

図 1: UFD 通信

1. はじめに

2. UFD 通信

全二重通信を無線 LAN に適用するにあたってはいくつかのモデルが存在するが、その内、図 1 に示すように 1 台の AP がある STA (STA i) への下り通信と別の STA (STA j) からの上り通信を同時に同一帯域で行う全二重通信を UFD 通信と呼ぶ。この UFD 通信では AP が上り通信の受信と下り通信の送信を同時に同一帯域で行っている。そのため、自己干渉は AP でのみ発生するため、AP のみ自己干渉除去技術が利用可能であればよく、従来の自己干渉除去技術を持たない STA も UFD 通信への参加が可能である。また、この UFD 通信にはユーザ間干渉と呼ばれる干渉が存在する。本報告書では、この UFD 通信のうち、AP を介する STA j から STA i へのリレー通信ではなく、STA i , STA j はそれぞれコアネットワークからの下りトラヒックの受信、コアネットワークへの上りトラヒックの送信を行っているものを扱う。

2.1 UFD 通信におけるユーザ間干渉

図 1 に示すように、上り通信を行う STA j の送信信号が下り通信を受信する STA i の受信信号に与える干渉をユーザ間干渉と呼ぶ。ユーザ間干渉では、干渉を受ける STA i にとって干渉波は STA j が送信する未知の信号であるため、干渉波をある程度予測可能な自己干渉と異なり、容易に除去することができない。このユーザ間干渉の大きさは干渉を与える STA j と干渉を受ける STA i の間の距離や STA j の送信電力に依存するため、ユーザ間干渉の影響を低減するためには、送信を行う STA と受信を行う STA の適切な選択や送信電力制御が必要である。

2.2 UFD 通信における送受信 STA 選択手法に関する既存研究とその課題

前節で述べた通り、UFD 通信におけるユーザ間干渉の影響を低減するためには、2 台の STA を適切に選択することと、送信を行う STA の送信電力制御が必要である。既存研究 [1] ではシステムスループットの最大化を目的とし、各送受信 STA 組の選択確率を変数とした最適化問題を解くことで各 STA が送受信を行う確率を決定し、その確率に応じて STA 選択を行う。更に、STA 組決定後上り通信を行う STA j の送信電力制御を行う。システムスループットの大小、つまり、干渉の大小に応じて決定的に STA 組を選択するのではなく、確率的に STA 組を選択することで送信機会に関する公平性を担保することを目指している。本報告書では、この送受信 STA 選択手法をもとに提案を行うため詳細を述べる。

ここで、 N 台の STA のインデックス集合を $N = \{1, 2, \dots, N\}$ とし、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、 $i, j \in \{0\} \cup N$

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。また、 $i = 0$ 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し、 i と j が同時に 0 にならないものとする。

まず、UFD 通信を行う STA の組み合わせの集合 C_{full} を式 (1) により定義する。

$$C_{\text{full}} := \{(i, j) \mid ij \neq 0, i \neq j, r_d^{(i,j)} > \epsilon, r_u^{(i,j)} > \epsilon\} \quad (1)$$

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。 C_{full} の全組み合わせに対して、下り通信、上り通信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、 $r^{(i,j)} = r_d^{(i,j)} + r_u^{(i,j)}$ とする。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

$$C_{\text{half}} := \{(i, j) \mid ij = 0, r^{(i,j)} > \epsilon\} \quad (2)$$

に対しても実効スループット $r^{(i,j)}$ を推定する。ここで、 $C := C_{\text{full}} \cup C_{\text{half}}$ とし、

$$N_i := \{i \mid (i, j) \in C\} \quad (3)$$

$$N_j := \{j \mid (i, j) \in C\} \quad (4)$$

とする。得られた $r^{(i,j)}$ に基づいて以下の最適化問題を解き、各 STA 組 (i, j) によって UFD 通信が行われる確率 $p^{(i,j)}$ を得る。

$$\mathcal{P}_1 : \quad \max \sum_{(i,j) \in C} p^{(i,j)} r^{(i,j)} \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j \in N_j} p^{(i,j)} \geq \eta_d^{(i)}, \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_i} p^{(i,j)} \geq \eta_u^{(j)}, \forall j \in N \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in C} p^{(i,j)} = 1 \quad (8)$$

