

## 全二重通信無線 LAN における公平性と QoS の改善

飯田 直人<sup>†</sup> 西尾 理志<sup>†</sup> 守倉 正博<sup>†</sup> 山本 高至<sup>†</sup>

鍋谷 寿久<sup>††</sup> 青木 亜秀<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 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

<sup>††</sup> 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: <sup>†</sup>info16@imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp

**あらまし** 全二重通信無線 LAN ではの大容量化に向けて送信と受信を同一帯域で同時に同じ周波数帯で行うため全二重通信無線 LAN が有望である。特に、1 台の AP (Access Point) とその左右に配置された 2 台のと 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 の 3 台による一方全二重通信 UFD (user-multiplexing Unidirectional Full-Duplex) は半二重通信の場合 STA にも適応可能であるという利点がある。この UFD 無線 LAN では、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の最大化するためにを目的としており、自己干渉と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 間の公平性が低く、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ではこれらの解決のために、従来の研究従来の方式で定式化された議論される確率的な STA の組み合わせを決定するための最適化問題に変更選択手法を加えた MAC プロトコルをもとに、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 間での送信機会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するための目的関数と STA 毎の送信機会を増加させ、遅延要求に応じた QoS (Quality of Service) を向上させる手法を制御手法に関して提案する。さらに、提案手法による公平性本手法の改善効果と低遅延有効性を要求する 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評価する。

**キーワード** 全二重通信無線 LAN, ユーザ間干渉, 最適化公平性, QoS

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

Naoto IIDA<sup>†</sup>, Takayuki NISHIO<sup>†</sup>, Masahiro MORIKURA<sup>†</sup>, Koji YAMAMOTO<sup>†</sup>,

Toshihisa NABETANI<sup>††</sup>, and Tsuguhide AOKI<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

<sup>††</sup> Corporate Research & Development Center, TOSHIBA Corporation 1 Komukaitoshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 212-8582, Japan

E-mail: <sup>†</sup>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 User-multiplexing unidirectional full-duplex WLANs by an (UFD) communication, where a full-duplex access point (AP), transmits a frame to a station (STAs) A and B, self-interference and inter-user interference become receives a big problem. The self-interference is an interference in frame from another STA, can apply to the received signal of AP caused by own transmission signal half-duplex STAs. However, and the UFD communication causes 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 easily and is an open issue in the full-duplex system considering influences of UFD WLANs. To mitigate the inter-user interferences interference, STA-pair selection scheme has been discussed. However, since these schemes select pairs of STAs based on only in order to maximize the past full-duplex transmission success probability or system throughput, they cannot take into account fairness between STAs could cause unfairness and application services long waiting time on some STAs which require short delay could be exposed by or cause large interference. In this paper, we modify optimization problem of the conventional method. We propose a scheme to improve the fairness and quality of service (QoS). The proposed objective function considering waiting time increases transmission opportunity of STAs under not good channel

## 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 2.4GHz 帯は逼迫しており、近い将来 5GHz 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逼迫も懸念されることから、無線 LAN システムのさらなる大容量化が望まれるは急務である。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 では送信上り通信と受信下り通信を同一帯域で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無線 LAN の通信容量を 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 には AP (Media Access Control Point) プロトコルの送信先 STA (station) と AP への上り通信を行う STA が提案されている [1-7]。全二重通信無線 LAN では同じである双方向全二重通信 (BFD: Bidirectional Full-Duplex) と図 1 に示すような従来の上り通信を行う 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) がある。UFD は半二重通信にしか対応していない STA にも適応可能であるという利点がある。この UFD を用いた無線 LAN 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る、自己干渉を受ける AP によって干渉波は自身の送信信号であり既知であるため、自己干渉除去技術を用いて自己干渉を最大 110dB 除去できることが示されている [1, 8]。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。ユーザ間干渉では、干渉を受ける STA  $i$  にとって干渉波が STA  $j$  の送信する未知の信号であるため、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] のように除去することができない。また、

