

全二重通信無線 LAN における端末組み合わせ決定手法の検討

Station Pairing Scheme for In-Band Full-Duplex Wireless LANs

飯田 直人

Naoto Iida

京都大学大学院 情報学研究科 通信情報システム専攻 守倉研究室

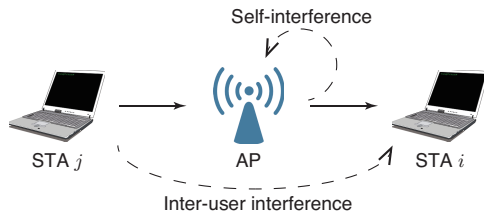


図 1: UFD における自己干渉とユーザ間干渉

1 はじめに

近年、無線 LAN (Local Area Network) システムの大容量化を実現する方法の一つとして、送信と受信を同じ周波数帯で同時に行う全二重通信無線 LAN が注目されており、理想的には無線 LAN の通信容量を 2 倍にすることができる。本稿では図 1 に示すような上り通信を行う STA と下り通信を受信する STA が異なる全二重通信 (UFD: user-multiplexing Unidirectional Full-Duplex) を扱う。この UFD 通信を用いた無線 LAN では二つの干渉が問題となる。一つは、送受信を行っている AP 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るが、自己干渉除去技術を用いて自己干渉を最大 110 dB 除去できることが示されている [1]。もう一つは、STA 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。ユーザ間干渉は自己干渉のように除去することができない。このユーザ間干渉の影響を低減するためには、干渉の大きさを考慮して適切な STA i, j 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が必要である。[2] では、STA の組み合わせ毎の干渉量から合計スループットを推定し、その値を最大化する STA の組み合わせを確率的に選択する方式を提案している。

しかし、これらの MAC (Media Access Control) プロトコルでは極端に条件の良い STA が存在すると組み合わせの選択に大きく偏りを生じ、公平性が低下する。加えて、QoS (Quality of Service) 制御に関する議論はなされておらず、例えば音声通話などの低遅延を要求するアプリケーションサービスを利用する STA に対しても干渉量やスループットを基準に STA を選択するため、送信機会が得られず遅延が大きくなる可能性がある。

本稿では、既存研究 [2] で議論される確率的な STA 選択手法を用いた MAC プロトコルをもとに、STA 間の送信機会の公平性を改善するための目的関数と STA 毎の遅延要求に応じた QoS 制御手法に関して提案する。更に、本手法の有効性を計算機シミュレーションにより評価する。

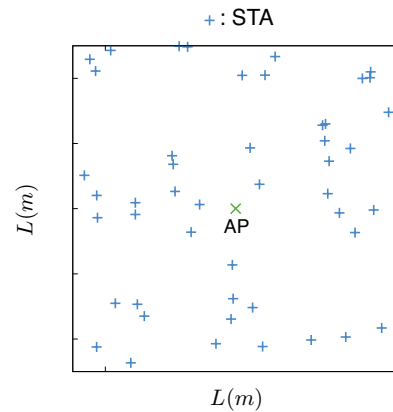


図 2: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

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 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ず BFD 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。更に、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 $\bar{\mathcal{D}} := \mathcal{N}/\mathcal{D}$ 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) から求めた以下のシャノン容量 C を用いる。

$$C = B \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (1)$$

ただし、 B は通信に用いる帯域幅である。

3 既存研究

本章では従来方式 [2] 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の期待値を目的関数とし、各 STA の組み合わせの選択確

率を変数とした最適化問題を解くことで各 STA の選択確率を決定し、確率的な STA 選択を行う。

3.1 STA の組み合わせの決定手順

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、UFD 通信を行う STA の組み合わせの集合 $\mathcal{C}_{\text{full}}$ を式 (2) に示す。

$$\mathcal{C}_{\text{full}} := \{(i, j) : i, j \in \mathcal{N}, i \neq j, r_d^{(i, j)}, r_u^{(i, j)} > \epsilon\} \quad (2)$$

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。 $\mathcal{C}_{\text{full}}$ の全組み合わせに対して、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、 $r^{(i, j)} = r_d^{(i, j)} + r_u^{(i, j)}$ とする。ただし、本稿では実効スループットの推定には式 (1) を用いる。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。更に、半二重通信の組み合わせ

$$\mathcal{C}_{\text{half}} := \{(i, j) : ij = 0, r^{(i, j)} > \epsilon\} \quad (3)$$

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。

$$\mathcal{P}_1 : \quad \max \sum_{(i, j) \in \mathcal{C}} p^{(i, j)} r^{(i, j)} \quad (4)$$