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

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。制約条件の式 (6), (7) はそれぞれ各 STA が下り通信の送信先、上り通信の送信元となる確率が 0 とならないように下限を定めるためのものである。 $\eta_d^{(i)}$ は STA i が下り通信の送信先となる確率 $p_d^{(i)} = \sum_{j \in N_j} p^{(i,j)}$ 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 $p_u^{(j)} = \sum_{i \in N_i} p^{(i,j)}$ 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 [1]。

$$r_d^{(i,0)} > \epsilon, \forall i \in N \quad (9)$$

$$r_u^{(0,j)} > \epsilon, \forall j \in N \quad (10)$$

$$\sum_{i \in N} \eta_d^{(i)} + \sum_{j \in N} \eta_u^{(j)} = 1 \quad (11)$$

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。

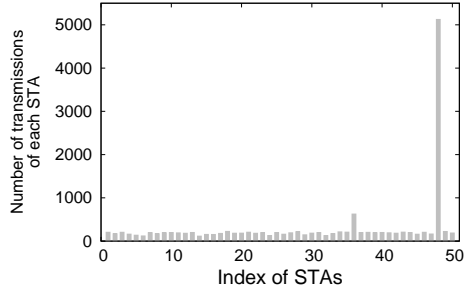


図 2: 既存研究 [1] による STA の送信回数の分布

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

$$p_d^{(i)} = \sum_{j \in N_j} p^{(i,j)}, \forall i \in \{0\} \cup N \quad (12)$$

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。ここで、AP の送信先 STA として選択された STA を STA i^* と表す。AP からの下り通信を受信する STA が STA i^* に決定した後、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。これを受信した STA i^* は、後述する送信電力制御のために必要なチャネル情報を含んだフレームをブロードキャストする。

続いて STA j の上り通信の送信権について述べる。STA i^* 以外のすべての STA は以下の条件付き確率

$$p_u^{(i^*,j)} = P(\text{STA } j \text{ wins uplink} \mid \text{AP sends to STA } i^*) = p^{(i^*,j)} / p_d^{(i^*)} \quad (13)$$

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、コンテンションウィンドウサイズ $CW_u^{(i^*,j)}$ を

$$CW_u^{(i^*,j)} = \lceil 1/p_u^{(i^*,j)} \rceil \quad (14)$$

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 $[0, CW_u^{(i^*,j)}]$ の一様分布から整数を生成し、それをバックオフカウンタ $w_u^{(i^*,j)}$ として CSMA/CA 方式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 STA を STA j^* とする。この方法により、 $p_u^{(j)}$ が大きい STA、つまり式 (5), (13) より $r^{(i^*,j)}$ が大きい STA ほど $CW_u^{(i^*,j)}$ が小さくなり、送信権を得やすくなる。

続いて、STA j^* の送信電力制御を行う。STA j^* は、STA i^* が送信したチャネル情報をもとに、STA i –STA j 間の伝搬路を推定する。ここで、AP から STA i^* への半二重下り通信の場合の SNR を $\text{SNR}_d^{(i^*,0)}$ 、AP と STA i^* , j^* による UFD 通信における STA i^* での SINR (Signal to Interference plus Noise power Ratio) を $\text{SINR}_d^{(i^*,j^*)}$ とすると、STA j^* は

$$\text{SINR}_d^{(i^*,j^*)} \geq \text{SNR}_d^{(i^*,0)} - \delta \quad (15)$$

となるように送信電力を制御する。これは、UFD 通信時の STA i^* における SINR を、半二重通信時の SNR と比べて δ だけ劣化させることを許容することを示す。