このユーザ間干渉に関しても影響を低減するために、干渉の大きさを考慮して適切な 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] [2, 3, 6, 9, 10]。しかし [6] ではユーザ間干渉をなくすために STA  $i$  と  $j$  が隠れ端末である組み合わせのみを選択し、[2, 3] では事前に収集した各 STA の組み合わせ毎の干渉の大きさをを用いて、[9] では 1 対の各 STA の組み合わせを選び出すためにわせ毎の過去の全二重通信の成功確率を用いられるため、干渉の影響のみが考慮され STA 間の公平性が低下して組み合わせを決定する問題がある。また [10] では、STA の組み合わせの決定に際して CSMA/CA (Carrier Sence Multiple Access with Collision Avoidance) わせ毎のバックオフアルゴリズム干渉量から合計スループットを用いるためある程度の公平性は保証されるが推定し、バックオフカウンタがスループットその値を最大化する STA の組み合わせを確率的に依存選択する手法をとっているため干渉方式を提案している。

しかし、これらの MAC プロトコルでは極端に条件の影響良い STA が依然として存在すると組み合わせの選択に大きく偏りを生じ、公平性は低い低下する。さらに加えて、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 QoS (Quality of

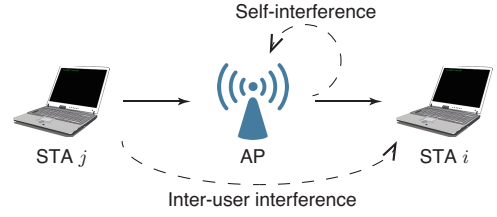


図 1: 一方全二重通信 UFD における自己干渉とユーザ間干渉

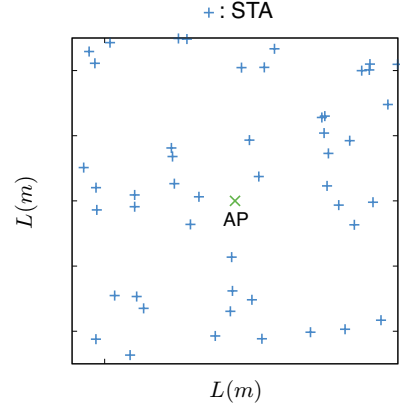


図 2: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

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ようなアプリケーションサービスを利用する STA が存在してもそれに応えることはできない。これらの理由からに対しても干渉量やスループットを基準に端末を選択するため、STA の大きく QoS 送信機会が低下してしまう問題得られず遅延が大きくなる可能性がある。

本稿では、これらの問題従来方式 [10] で議論される確率的な STA 選択手法を解決するために用いた MAC プロトコルをもとに、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、各するための目的関数と STA が利用しているアプリケーションサービス毎の要求遅延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応じた QoS を向上する手法を制御手法に関して提案する。さらに、二つの提案手法本手法の有効性を計算機シミュレーションによってにより評価する。

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 (Media Access Control) 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,  $\mathcal{D} \cup \overline{\mathcal{D}} = \mathcal{N}$ ,  $\mathcal{D} \cap \overline{\mathcal{D}} = \emptyset$ ,  $\overline{\mathcal{D}} := \mathcal{N} / \mathcal{D}$  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. 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期待値の最大化するための目的関数とし, 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変数とし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各 STA の組み合わせが選択確率を決定される。

#### 3.1 STA の組み合わせの決定手順

本節では [10] におけるし, 確率的な STA の組み合わせの決定手順について述べる選択を行う。

#### 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, 全二重通信 UFD を行う STA の組み合わせを  $\mathcal{C}_{\text{full}}$  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,  $\epsilon$  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。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。 $\mathcal{C}_{\text{full}}$  に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

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

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。

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

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

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

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

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

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。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  $j$  が上り通信の送信先となる確率  $p_u^{(j)} = \sum_{i \in \{i : (i, j) \in \mathcal{C}\}} p^{(i, j)}$  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。

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

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

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

なお, この最適化問題は最大で AP が送信する毎回あるいは複数のビーコン信号周期ごとに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, 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  $j$  の上り通信の送信権について述べる。AP からの下り通信を決定受信する 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 に下り通信の送信先が STA  $i$  であることを通知する。各 STA  $i$  以外の全ての STA は, 以下の条件付き確率

