

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 (station) A, B による一方向全二重通信の場合、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。本稿ではこの問題解決のために、従来研究で定式化された 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 間で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 の送信機会を増加させ、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 wireless local area networks (WLANs) can transmit and receive at the same time and the same frequency channel. In uni-directional full-duplex WLANs by 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 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. Conventional methods had already proposed schemes to select a pair of STAs to communicate in the full-duplex system considering influences of the inter-user interferences. However, since these schemes select STAs based on only the past full-duplex transmission success probability or throughput, they cannot take 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). Simulation results show that the proposed methods improve 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 STA の組み合わせの決定に際して CSMA/CA (Carrier Sense 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手法をとっているため干渉の影響が依然として大きく、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、STA の大きく QoS が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するために、まず STA 間の送信機会の公平性を改善する手法を提案する。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 を向上する手法を提案する。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

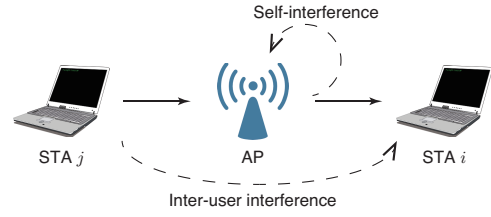


図 1: 一方方向全二重通信

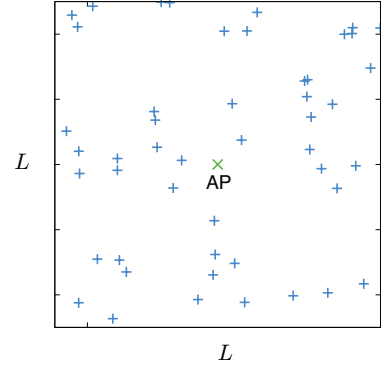


図 2: システムモデル

L 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 への上り通信を行う 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。

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 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. $\mathcal{C}_{\text{full}}$ に対して, 上り下りそれぞれ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 $r^{(i, j)}$ 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.

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

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

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

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

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

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であり, STA i が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. 同様に, $\eta_u^{(j)}$ は STA j が持つ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. 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 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, この確率に従って一様ランダムに送信先 STA i を選択する. 次に STA j を決定する. 各 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

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

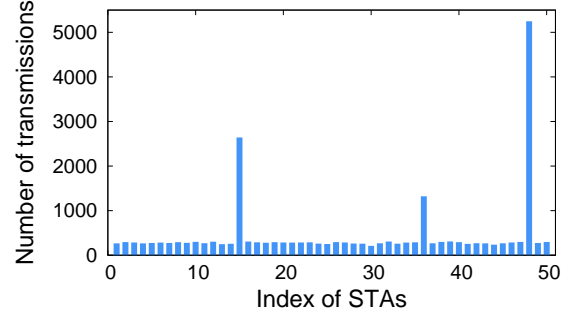


図 3: 従来方式による STA の送信回数の分布

と求め, コンテンションウィンドウサイズ $CW_u^{(i, j)}$ を

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

とする. 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, 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 として上り通信の送信権を獲得する.

3.2 問題点

前節で述べたように [10] では, STA i, j の干渉が小さい組み合わせが選ばれやすい. 図 3 に STA 台数を $N = 50$ としたシステムで従来の 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. 結果からわかるように, 一部の STA が非常に選ばれやすいことがわかる, 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.

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. 最初に述べたように従来の 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.

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

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, 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

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

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 に対応できないためである。

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。

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考える。具体的には、以下の式のように低遅延を要求していない STA の最低送信確率 $\eta_u^{(j)}$ から x_j だけ譲り受け、それを低遅延を要求する STA の最低送信確率 $\hat{\eta}_u^{(j)}$ に加える。

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

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

$$\sum_{j \in \bar{\mathcal{D}}} x_j = \sum_{j \in \mathcal{D}} x_j \quad (16)$$

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フィ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