[1] による STA 選択手法では、確率的な選択手法を用いてい

表 1: 既存研究 [1] を用いたシミュレーションの諸元

領域	100 m 四方
AP	領域の中心
STA	50 台、ランダム配置
伝送速度	IEEE 802.11a 6–54 Mbit/s
送信電力	15 dBm
雑音指数	10 dB
周波数帯	2.4 GHz
帯域幅	20 MHz
伝搬損失	$30 \log D + 40 \text{ dB}$
	D : 送受信点間距離 (m)
自己干渉除去	110 dB
シミュレーション時間	10 s

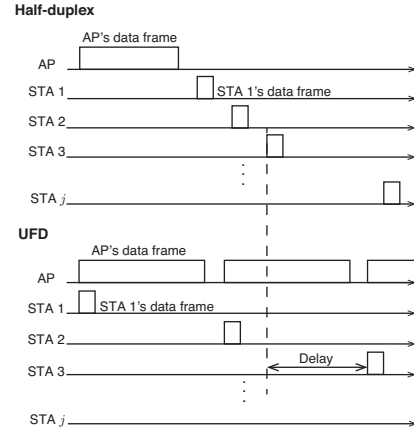


図 3: 半二重通信と UFD 通信における STA の送信機会

るものの、式 (5) から分かるように、STA i , STA j 間のユーザ間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ため、依然として一部の組み合わせに確率が集中し、特に STA の上り通信において不公平性を生じる。図 2 に既存研究 [1] による STA 選択手法を用いた際の各 STA の上り通信送信回数のシミュレーション結果を示す。シミュレーション諸元は表 1 の通りである。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、送信機会に関する不公平性が生じていることが分かる。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時間が生じ QoS の低下を招く可能性がある。

また、UFD 通信は半二重通信に比べて STA の遅延時間を増大させるという問題がある。これは、図 3 に示すように、UFD 通信ではユーザ間干渉により伝送速度が低下するため一回の送信時間が増加し、かつ、下り通信の送信頻度が増加するため、半二重通信と比較して STA の送信頻度が低下するためである。上り通信の遅延時間の増大は、TCP 下り通信における TCP-ACK パケットの遅延を増加させ、結果的に TCP スループットの低下が生じる [2]。

3. 公平性と QoS の改善

2.2 項では、既存研究の MAC プロトコルでは干渉が小さい STA の組み合わせが選ばれやすく、特定の STA に送信機会が集中するという課題と QoS に関する議論が不十分であるという課題を指摘した。本章では、既存研究 [1] をもとにこれらの問題を解決するための提案を行う。更に、提案方式による改善効果を計算機シミュレーションにより評価する。

3.1 提案方式

3.1.1 公平性の改善

既存研究 [1] の最適化問題における目的関数である式 (5) には、各 STA 組の実効スループット $r^{(i,j)}$ と確率 $p^{(i,j)}$ の項が存在する。この目的関数では、干渉が小さく大きな実効スループットが推定される STA を含む STA 組が選ばれやすくなるため、STA 間の送信機会に不公平性を生じる。この問題を解決するため以下の目的関数を提案する。

$$\mathcal{P}_2 : \max \sum_{(i,j) \in \mathcal{C}} p^{(i,j)} r^{(i,j)} (d^{(j)})^\alpha \quad (16)$$

$d^{(j)}$ は送信待機時間であり、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。式 (5) に送信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、送信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、公平性とシステムスループット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 が小さいほど、送信待機時間 $d^{(j)}$ の影響が小さくなり、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 が大きいほど送信待機時間 $d^{(j)}$ の影響が大きくなり、公平性が高くなるがシステムスループットが低下する。

3.1.2 低遅延を要求する STA の QoS の向上

本項では、前項の提案方式によりシステム全体の公平性を改善した上で、更に一部の低遅延を要求する 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 (7) 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。既存研究 [1] 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。

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} - x_j > 0, \forall j \in \overline{\mathcal{D}} \quad (17)$$

$$\hat{\eta}_u^{(j)} = \eta_u^{(j)} + x'_j > 0, \forall j \in \mathcal{D} \quad (18)$$

$$\sum_{j \in \overline{\mathcal{D}}} x_j = \sum_{j \in \mathcal{D}} x'_j \quad (19)$$