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

$$\sum_{i \in \{i : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)} \geq \eta_u^{(j)}, \forall j \in \mathcal{N} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)} = 1 \quad (7)$$

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

ただし、 $\mathcal{C} = \mathcal{C}_{\text{full}} \cup \mathcal{C}_{\text{half}}$ である。実行スループット $r^{(i, j)}$ は干渉が小さいほど大きくなり、大きい $r^{(i, j)}$ を持つ STA の組み合わせほど $p^{(i, j)}$ が大きくなる。 $\eta_d^{(i)}$ は STA i が下り通信の送信先となる確率 $p_d^{(i)} = \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$ の最低値であり、STA i への下り通信の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 の上り通信のトラヒックに比例した値が設定される。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。

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

$$r_u^{(0, j)} > \epsilon, \forall j \in \mathcal{N} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{N}} \eta_d^{(i)} + \sum_{j \in \mathcal{N}} \eta_u^{(j)} = 1 \quad (10)$$

なお、この最適化問題は毎回あるいは複数のビーコン信号周期毎に解かれ、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

$$p_d^{(i)} = \sum_{j \in \{j : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}, \forall i \in \{0\} \cup \mathcal{N} \quad (11)$$

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、 $p_d^{(i)}$ に従って確率的に送信先 STA i を選択する。続いて STA j の上り通信の送信権について述べる。AP からの下り通信を受信する STA i の決定後、AP は STA i へ送信するフレームのヘッダ部分のみを送信し、全 STA 到下り通信の送信先が STA i であることを通知する。STA i 以外のすべての STA は以下の条件付き確率

$$p_u^{(i, j)} = P(j \text{ wins uplink} \mid \text{AP sends to } i) = p^{(i, j)} / p_d^{(i)} \quad (12)$$

を計算する。これは 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確率を意味する。この条件付き確率をもとに、コンテンツウィンドウサイズ $\text{CW}_u^{(i, j)}$ を

$$\text{CW}_u^{(i, j)} = \lceil 1 / p_u^{(i, j)} \rceil \quad (13)$$

と設定する。ただし、 $\lceil x \rceil$ は x を超えない最大の整数である。各 STA は $[0, \text{CW}_u^{(i, j)}]$ 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てバックオフカウンタを 1 ずつ減らす。その結果、最初にカウンタが 0 となった STA が上り通信を行う。この方法により、 $p_u^{(j)}$ が大きい STA、つまり式 (4)、(12) より $r^{(i, j)}$ が大きい STA ほど $\text{CW}_u^{(i, j)}$ が小さくなり、送信権を得やすくなる。

3.2 課題

式 (4) からわかるように [2] 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る確率が高くなる。図 3 に STA 台数を $N = 50$ としたシステムで従来方式による各 STA の上り通信送信回数のシミュレーション結果を示す。この結果から一部の STA が上り通信を行う STA になる確率が高く、送信回数が突出して多くなり、送信機会に関する公平性は低くなっていることがわかる。加えて、STA 間の遅延要求の違いについては議論されておらず、低遅延を要求する STA が混在しその STA の実効スループットが低い場合、その STA が送信機会を得るまでに大きな遅延が生じる可能性がある。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

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、特定の STA

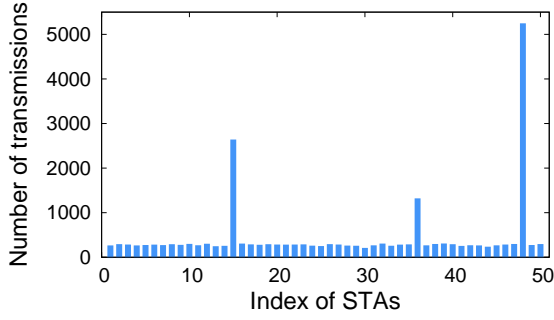


図3: 従来方式による STA の送信回数の分布

に送信機会が偏るという課題がある。この問題を解決するため以下の目的関数を提案する。

$$\mathcal{P}_2 : \max \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} p^{(i,j)} r^{(i,j)} (d^{(j)})^\alpha \quad (14)$$

$d^{(j)}$ は待機時間であり、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とする。この待機時間の項を追加することで、待機時間が長い STA、つまり、送信機会を得られていない STA を含んだ組み合わせが選ばれる確率が高くなり、送信機会の均等化を図ることができる。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 毎に最新の送信時刻を記憶することで、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、新たに STA が AP に接続された場合平均送信間隔は定義できず、送信回数は 0 であるため選択される確率が極端に高くなり短期的な不公平性が生じる可能性があるためである。

