

全二重通信無線 LAN における公平性と QoS の改善

飯田 直人[†] 西尾 理志[†] 守倉 正博[†] 山本 高至[†]
鍋谷 寿久^{††} 青木 亜秀^{††}

[†] 京都大学 大学院情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町
^{††} 株式会社東芝 研究開発センター 〒212-8582 神奈川県川崎市幸区小向東芝町 1
E-mail: †info16@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

あらまし 全二重通信無線 LAN では送信と受信を同時に同じ周波数帯で同時に行うため、1 台の AP (Access Point) とその左右に配置された 2 台の STA と AP への上り通信を行う STA (station) A, AP からの下り通信を受信する STA B による一方全二重通信 UFD (user-multiplexing Unidirectional Full-Duplex) の場合、AP の受信信号に AP の送信信号が影響を与える自己干渉と、STA A の送信信号が STA B の受信信号に干渉を与えるユーザ間干渉が問題となる。自己干渉は自己干渉除去技術によって低減可能であるが、ユーザ間干渉は除去できない。そのため、ユーザ間干渉の影響を小さくするため、全二重通信に参加する 2 台の STA の組み合わせをユーザ間干渉を考慮して決定する手法がこれまで検討されている。しかし、従来の手法ではシステムスループットを最大化するために、自己干渉やユーザ間干渉の量に応じて変動する過去の受信成功確率やスループットをもとに STA の組み合わせを決定するため、STA 間の公平性やアプリケーションサービスの要求の違いを考慮できていない。特に、遅延が小さいことが望ましいアプリケーションサービスを用いている STA であっても、干渉が大きければ送信機会を得にくくなる。本稿ではこれらの問題解決のために、従来の手法で定式化された STA の組み合わせを決定するための最適化問題に変更を加え、新たな組み合わせ決定手法を提案する。まず、各 STA が送信を待機している時間を考慮に入れることで STA 間の公平性を改善する。さらに、遅延が小さいことが望ましいアプリケーションサービスを用いる STA のに優先的に送信機会を増加させ与え、QoS (Quality of Service) を向上させる手法を提案する。さらに、提案手法による公平性の改善効果と低遅延を要求する STA の QoS の向上効果を計算機シミュレーションにより明らかにする。

キーワード 全二重通信無線 LAN, ユーザ間干渉, 最適化

Fairness and QoS improvement for in-band full-duplex WLANs

Naoto IIDA[†], Takayuki NISHIO[†], Masahiro MORIKURA[†], Koji YAMAMOTO[†],
Toshihisa NABETANI^{††}, and Tsuguhide AOKI^{††}

[†] Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan
^{††} Corporate Research & Development Center, TOSHIBA Corporation 1 Komukaitoshiba-cho, Saiwai-ku,
Kawasaki-shi, Kanagawa 212-8582, Japan
E-mail: †info16@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

Abstract Wireless devices of in-band full-duplex (IFBD) wireless local area networks (WLANs) can transmit and receive frames at the same time and the same frequency channel. In uni-directional Self-interference and inter-user interference become a big problem in the user-multiplexing unidirectional full-duplex WLANs by which consist of an access point (AP), station (STAs) A and B, self-interference and inter-user interference become a big problem. The self-interference is an interference in to the received signal of AP caused by own transmission signal, and the inter-user interference is an interference in STA B caused by STA A. The self-interference can be canceled sufficiently by the cutting edge cancellation technology, but the inter-user interference cannot be canceled easily. Conventional To solve this problem conventional methods had already proposed some schemes to select a pair of STAs to communicate in the full-duplex IFBD system considering influences of the inter-user interferences. However, since these schemes select pairs of STAs based on only the past full-duplex IFBD transmission success probability or throughput, they cannot take had not taken into account fairness between STAs and application services which require short delay. In this paper, we modify optimization problem of the conventional method. We propose a scheme to improve the fairness and quality of service (QoS) by modifying the conventional method. Simulation results show that the proposed methods improve outperform the conventional method in terms of the fairness and QoS.