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、 \mathcal{D} は低遅延を要求する STA のインデックス集合、 $\overline{\mathcal{D}} := \mathcal{N} \setminus \mathcal{D}$ とする。また、式 (19) は式 (11) 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 (7) に用いる。これによって、低遅延を要求する STA の送信機会が増加することで遅延時間が短縮され QoS が改善される。

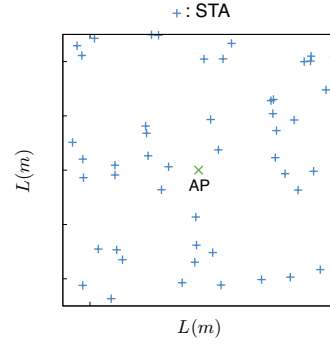


図 4: AP と STA の配置の一例

表 2: UFD 通信における STA 選択手法に関するシミュレーションの諸元

領域の大きさ L	100 m
伝送速度	IEEE 802.11a 6–54 Mbit/s
送信電力	15 dBm
雑音指数	10 dB
周波数帯	2.4 GHz
帯域幅	20 MHz
伝搬損失	$30 \log D + 40$ dB
	D : 送受信点間距離 (m)
自己干渉除去	110 dB
シミュレーション時間	10 s

3.2 シミュレーション評価

3.2.1 シミュレーション条件

本項では UFD 通信における送受信 STA 選択手法に関するシミュレーションの条件について述べる。表 2 にシミュレーション条件を示す。図 4 のように、1 台の AP が $L = 100$ m 四方の領域の中心に設置され、その周りに $N = 50$ 台の STA がランダムに配置されているとする。STA 間の送信機会に関する公平性と低遅延を要求する STA の QoS に関して、既存研究 [1] を用いた場合と提案手法を用いた場合の結果を比較する。STA 間の送信機会に関する公平性を評価する指標として、式 (20) に示す Jain's fairness index [3] における y_i に各 STA の送信回数を代入したものをを用いる。

$$\text{Fairness index} = \frac{\left(\sum_{j=1}^N y_j \right)^2}{\sum_{j=1}^N y_j^2} \quad (20)$$

QoS の改善に関するシミュレーションでは、式 (17) 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 (18) における x'_j も低遅延を要求する 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。上下通信ともに飽和トラヒックの場合を取り扱う。シミュレーションは最適化問題は MATLAB により計算し、その他の部分は C 言語で作成したシミュレータによって行う。

3.2.2 シミュレーション結果

まず、STA 間の送信機会の公平性に関する結果を示す。図 5 に各 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 2 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分かる。

図 6 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る。また、 $\alpha = 0$ 場合が既存方式 [1] の結果である。提案方式は α を大きくしていくことで、既存研究と比

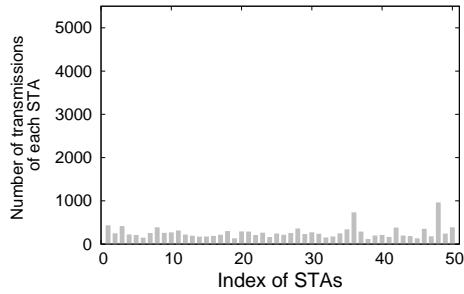


図 5: 提案方式による STA の上り通信送信回数の分布

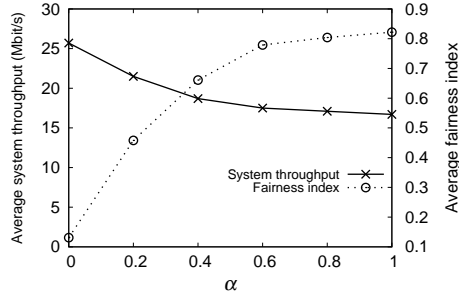


図 6: 重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

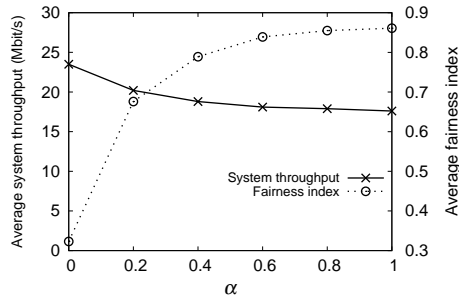


図 7: STA 台数を $N = 30$ とした場合の重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