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 $\alpha \geq 0$ を導入する。 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、更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 (6) において $p_u^{(j)}$ の最低値を決定している $\eta_u^{(j)}$ の設定法を検討する。従来方式では、STA j の上り通信のトラヒックに比例した値が $\eta_u^{(j)}$ には設定されているが、提案方

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
周波数帯 f	2.4 GHz
帯域幅 B	20 MHz
伝搬損失	$20 \log f + 30 \log d - 28$ (d : 送受信点間距離)
自己干渉除去	110 dB
シミュレーション時間	10 s

式では以下のように新たな $\hat{\eta}_u^{(j)}$ を設定する。

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

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} + x'_j, \quad \forall j \in \mathcal{D} \quad (16)$$

$$\sum_{j \in \bar{\mathcal{D}}} x_j = \sum_{j \in \mathcal{D}} x'_j \quad (17)$$

低遅延を要求していない STA の $\eta_u^{(j)}$ を x_j だけ小さくし、低遅延を要求する STA の $\eta_u^{(j)}$ を x'_j だけ大きくする。ただし、 $0 < x_j < \eta_u^{(j)}$, $\forall j \in \bar{\mathcal{D}}$ であり、 $0 < x'_j$, $\forall j \in \mathcal{D}$ とする。また、式 (17) は式 (10) 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 (6) 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。図 2 のように、1 台の AP が L 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。MAC プロトコルは [2] に従い、従来の目的関数、及び、 $\eta_u^{(j)}$ 設定法を用いたものと提案の目的関数、及び、 $\hat{\eta}_u^{(j)}$ 設定法を用いたものを比較する。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。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、結果は 10 種類の異なる STA 配置によるシミュレーション結果の平均値であり、公平性は Jain's fairness index [3] における各 STA のスループットを送信回数に置き換えたもので評価した。また、 $\alpha = 0$ は従来方式の結果とする。提案方式は α を適切に設定することで、従来方式と比較して STA 間の送信機会に関する公平性を大きく改善できることを示した。更に、提案方式において重み係数 α を変化させることで、公平性の改善とシステムス

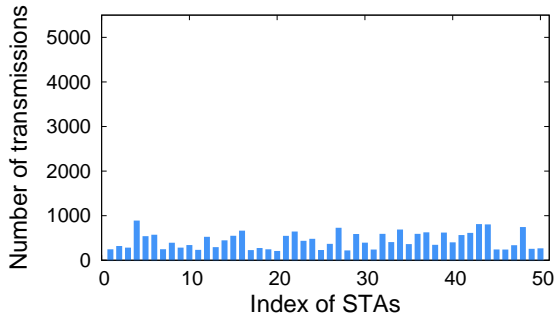


図 4: 提案方式による STA の上り通信送信回数の分布

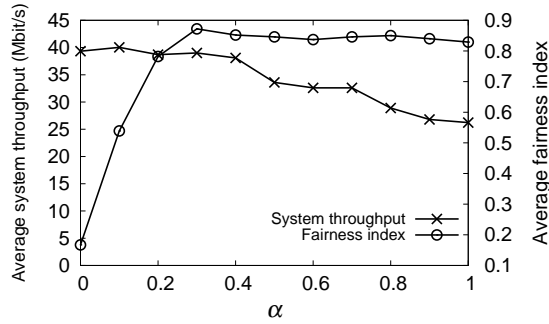


図 5: 重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

スループット低下のトレードオフを調整可能であることを示した。また、本シミュレーションでは $\alpha \leq 0.4$ のときに従来方式と比較して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、シミュレーション条件の違いによる重み係数 α の影響の差について検討する。STA 台数が結果に与える影響を確認するため、図 6 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 種類の異なる STA 配置によるシミュレーション結果の平均値である。本シミュレーションでは、 $\alpha = 0.3$ において公平性の改善が飽和しているにも関わらず、 $0.3 < \alpha$ ではシステムスループットが従来方式と比較して大きく低下しているため、 $0.3 < \alpha$ とする必要はない。続いて、図 7 にある STA 配置におけるシステムスループットと STA 間の公平性を示す。本シミュレーションでは、 $\alpha \leq 0.4$ においてはシステムスループットを大きく低下させることなく公平性を改善できている。一方、 $0.5 \leq \alpha$ ではシステムスループットが大きく低下している。以上、二つの結果から従来方式と比較してシステムスループットを大きく低下させることなく公平性を改善できているのは概ね $0.1 \leq \alpha \leq 0.3$ の範囲である。

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。全 STA 台数は $N = 50$ とし、低遅延を要求する STA を $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$ とした。式 (15) における x_j は、低遅延を要求しない STA すべてで共通の値 $x_j = x, \forall j \in \overline{\mathcal{D}}$ とし、式 (16) における x'_j も低遅延を