Key words full-duplex wireless LAN, inter-user interference, optimization

1. はじめに

近年、無線 LAN(Local Area Network) が急速に普及し、急増するトラフィックにより 2.4 GHz 帯は逼迫しており、近い将来 5 GHz 帯も同様の状態になることで、スループットの低下が問題となる。そのような状況において、無線 LAN システムの大容量化が望まれる。大容量化を実現する方法の一つとして、送信と受信を同時に同じ周波数帯で同時に行う全二重通信無線 LAN が有望である。全二重通信無線 LAN では送信と受信を同時に同じ周波数帯で同時に行うため、理想的には周波数利用効率を 2 倍にすることができる。この全二重通信無線 LAN の実現に向けては様々な MAC (Media Access Control) プロトコルが提案されている [1-7]。

全二重通信無線 LAN では図 1 に示すような上り通信を送信する STA と下り通信を受信する STA が異なる全二重通信 (UFD: user-multiplexing Full-Duplex) 無線 LAN では、従来の半二重通信では存在しなかった二つの干渉が問題となる。一つは、送受信を行っている AP (Access Point) において、送信信号が所望の受信信号に干渉を及ぼす自己干渉であり、もう一つは、STA (station) j の送信信号がもう一方の STA i の受信信号に干渉を及ぼすユーザ間干渉である。自己干渉は自己干渉除去技術によって無視できるレベルまで削減できることが示されている [1, 8]。また、ユーザ間干渉に関しても、適切な STA の組み合わせを選び出すことや、送信電力制御を行うことでユーザ間干渉を削減低減する手法が提案されている [9, 10]。しかし、[9] では 1 対の STA の組み合わせを選び出すために過去の全二重通信の成功確率が用いられるため、干渉の影響のみが考慮され STA 間の公平性が低下する問題がある。また [10] では、干渉が小さく推定されるスループットが大きくなる STA の組み合わせの割合ほど選ばれる確率が高くなるような設計となっている。上り通信を行う STA の決定に際しては CSMA/CA (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance) のバックオフアルゴリズムを用いるためある程度の公平性は保証されるが、バックオフカウンタがスループットに依存するの最大値であるコンテンツンションウィンドウサイズを前述の確率の逆数とする手法をとっているため、干渉の影響が依然として小さく推定されるスループットが大きいきいほどコンテンツンションウィンドウサイズが小さく送信できる確率が高くなるため、公平性は低い。さらに、両者は各 STA が利用しているアプリケーションサービスの要求の違いが考慮されておらず、例えば低遅延を要求するような STA が存在してもそれに応えることはできない。これらの理由からしても、優先的に送信機会をあたえるなどの特別な対応を取ることができず、それら STA の大きく QoS が大きく低下してしまう問題がある。

本稿では、これらの問題を解決した組み合わせの決定を実現するために、従来方式 [10] で定式化された最適化問題に変更を加える。まず、STA 間の送信機会の公平性を改善するための評価関数を提案する。次に、各 STA が利用しているアプリケーションサービスの要求に違いがある場合、特に低遅延を要求する STA とそうでない STA が混在している場合において、低遅延を要求する STA の送信機会を増加させ QoS を向

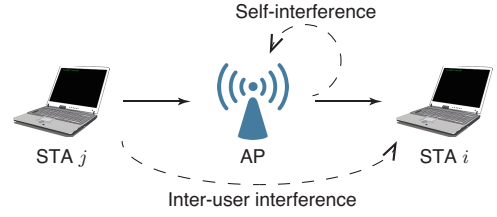


図 1: 一方全二重通信 UFD における自己干渉とユーザ間干渉

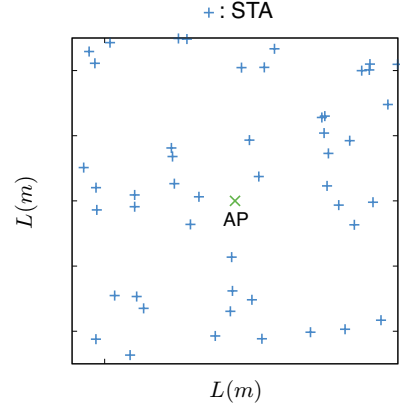


図 2: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

上する手法するために制約条件の値の調整を提案する行う。さらに、二つの提案手法の有効性を計算機シミュレーションによって評価する。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章で本稿で扱うシステムモデルについて述べ、第 3 章では従来の MAC プロトコル [10] について述べる。さらに、第 4 章において提案手法について述べ、第 5 章では提案手法の有効性をシミュレーションによって評価する。最後に第 6 章でまとめとする。