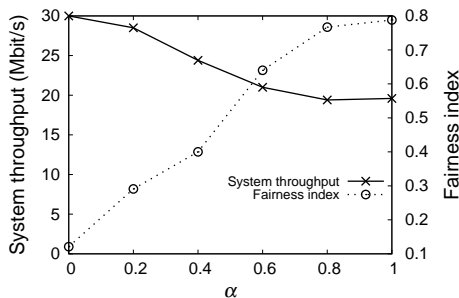


図 8: ある STA 配置における重み係数 α に対するシステムスループットと fairness index

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。3.1.1 項で述べた通り、システムスループットと STA 間の公平性がトレードオフの関係となっており、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調整可能であることが分かる。 α を小さくすると目的関数の式 (16) における実効スループット $r^{(i,j)}$ の影響が送信待ち時間 $d^{(j)}$ に比べて大きくなることで、システムスループット最大化を重視した結果となる。

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

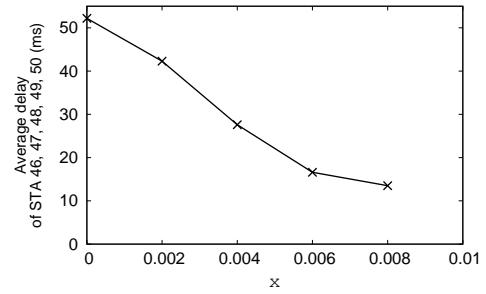


図 9: x に対する低遅延を要求する STA 46–50 の平均遅延時間

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。STA 台数が 50 台である場合と比較して絶対値は異なるものの、傾向は一致している。この結果から、提案方式が公平性を改善すること、また、スループットと公平性のトレードオフの調整が可能であることに関して、STA 台数の影響を大きく受けることはないと考えられる。

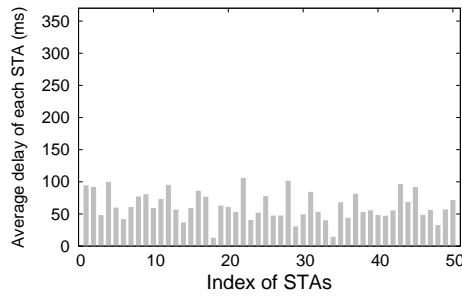
続いて、図 8 に、STA 台数が $N = 50$ である場合のある STA 配置におけるシステムスループットと STA 間の公平性を示す。図 6 に示した 10 種の STA 配置に関して平均した結果と比べると、 α に対する公平性の改善の仕方、スループットの低下の仕方が異なることが分かる。これは、STA 配置によって UFD 通信におけるユーザ間干渉の大きさが異なることから、選択される送受信 STA 組が STA 配置に大きく影響されるためである。

続いて、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においては $\alpha = 1$ とする。いずれもある 1 種の STA 配置についての結果である。まず、低遅延を要求する STA を $\mathcal{D} = \{46, 47, 48, 49, 50\}$ の 5 台とした場合についてのシミュレーション結果を示す。図 9 に x の値に対する低遅延を要求する 5 台の STA の平均遅延時間を示す。 x とは低遅延を要求する STA に低遅延を要求しない STA が与える確率の値である。 $x = 0$ の時が先に述べた公平性を改善するための提案方式を用いた場合の結果である。公平性のみを改善した場合と比較して、 x を大きくするほど低遅延を要求する 5 台の STA の平均遅延時間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一部の STA の遅延時間を調整可能であることが分かる。