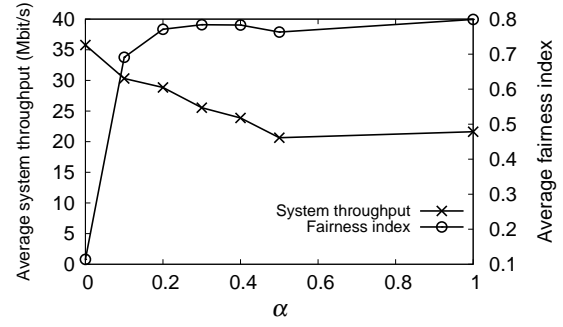


図 6: STA 台数を $N = 30$ に変更した場合の重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

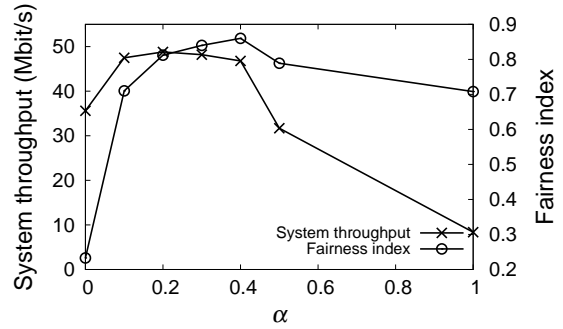


図 7: ある STA 配置における重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

要求する STA すべてで共通の値 $x'_j = x|\overline{\mathcal{D}}|/|\mathcal{D}|, \forall j \in \mathcal{D}$ とした。ただし、 $|\overline{\mathcal{D}}|$ 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 の台数を表す。また、 $\alpha = 0.3$ とし、いずれもある 1 種の STA 配置についての結果である。

まず、図 8 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。 $x = 0$ の時が従来方式の場合の結果である。従来方式と比較して、 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。

次に $x = 0.005$ としたときのすべての STA の平均送信間隔について評価する。図 9(a) に公平性のみを考慮した場合について、図 9(b) に提案方式を用いた場合について各 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、提案手法を用いた場合、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 の送信間隔のばらつきが大きくなった。この問題の解決は今後の課題とする。

6 まとめ

本稿では、全二重通信無線 LAN における STA の組み合わせ選択において、STA 間の公平性と QoS 制御を行う手法を提案した。各 STA の送信待機時間を目的関数

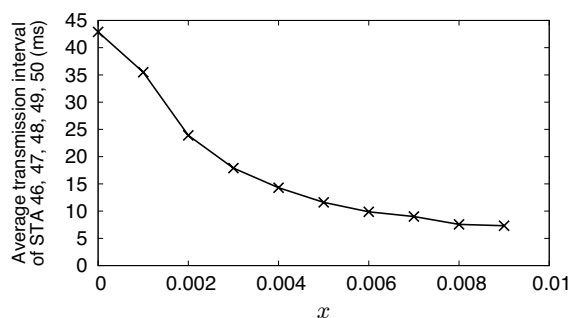
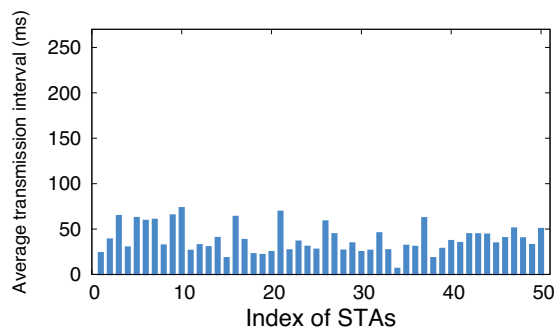
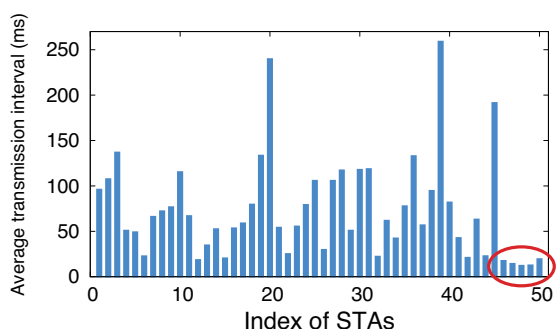


図 8: x に対する低遅延を要求する STA の平均送信間隔



(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 9: STA の平均送信間隔の比較

に組み込み、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た。更に、重み係数 α によって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できることを示した。また、低遅延を要求する STA の送信確率を向上させる制約条件を設計し、QoS の改善を行った。

参考文献

- [1] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, “Full duplex radios,” SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.43, no.4, pp.375–386, Oct. 2013.
- [2] 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.
- [3] 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.