2. システムモデル

本稿で検討するシステムモデルを図 2 に示す。1 台の AP が $L \times m$ 四方の領域の中心に設置され、その周りに N 台の STA がランダムに配置されているとする。それら STA のインデックス集合を $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ とする。この N 台の STA の中から、図 1 のように AP からの下り通信を受信する STA i と、AP への下り通信を行う STA j を選び出す。このとき、STA の組み合わせを (i, j) と表現し、 $i, j \in \{0\} \cup \mathcal{N}$ であり、STA は自己干渉除去技術を持たないため双方向全二重通信はできないと仮定して $i \neq j$ とする。ただし、 $i = 0$ のときは下り通信を伴わない上り通信のみの半二重通信であり、 $j = 0$ のときは上り通信を伴わない下り通信のみの半二重通信であるとする。さらに、この N 台の STA の中に低遅延を要求するアプリケーションサービスを用いている STA が n 台存在し、そのインデックス集合を $\mathcal{D} \subset \mathcal{N}$ とする。ただし、低遅延を要求しない STA のインデックス集合は $\overline{\mathcal{D}}$ と表し、 $\mathcal{D} \cup \overline{\mathcal{D}} = \mathcal{N}$ 、 $\mathcal{D} \cap \overline{\mathcal{D}} = \emptyset$ とする。また、STA の組み合わせを決定する際に用いる実効スループットには、上り下り通信のそれぞれの SINR (Signal-to-Interference plus Noise power Ratio) から求めたシャノン容量を用いる。

3. 従来方式

本章では従来方式 [10] の MAC プロトコルについて述べる。この MAC プロトコルはシステムスループットを最大化するため、**各全ての STA の組み合わせごとに**推定されるスループットを評価関数に用いた最適化問題を解くことで**その組み合わせ毎にその組み合わせによって**全二重通信が行われる確率を求め、その確率に基づいて STA の**組み合わせが i, j が**決定される。

3.1 STA の組み合わせの決定手順

本節では [10] における STA の組み合わせの決定手順について述べる。この MAC プロトコルでは、AP と STA i, j の組み合わせで全二重通信が行われる確率 $p^{(i, j)}$ に基づいて STA i, j が決定される。

まず、全二重通信の組み合わせを**わ**の集合 $\mathcal{C}_{\text{full}}$ を式 (1) に示す。

$$\mathcal{C}_{\text{full}} \triangleq \{(i, j) : i, j \in \mathcal{N}, i \neq j, r_d^{(i, j)}, r_u^{(i, j)} > \epsilon\} \quad (1)$$

ただし、 $r_d^{(i, j)}$, $r_u^{(i, j)}$ はそれぞれ AP から STA i への下りの実効スループット、STA j から AP への上りの実効スループットであり、 ϵ はスループットが 0 に近くなるような STA の組み合わせを除くためのしきい値である。実行スループットの推定には干渉の影響が含まれ、干渉が小さいほど $r^{(i, j)}$ は大きくなる。 $\mathcal{C}_{\text{full}}$ に**の全組み合わせに対して**、上り下りそれぞれの上下通信の実効スループット $r_d^{(i, j)}$, $r_u^{(i, j)}$ を推定し、**その合計を $r^{(i, j)} = r_d^{(i, j)} + r_u^{(i, j)}$ とする**。さらに、半二重通信の組み合わせ

$$\mathcal{C}_{\text{half}} \triangleq \{(i, j) : i = 0 \text{ or } j = 0, r^{(i, j)} > \epsilon\} \quad (2)$$

に対しても実効スループット $r^{(i, j)}$ を推定する。得られた $r^{(i, j)}$ に基づいて以下の最適化問題を解き、確率 $p^{(i, j)}$ を得る。

$$\mathcal{P}_1 : \quad \max \sum_{(i, j) \in \mathcal{C}} p^{(i, j)} r^{(i, j)} \quad (3)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)} \geq \eta_d^{(i)}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \{i : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)} \geq \eta_u^{(j)}, \forall j \in \mathcal{N} \quad (5)$$

$$\sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)} = 1 \quad (6)$$

$$\text{variables : } p^{(i, j)} \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \forall (i, j) \in \mathcal{C}$$