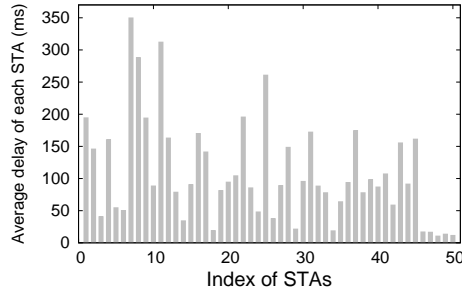
次に $x = 0.008$ としたときのすべての STA の平均遅延時間について評価する。図 10(a) に公平性のみを考慮した場合について、図 10(b) に公平性と QoS の両方を考慮した場合について各 STA の平均遅延時間を示す。公平性のみを考慮した場合は、低遅延を要求する STA 46–50 の平均遅延時間は 52 ms であるが、STA 46–50 の QoS を考慮した場合、平均遅延時間を 13 ms と 1/4 程度まで削減することができた。しかし、低遅延を要求しない STA の遅延時間が大きく、かつ、ばらつく結果となった。これは、低遅延を要求する STA の送信確率を高めるために、低遅延を要求しない STA の送信確率が低下してしまったためである。この結果に対して、次章から全ての STA の遅延時間を削減するための提案を行う。

4. UFD 通信と上り OFDMA の併用による遅延時間削減

3.1.2 項では、低遅延を要求する一部の STA に対して遅延時間削減による QoS 改善を行った。本章では、全ての STA の遅延時間削減に向け、UFD 通信の上り通信へ OFDMA 方式を適



(a) 公平性の改善のみを行った場合の各 STA の平均遅延時間



(b) 低遅延を要求する STA の送信機会を増加させた場合の各 STA の平均遅延時間

図 10: 各 STA の平均遅延時間の比較

用した無線 LAN と本無線 LAN における送受信 STA 選択手法を提案する。

4.1 提案方式

図 11 にシステムモデルを示す。提案方式では、OFDMA 方式の導入により、送受信 STA の選択において複数の上り通信 STA を選択可能とし、STA の送信機会を向上することで遅延を削減する。本報告書では、前節で提案した送受信 STA 選択最適化問題を拡張し、上り OFDMA 方式に対応した STA 選択を可能とする。提案方式では、半二重通信、UFD 通信、上り OFDMA 方式、UFD 通信と上り OFDMA 方式の組み合わせの四つの通信方式を適応的に切り替え、STA 選択を行う。送受信 STA 組を適応的に選択することで、干渉が大きく UFD 通信を行えないような位置にある STA は半二重通信を行い、干渉が小さく、大きなスループットを期待できる STA には UFD 通信を用い、多くの STA へ送信機会を与えたい場合は OFDMA 方式を用いるという状況に応じた制御が可能となる。

ただし、OFDMA 方式による多元接続数は簡単のため 2 とする。また、OFDMA 方式に用いるチャンネルは新たに用意するのではなく、図 12 のように AP が下り通信に用いるチャンネルを 2 台の STA が二等分して用いるものとする。

4.1.1 送受信 STA 選択手法の概要

本項では、提案方式の概要を述べる。STA 組選択手法は 3.1.1 項で述べた手法を OFDMA 方式を適用できるように拡張する。

本手法では、 N 台の STA の中から、図 11 のように AP から下り通信を受信する STA i と、AP への上り通信を行う STA j 、STA k を選び出す。このとき、STA の組み合わせを (i, j, k) と表現し、 $i, j, k \in \{0\} \cup N$ とする。STA は自己干渉除去技術を持たず BFD 通信はできないとし、 $i \neq 0$ のときには $i \neq j$ かつ $i \neq k$ とする。また、 i, j, k の全てが同時に 0 になることはないものとする。 i, j, k のそれぞれが取る値によって以下の通信方式を定義し、切り替え可能であるものとする。

- $(i = 0 \wedge jk = 0 \wedge j + k \neq 0) \vee (i = 0 \wedge j = k \neq 0)$
上りの半二重通信