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

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」という確率を意味する。この条件付き確率  $p_u^{(i, j)}$  をと求めのもとに, コンテンションウィンドウサイズ  $\text{CW}_u^{(i, j)}$  をとする

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

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

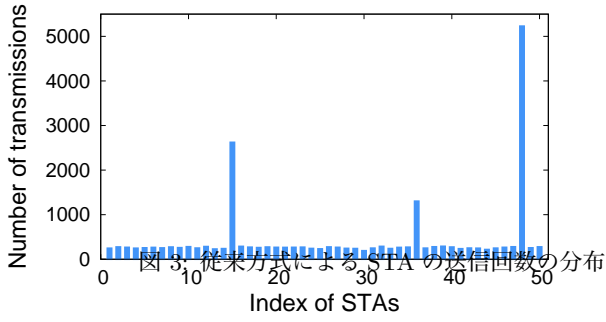


図 3. 従来方式による STA の送信回数の分布

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  $CW_u^{(i,j)}$  が小さくなり、送信権を獲得する得やすくなる。

### 3.2 問題点課題

前節で述べたように式 (4) からわかるように [10] では、STA  $i, j$  の干渉が小さいスループット  $r^{(i,j)}$  が大きい組み合わせが選ばれやすい確率が高くなる。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。この結果からわかるように、から一部の STA が非常に選ばれやすいことがわかる上り通信を行う STA になる確率が高く、このことから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 QoS 要求の違いについては議論されておらず、特に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 が存在する混在しその STA の実効スループットが低い場合にも、その要求に応えることはできないという問題 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

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課題がある。この問題を解決するため以下のように、式に待機時間  $d^{(j)}$  の項目的関数を評価関数に追加提案する。

$$P_2 : \max \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} p^{(i,j)} r^{(i,j)} (d^{(j)})^\alpha \quad (14)$$

待機時間  $d^{(j)}$  とは待機時間であり、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であるとする。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確率が高くなり、送信機会の均等化を得られていない STA ほど送信機会を得やすくなる図ることができる。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 ごとに毎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  $\alpha \geq 0$  を導入している。  $\alpha$  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  $\alpha$  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た  $\eta_u^{(j)}$  の設定法を大きくすることを考える検討する。具体的従来方式では、STA  $j$  の上り通信のトラヒックに比例した値が  $\eta_u^{(j)}$  には設定されていたが、提案方式では以下の式のように新たな  $\hat{\eta}_u^{(j)}$  を設定する。

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} - x_j > 0, \forall j \in \bar{\mathcal{D}} \quad (15)$$

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

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

低遅延を要求していない STA の最低送信確率  $\eta_u^{(j)}$  から  $x_j$  だけ減り受け小さくし、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  $\eta_u^{(j)}$  を  $x'_j$  だけ大きくする。

なお、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。シミュレーション諸元を表 1 図 2 のように、1 台の AP が  $L_m$  四方の領域の中心に示す設置され、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 [10] 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



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  |
| 帯域幅 $B$    | 20 MHz |
| 減衰係数       | 3      |
| 自己干渉キャンセル  | 110 dB |
| シミュレーション時間 | 10 s   |

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、 $\alpha = 0$  は比較方式の結果とする。提案方式は  $\alpha$  を代入適切に設定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できることを示した上、さらに、提案方式において重み係数  $\alpha$  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調整可能であることを示した。また、この場合  $\alpha = 0.3$  本シミュレーションでは  $\alpha = 0.1$  から  $0.4$  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  $\alpha$  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 に最初の 10 種とは異なるある STA 配置の違いによる重み係数  $\alpha$  の場合影響のシステムスループットと STA 間の公平性を示す差について検討する。この場合、システムスループットの低下が小さく、STA 間の公平性台数が高い  $\alpha$  の値は  $0.2$  程度である。さらに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。この場合にも本シミュレーションでは、 $\alpha = 0.2$  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  $\alpha$  の値や fairness index が小さいうちからシステムスループットが低下しているため、公平性の値は異なるが改善効果が飽和する  $\alpha$  が  $0.3$  ままでが適している。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、 $\alpha = 0.1-0.4$  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、 $\alpha \geq 0.5$  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  $\alpha = 0.2$  が  $0.1$  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間で