実行スループット $r^{(i, j)}$ の推定には干渉の影響が含まれるため、干渉が小さく $r^{(i, j)}$ が大きい STA の組み合わせほど $p^{(i, j)}$ が大きくなる。ただし、 $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{\text{full}} \cup \mathcal{C}_{\text{half}}$ である。 $\eta_d^{(i)}$ は STA i への**下り通信のトラヒックに比例した値送信先となる確率 $p_d^{(i)} = \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$ の最低値であり**、STA i が**への下り通信の送信先となる確率 $p_d^{(i)} = \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$ の最低値を定める役割を果たすトラヒックに比例した値が設定される**。同様に、 $\eta_u^{(j)}$ は $p_u^{(j)} = \sum_{i \in \{i : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$ の最低値であり、STA j が**持つの上り通信のトラヒックに比例した値であり**、STA j が**上り通信の送信権を得る確率 $p_u^{(j)} = \sum_{i \in \{i : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$ の最低値を定める役割を果たす設定される**。

また、以下の条件が満たされるとき必ず解が得られることが示されている。

$$r_d^{(i, 0)} > \epsilon, \forall i \in \mathcal{N} \quad (7)$$

$$r_u^{(0, j)} > \epsilon, \forall j \in \mathcal{N} \quad (8)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} \eta_d^{(i)} + \sum_{j \in \mathcal{N}} \eta_u^{(j)} = 1 \quad (9)$$

なお、この最適化問題は**最大で最も間隔が狭い場合** AP が送信するビーコン信号周期ごとに解かれ、更新された確率 $p^{(i, j)}$ はビーコンフレームによって STA に通知される。

次に、得られた $p^{(i, j)}$ を用いて STA i, j を決定する方法を述べる。AP は

$$p_d^{(i)} = \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}, \forall i \in \{0\} \cup \mathcal{N} \quad (10)$$

によって各 STA が下り通信の送信先となる確率 $p_d^{(i)}$ を求め、この確率 $p_d^{(i)}$ に従って**一様ランダム確率的に**送信先 STA i を選択する。**次に続いて** STA j を決定する**の上り通信の送信権について述べる**。**各 STA i の決定後** STA i 以外の全ての STA は、「AP が STA i へ下り通信を行うことが決まった上で自身が AP への上り通信の送信権を獲得する」という条件付き確率 $p_u^{(i, j)}$ を

$$p_u^{(i, j)} = P(j \text{ wins uplink} | \text{AP sends to } i) = p^{(i, j)} / p_d^{(i)} \quad (11)$$

と求め、コンテンツンウィンドウサイズ $CW_u^{(i, j)}$ を**次式**とする。

$$CW_u^{(i, j)} = \lceil 1/p_u^{(i, j)} \rceil \quad (12)$$

ただし、 $\lceil x \rceil$ は x を超えない最大の整数である。各 STA は $[0, CW_u^{(i, j)}]$ の一様分布から生成されるバックオフカウンタ $w_u^{(i, j)}$ を設定し、CSMA/CA のバックオフアルゴリズムを用い、いてバックオフカウンタを 1 ずつ減らし、その結果、最初にカウンタが 0 となった STA が**STA j として上り通信を行う**。この方法により、 $p_u^{(j)}$ が大きい STA、つまり式 (3), (11) より $r^{(i, j)}$ が大きい STA ほど $CW_u^{(i, j)}$ が小さくなり、送信権を獲得する得やすくなる。

3.2 問題点

前節で述べたように式 (3) からわかるように [10] では、STA i, j の干渉が小さくスループット $r^{(i, j)}$ が大きい組み合わせほど選ばれやすくなる。図 3 に STA 台数を $N = 50$ としたシステムで**従来の従来方式による** STA の組み合わせの決定手順を再現したシミュレーションによって得られた各 STA の上り通信送信回数を示す。この結果からわかるように、から一部の STA が**非常に STA j として集中して**選ばれやすいたことがわかる、このことから、送信機会に関する公平性は低く、加えて、低遅延を要求するようなアプリケーションサービスを利用している STA が存在する場合にも、その要求に応えることはできないという問題がある。本稿では、この 2 つの問題点に関して解決を図り、QoS の向上を目指す。