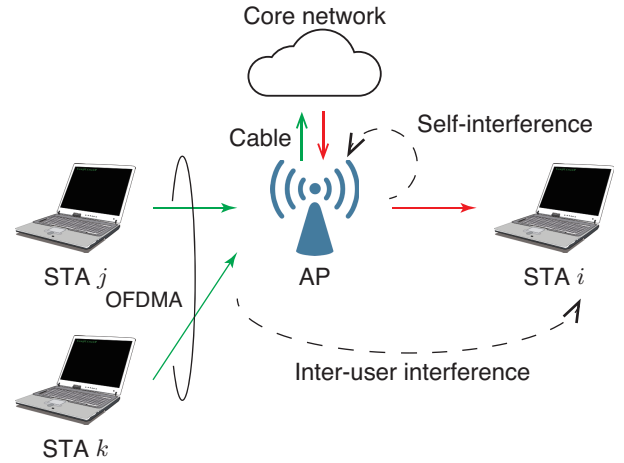


図 11: UFD 通信と OFDMA 方式の組み合わせ

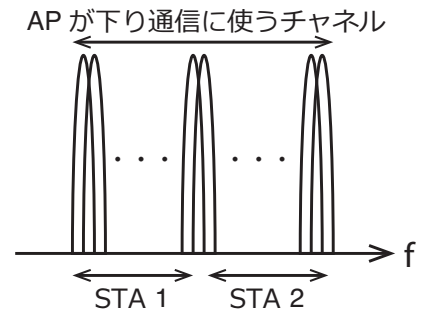


図 12: UFD 通信と OFDMA 方式の組み合わせにおける各ノードが使用する帯域

- $i \neq 0 \wedge j = k = 0$
下りの半二重通信
- $(i \neq 0 \wedge jk = 0 \wedge j + k \neq 0) \vee (i \neq 0 \wedge j = k \neq 0)$
UFD 通信
- $i = 0 \wedge jk \neq 0 \wedge j \neq k$
上り OFDMA 方式
- $i \neq 0 \wedge jk \neq 0 \wedge j = k$
UFD 通信と上り OFDMA 方式の組み合わせ

図 13 に本手法の STA 選択手順を示す。太枠で示した部分が、OFDMA 方式の適用にあたって拡張を行った部分である。本手法は各 STA 組毎の干渉の大きさや各 STA の送信待機時間をもとに、通信方式の選択と送受信を行う STA 組を適応的に決定することで遅延時間の削減を行うことが目的である。そのため、まず AP は全 STA 組に対してその組み合わせで通信が行われた場合の実効スループットを推定する。また、各 STA の送信待機時間を事前に収集しておく。AP は推定されたスループットと各 STA の送信待機時間を用いて最適化問題を解き、各 STA 組で通信が行われる確率を求める。最適化問題の目的関数は、システムスループットを大きくし、かつ、STA の遅延時間を削減するため、前述の実効スループットが大きい STA 組や送信待機時間が長い STA を含む STA 組が選ばれやすくなるよう設計する。実効スループットは干渉の大きさや用いる伝送速度によって変化し、送信待機時間は STA が送信を行う度に変わる上、STA の増減も起こる。そういった状況の変化に対応するために、AP は定期的に実効スループットの再推定と送信待機時間の再収集を行い、最適化問題を解き直すことで確率を更新する。得られた確率はビーコンフレームによって全ての STA へ通知される。