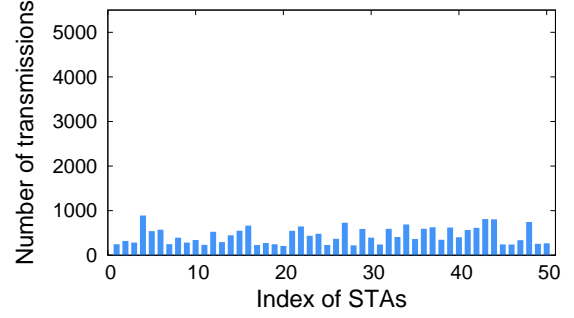


図 4: 提案方式による STA の上り通信送信回数の分布

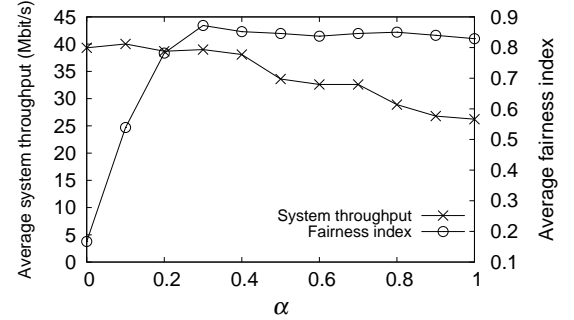


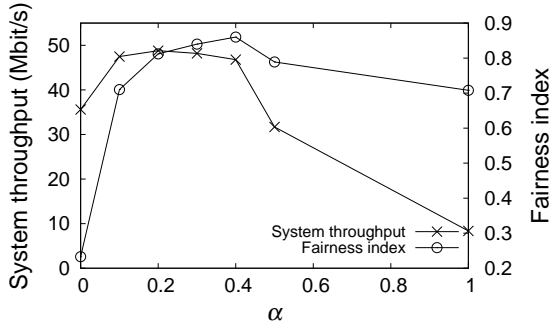
図 5: 重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

公平性を示す。ただし、いずれも図 2 のような 10 種の STA 配置の平均値であり、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。

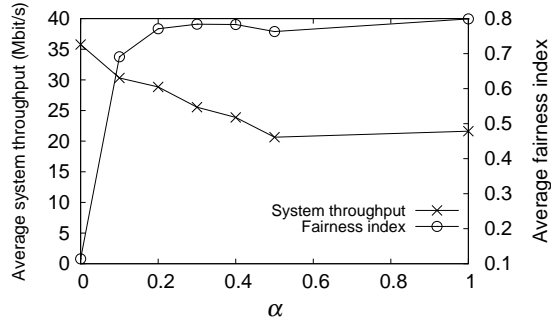
次に、このスループットの低下が小さく、公平性が高くなる α の値がシミュレーション条件によってどのように変化するかを示す。図 6(a) に最初の 10 種とは異なるある STA 配置の場合のシステムスループットと STA 間の公平性を示す。この場合、システムスループットの低下が小さく、STA 間の公平性が高い α の値は 0.2 程度である。さらに、図 6(b) に STA 台数を $N = 30$ とした場合の結果を示す。ただし、結果は 10 種の STA 配置による結果の平均値である。この場合にも、 $\alpha = 0.2$ あたりにバランスが良いことがわかる。いずれもスループットの値や 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 共通の値 $x_j = x, \forall j \in \bar{\mathcal{D}}$ とし、式 (15) における x_j も低遅延を要求する全 STA 共通の値 $x_j = x|\bar{\mathcal{D}}|/|\mathcal{D}|, \forall j \in \mathcal{D}$ とした。ただし、 $|\bar{\mathcal{D}}|$ は $\bar{\mathcal{D}}$ の、 $|\mathcal{D}|$ は \mathcal{D} の要素数を表す。また、STA 台数 N は 50 台であり、 $\alpha = 0.3$ である。



(a) ある STA 配置におけるシステムスループットと fairness index



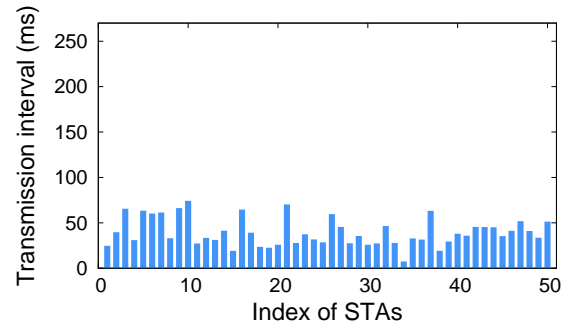
(b) STA 台数を $N = 30$ に変更した場合のシステムスループットと fairness index

図 6: 重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index (シミュレーション条件を変更した場合)

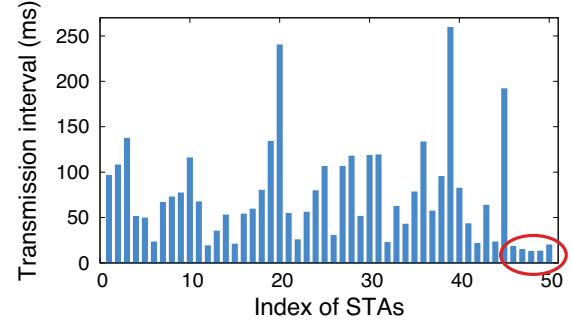
まず最初に低遅延を要求する STA 台数を $n = 5$, $x = 0.05$ とした場合に、それらの送信間隔が短縮されていることを確認する。低遅延を要求する STA は $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$ であるとする。図 7(a) に公平性のみを考慮した場合について、図 7(b) に低遅延を要求する STA の送信機会を増加させた場合について各 STA の平均送信間隔を示す。公平性のみを考慮した場合は全 STA 間の送信機会の公平性が高いことから、送信間隔のばらつきが少ないが、低遅延を要求する STA 46 から 50 の送信間隔も平均 43 ms 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。

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 の待機時間を考慮することで、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。



(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 の平均送信感覚

図 7: STA の平均送信間隔の比較

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.
- [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, 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 GLOBE-COM, pp.1–6, San Diego, CA, USA, 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.