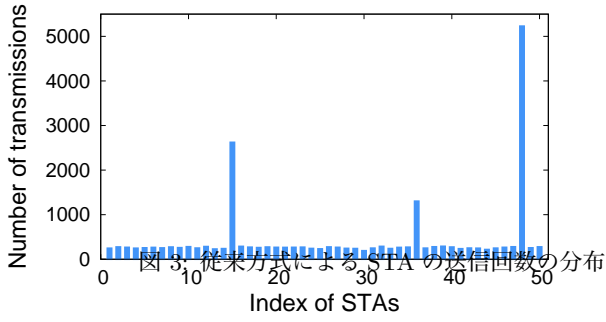


図 3: 従来方式による STA の送信回数の分布

4. 提案方式

4.1 公平性の改善

本節では STA 間の送信機会の公平性を改善するための検討を行う。最初前節に述べたように従来方式の MAC プロトコルでは干渉が小さい組み合わせが選ばれやすく、STA 間の公平性が低下するという問題点がある。この問題を解決するため以下のように、式 (3) に待機時間 $d^{(j)}$ の項を評価関数に追加する。

$$\mathcal{P}_2 : \max \sum_{(i,j) \in C} p^{(i,j)} r^{(i,j)} (d^{(j)})^\alpha \quad (13)$$

待機時間 $d^{(j)}$ とは STA j のバッファの先頭にフレームが到着してから現在時刻までの時間である。この待機時間の項を追加することで、待機時間が長い STA を含んだ組み合わせが選ばれる確率が高くなり、送信機会を得られていない STA ほど送信機会を得やすくなる。また、待機時間は飽和トラヒックである限りは前回の送信時刻からの経過時間と同じであるため、新たに各 STA の待機時間情報を収集する必要はなく、AP が各 STA ごとに最新の送信時刻を記憶していればすることで、現在時刻との差として得られる。追加する項として各 STA の平均送信間隔や送信回数そのものを選択しない理由は、両者はいずれも積算値であるため、瞬時性がなく、新たに追加された STA が AP に対応できないためである。接続された場合に平均送信間隔は定義できず、送信回数は 0 であるため以前から接続されているにもかかわらず送信機会を得られていない STA との区別がつかないといったことが生じるためである。

公平性の改善を行うと、公平性の改善を行わない場合に比べて比較的干渉の多い STA の組み合わせが選ばれることが多くなり、システムスループットの低下が考えられる。そのため、公平性の改善とシステムスループットの低下のトレードオフを調整可能とするための重み係数 $\alpha \geq 0$ を導入している。 α が小さい場合は待機時間 $d^{(j)}$ の影響が小さくなるため、システムスループットが高くなり公平性は低くなる。逆に α が大きい場合は待機時間 $d^{(j)}$ の影響が大きくなり、システムスループットが大きく低下するかわりに公平性が高くなる。

4.2 低遅延を要求する STA の QoS の向上

本節では、システム全体の公平性を改善した上で、さらに低遅延を要求する STA の QoS 改善を行う提案方式について述べる。低遅延を要求する STA の QoS を向上させるためには、上

表 1: シミュレーション諸元

領域の大きさ L	100 m
伝送速度	シャノン容量
送信電力	15 dBm
雑音指数	10 dB
減衰定数	3
周波数帯	5 GHz
自己干渉キャンセル	110 dB
シミュレーション時間	10 s

り通信を行う確率 $p_u^{(j)}$ を大きくし、送信機会を増加させればよい。これを実現するために、式 (5) において $p_u^{(j)}$ の最低値を決定していた $\eta_u^{(j)}$ を大きくすることを新たに設定し直すことを考える。具体的には従来方式では、以下 STA j の式のように上り通信のトラヒックに比例した値が $\eta_u^{(j)}$ には設定されていたが、提案方式では、低遅延を要求していない STA j ($\forall j \in \overline{\mathcal{D}}$) の最低送信確率 $\eta_u^{(j)}$ から x_j だけ譲り受け小さくし、それを低遅延を要求する STA j ($\forall j \in \mathcal{D}$) の最低送信確率 $\eta_u^{(j)}$ を x'_j だけ大きくする。これは、新たに設定される最低値を $\hat{\eta}_u^{(j)}$ に加える」とすると以下のように書ける。

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} - x_j > 0, \forall j \in \overline{\mathcal{D}} \quad (14)$$

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} + x'_j, \forall j \in \mathcal{D} \quad (15)$$

$$\sum_{j \in \overline{\mathcal{D}}} x_j = \sum_{j \in \mathcal{D}} x'_j \quad (16)$$

