiET と比較してダウンリンクは同程度、アップリンクは再送率が改善していることが分かる。よって、FCPL における送信電力制御によって、適切に送信電力を制御が行われているといえる。平均 SINR が低いアップリンクにおいて再送率が改善していることから SINR が低いノードに対しては送信電力低下させ、SINR が低いノードに対しては増加させる制御が効果的に働いたと考えられる。また、信号検知閾値制御による検知範囲を縮小にともなう再送率の増加を送信電力制御によって抑制できていると考えられ

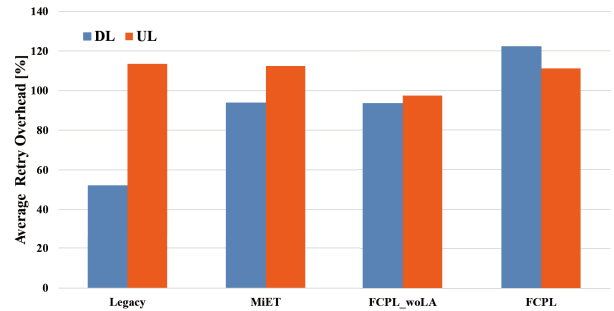


図 8 各手法における平均再送率

Fig. 8 Retry overhead of each method.

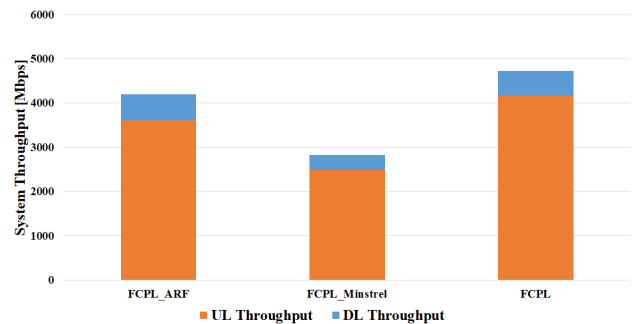


図 9 各リンクアダプテーション手法におけるシステムスループット

Fig. 9 System throughput of each link adaptation method.

る。一方で、リンクアダプテーションをとめた FCPL では再送率が MiET, FCPLwoLA と比較して悪化している。ただし、MiET, FCPLwoLA では、事前に同じ環境でトレーニングを行いスループット性能が最大となる理想的な MCS を選択している。よって、FCPL では理想的な MCS ではなくリンクアダプテーションによって、MCS を決定しているため再送率が若干悪化したと考える。

4.7 リンクアダプテーションにおける評価

図 9 に FCPL による送信電力・信号検知閾値制御に提案と既存リンクアダプテーション手法と提案手法を組み合わせた場合のシステムスループットについての評価を示す。既存手法と比較して、提案のリンクアダプテーション手法は最も高いスループット性能を達成しており、特に DL における改善が顕著である。提案手法におけるリンクアダプテーションでは動的な送信電力・信号検知閾値制御に対して適切な MCS を選択できていると考えられる。既存手法では、PER の統計情報を基準に MCS を選択するため、動的な送信電力・信号検知閾値の更新後のチャンネル干渉の変化に対して最適な MCS を選択できないため、システムスループットが減少したと考えられる。よって、動的な送信電力・信号検知閾値制御を考慮したリンクアダプテーションは性能の向上に有効であると考えられる。

5. おわりに

無線 LAN の密集化にともないスループット性能が低下

する。そして、密集環境におけるスループット性能の向上を目的としたいくつかの送信電力・信号検知閾値制御に関する研究では、送信電力の到達範囲、信号検知範囲を縮小することでスループット性能を向上させた。しかし隣接するBSSどうしの帯域の占有、枯渇については考慮していないことから、スループット性能の公平性が悪化した。

そこで本論文では、密集無線ネットワークにおけるBSS群内協調による公平性向上のためのリンクアダプテーションをともなった動的送信電力・信号検知閾値制御であるFCPLを提案した。本提案の目的は、隣接する複数のBSSでBSS群を形成し、BSS群内において公平性を向上させ、送信電力制御、リンクアダプテーションによってSINRを向上しスループット性能の向上を図ることで、システムスループット性能を維持しながらスループット公平性を向上させることであった。FCPLの妥当性を示すために、シミュレーション評価を行った。FCPLにおける送信電力・信号検知閾値制御では、MiETと同程度のシステムスループットを維持することを確認し、スループット公平性の評価では、FCPLのアップリンク、ダウンリンクの公平性を改善していることを確認した。