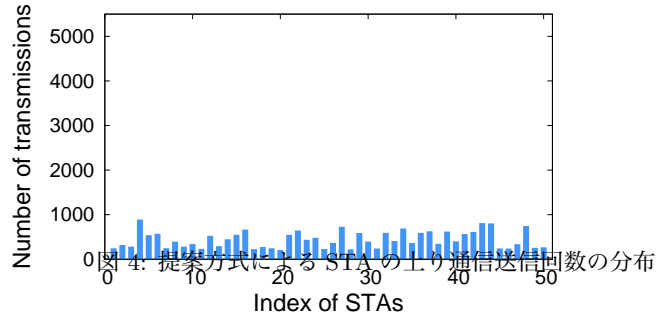


図 4: 提案方式による STA の上り通信送信回数の分布

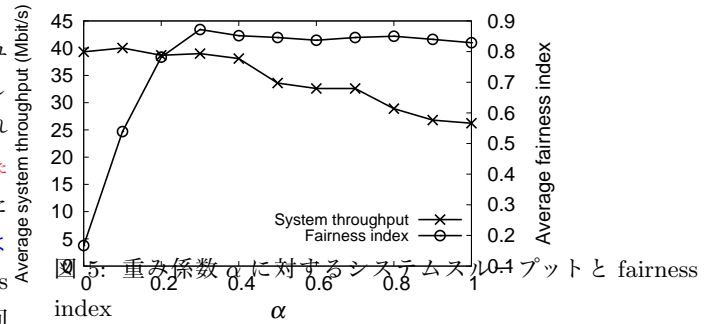


図 5: 重み係数  $\alpha$  に対するシステムスループットと fairness index

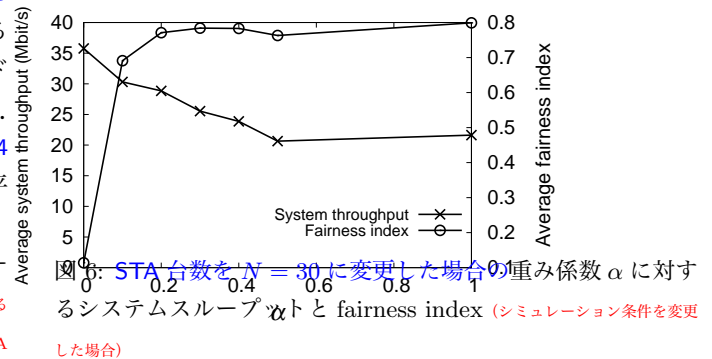


図 6: STA 台数を  $N = 30$  に変更した場合の重み係数  $\alpha$  に対するシステムスループットと fairness index (シミュレーション条件を変更した場合)

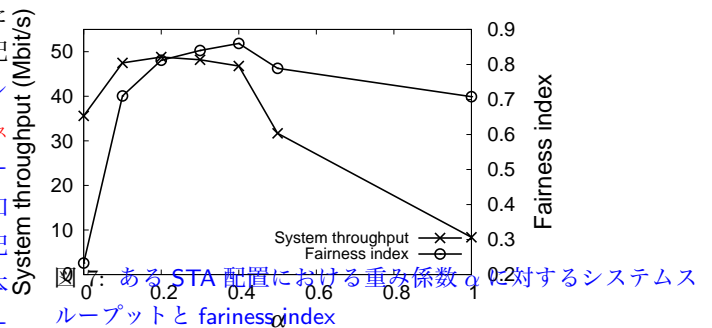


図 7: ある STA 配置における重み係数  $\alpha$  に対するシステムスループットと fairness index

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。本シミュレーションでは全 STA 台数  $N$  は 50 台とし、低遅延を要求する