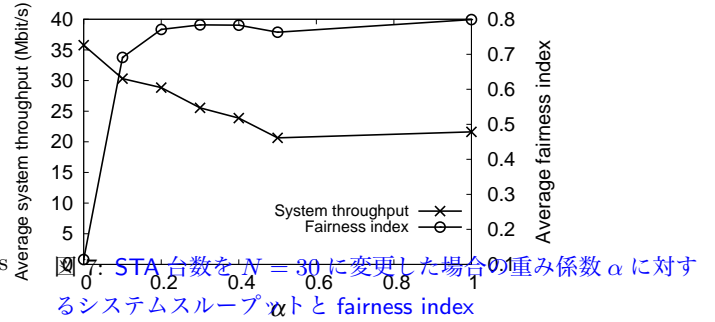
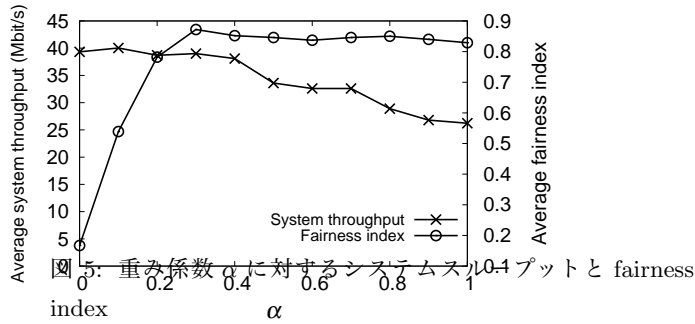
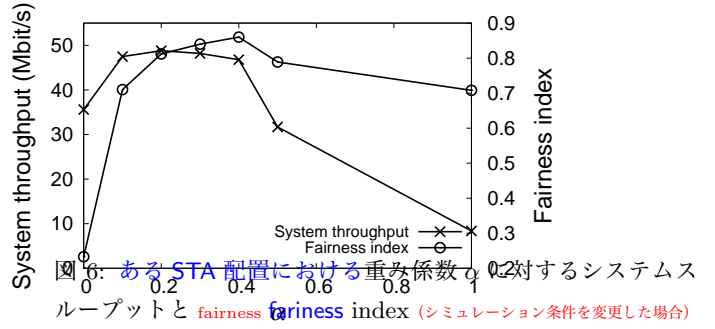
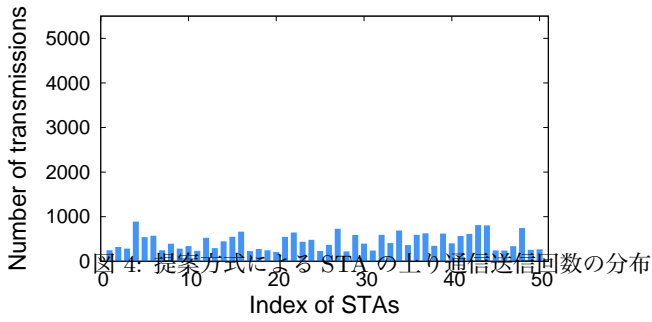
なお、式 (16) は式 (9) を満たし可解性を失わないための条件である。提案方式では以上のように新たに設定された $\hat{\eta}_u^{(j)}$ を最適化問題の制約条件である式 (5) に用いる。これによって、低遅延を要求する STA の送信機会が増加し送信間隔が短くなることで遅延時間が短縮され QoS が改善される。

5. シミュレーション評価

本章では提案手法の有効性をシミュレーションによって評価する。シミュレーション諸元を表 1 に示す。MAC プロトコルは [10] に従い、上下通信ともに飽和トラヒックの場合を取り扱う。

5.1 公平性の改善

図 4 に STA 台数を $N = 50$ とした場合の各 STA の全シミュレーション時間内での上り通信送信回数を示す。図 3 と比較して、一部の STA が極端に選ばれやすいという現象が改善されていることがわかる。次に、システムスループットと公平性の関係性を確認するため、図 5 にシステムスループットと STA 間の公平性を示す。ただし、いずれも図 2 のような結果は 10 種類異なる STA 配置によるシミュレーション結果の平均値であり、公平性の評価は Jain's fairness index [11] に各 STA の送信回数を代入することで求めている。STA 間の送信機会に関する公平性を大きく改善した上、重み係数 α を変化させることで、公平性の改善とシステムスループット低下のトレードオフをシステ