なお、本論文ではAPの位置が固定されている環境を想定した。しかし実際には、APの移動や新たなAPの設置などによってBSS群形成を変更する必要がある。ただし、あるAPのBSS群の所属変更にともないその他のAPの伝搬損失上最も近いBSS群が変化する可能性があり、BSS群の所属変更のオーバーヘッドが大きくなるため、BSS群の所属に関する制約を新たに設ける必要がある。

参考文献

- [1] Bellalta, B.: Ieee 802.11ax: High-efficiency wlangs, *IEEE Wireless Communications*, Vol.23, No.1, pp.38–46 (2016).
- [2] 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).
- [3] Ohnuma, T., Shigeno, H., Tanaka, Y. and Yamaura, T.: Dynamic sensitivity control based on two-hop farthest terminal in dense wlan, *Proc. 2018 IEEE 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, pp.378–385 (May 2018).
- [4] Mori, M., Itagaki, T. and Sakoda, K.: Dynamic CCA control and TPC simulation results with SS1 SS3, available from <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 2020-05-11).
- [5] Afaqui, M.S., Garcia-Villegas, E., Lopez-Aguilera, E., Smith, G. and Camps, D.: Evaluation of dynamic sensitivity control algorithm for IEEE 802.11ax, *Proc. 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1060–1065 (Mar. 2015).

- [6] Murakami, K., Ito, T. and Ishihara, S.: Improving the spatial reuse of IEEE 802.11 WLAN by adaptive carrier sense threshold of access points based on node positions, *Proc. 8th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp.132–137 (Jan. 2015).
- [7] Kim, S., Yi, J., Son, Y., Yoo, S. and Choi, S.: Quiet ACK: ACK transmit power control in IEEE 802.11 WLANs, *Proc. IEEE INFOCOM 2017 – IEEE Conference on Computer Communications*, pp.1–9 (May 2017).
- [8] Yamamoto, K., Yang, X., Nishio, T., Morikura, M. and Abeysekera, H.: Analysis of inversely proportional carrier sense threshold and transmission power setting, *Proc. 14th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*, pp.13–18 (Jan. 2017).
- [9] Kamerman, A. and Monteban, L.: WaveLAN-II: A high-performance wireless LAN for the unlicensed band, *Bell Labs Tech. J.*, pp.118–133 (Aug. 1997).
- [10] Smithies, D.: Minstrel rate control algorithm, available from <http://linuxwireless.org/en/developers/Documentation/mac80211/RateControl/minstrel> (2006).
- [11] Mvulla, J. and Park, E.: Enhanced dual carrier sensing with transmission time control for fair spatial reuse in heterogeneous and dense wlangs, *IEEE Access*, Vol.6, pp.22140–22155 (Apr. 2018).
- [12] Merlin, S. et al.: TGax simulation scenarios, available from <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00ax-simulation-scenarios.docx> 2015 (accessed 2020-05-11).



坂井 渉太 (学生会員)

2020 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科修士課程在学中。



岩井 皓暉

2018 年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2020 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。



シュウ チョウブン

2017 年ブリュッセル自由大学工学科卒業。現在、ダブルディグリー制度にてブリュッセル自由大学電気工学修士課程、慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程在学中。



重野 寛 (正会員)

1990 年慶應義塾大学理工学部計測工学科卒業。1997 年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。現在、同大学理工学部教授。博士（工学）。情報処理学会学論文誌編集委員，同 DPS 研究会主査，同理事，電子情報通信学会

英文論文誌 B 編集委員，Secretary of IEEE ComSoc APB 等を歴任。現在，同 IITS 研究会主査，Co-Chair of IEEE ComSoc APB ISC。ネットワーク・プロトコル，ITS 等の研究に従事。著書「ユビキタスコンピューティング」（オーム社），「情報学基礎第 2 版」（共立出版）等。電子情報通信学会，IEEE，ACM 各会員。