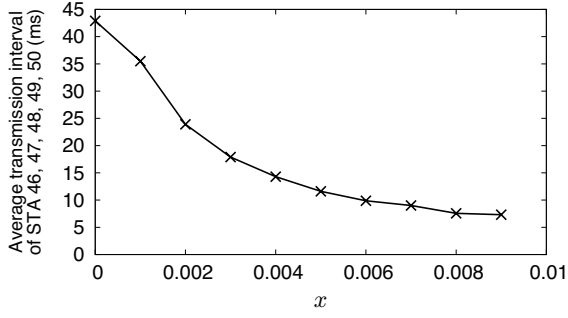


図 8:  $x$  に対する低遅延を要求する STA の平均送信間隔

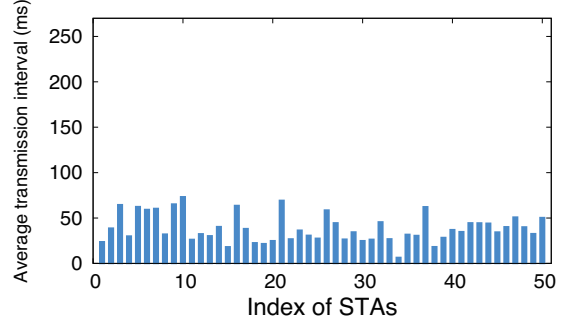
STA を  $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$  とした。式 (15) における  $x_j$  は、低遅延を要求しない全 STA 全てで共通の値  $x_j = x, \forall j \in \overline{\mathcal{D}}$  とし、式 (16) における  $x_j, x'_j$  も低遅延を要求する全 STA 全てで共通の値  $x_j = x|\overline{\mathcal{D}}|/|\mathcal{D}|, \forall j \in \mathcal{D}; x'_j = x|\overline{\mathcal{D}}|/|\mathcal{D}|, \forall j \in \mathcal{D}$  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 の要素数台数を表す。また、 $\alpha = 0.3$  とし、いずれもある 1 種の STA 台数  $N$  は 50 台であり、 $\alpha = 0.3$  配置についての結果である。

まず最初、図 8 に  $x$  の値に対する低遅延を要求する 5 台の STA 台数の平均送信間隔を  $n = 5, x = 0.05$  とした場合に、それらの送信間隔を示す。  $x = 0$  の時が短縮されていることを確認する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 は  $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$  であるとする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。

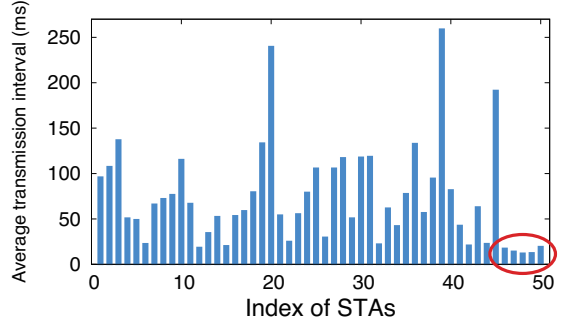
次に  $x = 0.005$  としたときの全ての STA の平均送信間隔について評価する。図 9(a) に公平性のみを考慮した場合について、図 9(b) に低遅延提案方式を要求する STA の送信機会を増加させた場合について各 STA の平均送信間隔を示す。公平性のみを考慮した場合は全 STA 間の送信機会の公平性が高いことから、送信間隔のばらつきが少ないが、低遅延を要求する STA 46 から 50 の送信間隔も平均 43 ms と長い。一方、アプリケーションサービスの違いを考慮し、低遅延提案手法を要求する STA の送信機会を増加させたところ用いた場合、送信間隔を 15 ms と 1/3 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 間の公平性送信間隔のばらつきが大きくなった。この問題の解決は、公平性のみを考慮していた場合に比べて劣化した今後の課題とする。

## 6. ま と め

本稿では、全二重通信無線 LAN の既存の MAC プロトコルが持つにおける STA 間の公平性の低さと組み合わせ選択において、STA が利用しているアプリケーションサービス間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、それらを解決する公平性と QoS 制御を行う手法を提案した。各 STA の待機時間送信待機時間を考慮することで目的関数に組み込み、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、した。さらに、重み係数  $\alpha$  によって公平性の改善とスループットシステムスループットの低下のバランストレードオフを調整できることを示した。また、低遅



(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

延を要求するようなする STA の送信機会送信確率を増加させることで向上させる制約条件を設計し、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.
- [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.