ムの要求に応じて変化可能である。また、この場合 $\alpha = 0.3$ のときにスループットシステムスループットの低下が小さく、公平性が高くなっている。

次に、このスループットの低下が小さく、公平性が高くなる α の値がシミュレーション条件によってどのように変化するかを示す。まずは、STA の配置が結果に与える影響を確認するため、図??6 に最初の 10 種とは異なるある STA 配置の場合におけるシステムスループットと STA 間の公平性を示す。この場合、システムスループットの低下が小さく、STA 間の公平性が高い α の値は 0.2 程度である。さらに、STA 台数が結果に与える影響を確認するため、図??7 に STA 台数を $N = 30$ とした場合の結果を示す。ただし、結果は 10 種類異なる STA 配置によるシミュレーション結果の平均値である。この場合にも、 $\alpha = 0.2$ あたりでバランスが良いことがわかる。いずれもスループットの値や fairness index の値は異なるが、概ね α は 0.2 から 0.3 で公平性の改善とスループットの低下のバランスが良いことがわかる。

5.2 低遅延を要求する STA の QoS の向上

次に、低遅延を要求する STA の QoS 向上について評価を行う。本シミュレーションでは式 (14) における x_j は低遅延を要求しない全 STA 全てで共通の値 $x_j = x, \forall j \in \overline{D}$ とし、式 (15) における $x_j x'_j$ も低遅延を要求する全 STA 全てで共通の値 $x_j = x|\overline{D}|/|\mathcal{D}|, \forall j \in \overline{D}, x'_j = x|\mathcal{D}|/|\overline{D}|, \forall j \in \mathcal{D}$ とした。ただし、 $|\overline{D}|$ は低遅延を要求しない STA の台数、 $|\mathcal{D}|$ は低遅延を要求する STA の要素数台数を表す。また、全 STA 台数 N は 50 台であり、 $\alpha = 0.3$ である。

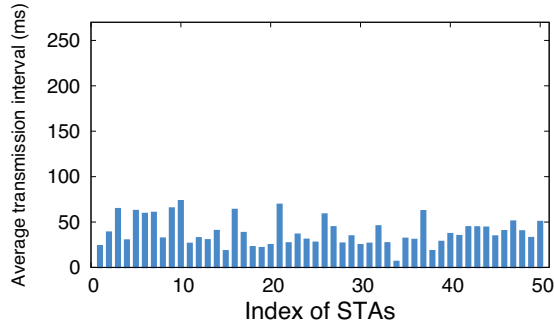
まず最初に低遅延を要求する STA 台数を $n = 5$ 台、 $x = 0.05x =$

0.005 とした場合に、それらの送信間隔が短縮されていることを確認する。低遅延を要求する STA は $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$ であるとする。図 8(a) に公平性のみを考慮した場合について、図 8(b) に低遅延を要求する STA の送信機会を増加させた場合について各 STA の平均送信間隔を示す。ただし、いずれもある 1 種の STA 配置における結果である。公平性のみを考慮した場合は全 STA 間の送信機会の公平性が高いことから、送信間隔のばらつきが少ないが、低遅延を要求する STA 46 から 50 の送信間隔も平均 43 ms と長い。一方、アプリケーションサービスの違いを考慮し、低遅延を要求する STA の送信機会を増加させたところ、送信間隔を 15 ms と 1/3 程度まで削減することができた。しかし、低遅延を要求しない STA 間の公平性は、公平性のみを考慮していた場合に比べて劣化した。

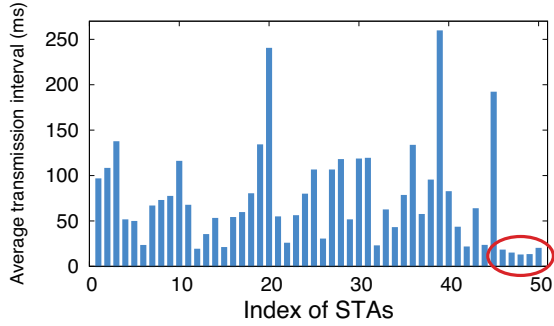
次に、図 9 に x の値に対する低遅延を要求する 5 台の STA の平均送信間隔を示す。 x を大きくするほど低遅延を要求する 5 台の STA の平均送信間隔が小さくなっている。この結果から、アプリケーションサービスが要求する遅延時間に応じて送信間隔を調整可能であることがわかる。

6. ま と め

本稿では、全二重通信無線 LAN の既存の MAC プロトコルが持つ STA 間の公平性の低さと STA が利用しているアプリケーションサービスの違いを考慮できていないといった問題について検討し、それらを解決する手法を提案した。各 STA の待機時間送信待機時間を考慮することに入れ、送信機会を得ることができていない STA に送信機会を与えることで STA 間の公平性を大幅に改善し、さらに、重み係数 α によって公平性の改善と



(a) 公平性の改善のみを行った場合の STA の平均送信間隔



(b) 低遅延を要求する STA の送信機会を増加させた場合の STA の平均送信間隔

図 8: STA の平均送信間隔の比較

- [5] J. Lin, C. Zhang, Q. Peng, and C. Wan, "Morif: A mac protocol for full-duplex transmissions in wireless star networks," Proc. IEEE International Conf. Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID), pp.1–4, Shanghai, Oct. 2013.
- [6] A. Sahai, G. Patel, and A. Sabharwal, "Pushing the limits of full-duplex: Design and real-time implementation," Technical report, Rice University, July 2011.
- [7] W. Cheng, X. Zhang, and H. Zhang, "RTS/FCTS mechanism based full-duplex MAC protocol for wireless networks," Proc. IEEE GLOBECOM, pp.5017–5022, Atlanta, GA, US, Dec. 2013.
- [8] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.43, no.4, pp.375–386, Oct. 2013.
- [9] N. Singh, D. Gunawardena, A. Proutiere, B. Radunovic, H.V. Balan, and P. Key, "Efficient and fair MAC for wireless networks with self-interference cancellation," Proc. WiOpt, pp.94–101, Princeton, NJ, USA, May 2011.
- [10] S. Y. Chen, T. F. Huang, K. C. J. Lin, Y. W. P. Hong, and A. Sabharwal, "Probabilistic-based adaptive full-duplex and half-duplex medium access control," Proc. IEEE GLOBECOM, pp.1–6, San Diego, CA, USA, Dec. 2015.
- [11] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe, A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer system, Technical Report TR-301, DEC Research Report, Sept. 1984.

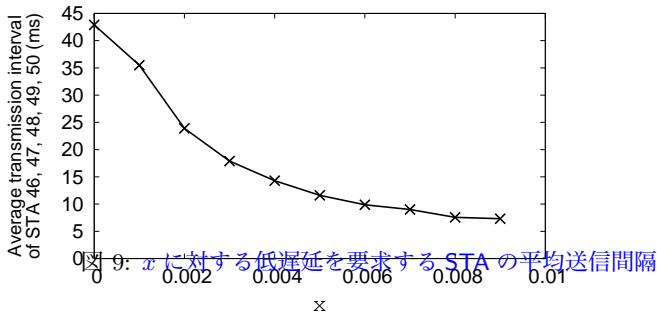


図 9: x に対する低遅延を要求する STA の平均送信間隔

スループットの低下のバランスを調整できることを示した。また、低遅延を要求するような STA の送信機会を増加させることで QoS の改善を行った。

文 献

- [1] M. Duarte, A. Sabharwal, V. Aggarwal, R. Jana, K.K. Ramakrishnan, C.W. Rice, and N.K. Shankaranarayanan, "Design and characterization of a full-duplex multiantenna system for WiFi networks," IEEE Trans. Veh. Technol., vol.63, no.3, pp.1160–1177, Mar. 2014.
- [2] S. Goyal, P. Liu, O. Gurbuz, E. Erkip, and S. Panwar, "A distributed mac protocol for full duplex radio," Proc. IEEE Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, pp.788–792, Pacific Grove, CA, Nov. 2013.
- [3] J.Y. Kim, O. Mashayekhi, H. Qu, M. Kazadiieva, and P. Levis, "Janus: A novel MAC protocol for full duplex radio," Stanford Univ., Tech. Rep., July 2013.
- [4] S. Kim and W.E. Stark, "On the performance of full duplex wireless networks," Proc. 47th Annual Conf. Information Sciences and Systems (CISS), pp.1–6, Baltimore, MD, Mar. 2013.