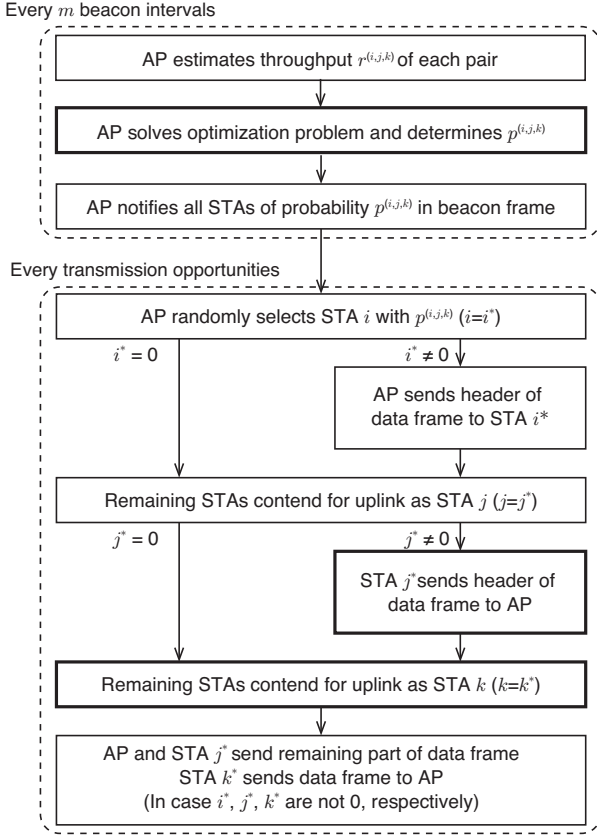


図 13: 送受信 STA 選択手法の手順

次に、得られた確率を用いて STA 組を決定する。AP は下り通信の送信先となる STA i を確率的に決定する。選ばれた STA を STA i^* とし、AP は送信先が STA i^* であることを通知するため、データフレームのヘッダ部分を送信する。続いて、全ての STA は AP から通知された確率をもとにコンテンションウィンドウを設定し、CSMA/CA 方式のバックオフアルゴリズムを用いた競合を行い、STA j , STA k が順に決定される。決定した STA をそれぞれ STA j^* , STA k^* とし、STA j^* は自身が送信権を獲得したことを通知するため、データフレームのヘッダ部分を送信する。最後に、AP と STA j^* はデータフレームの残りの部分を、STA k^* はデータフレームを送信する。

4.1.2 送受信 STA 選択手法の詳細

本項では前項で述べた各手順について詳細を述べる。OFDMA 方式を適用し STA k を追加するために、最適化問題の拡張と STA k の決定手順追加がなされている。

まず、AP は全ての組み合わせ (i, j, k) に対してスループット $r_d^{(i,j,k)}$, $r_{ul}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ を推定する。ただし、 $r_d^{(i,j,k)}$ は AP から STA i への下り通信の実効スループット、 $r_{ul}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ は STA j , STA k による上り通信の実効スループットである。ここで、通信方式毎に組み合わせの集合を C'_{half} , C'_{full} , C'_{OFDMA} , $C'_{\text{UFD+OFDMA}}$ とする。ただし、 $r_d^{(i,j,k)}$, $r_{ul}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ のいずれかが 0 となる組み合わせは含まない。 $C' := C'_{\text{half}} \cup C'_{\text{full}} \cup C'_{\text{OFDMA}} \cup C'_{\text{UFD+OFDMA}}$ とする。 C' の要素 (i, j, k) に含まれる i, j, k の集合をそれぞれ

$$N'_i := \{i \mid (i, j, k) \in C'\} \quad (21)$$

$$N'_j := \{j \mid (i, j, k) \in C'\} \quad (22)$$

$$N'_k := \{k \mid (i, j, k) \in C'\} \quad (23)$$

$$N'_i, N'_j, N'_k \subseteq \{0\} \cup \mathcal{N} \quad (24)$$

とする。AP は $r^{(i,j,k)} = r_d^{(i,j,k)} + r_{ul}^{(i,j,k)} + r_{u2}^{(i,j,k)}$ と、上り通信を行う

STA j , STA k の送信待機時間 $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ を用いて以下の最適化問題を解き、各組み合わせで通信が行われる確率 $p^{(i,j,k)}$ を求める。

$$\mathcal{P}_3 : \max \sum_{(i,j,k) \in C'} p^{(i,j,k)} r^{(i,j,k)} (d^{(j)} + d^{(k)})^\alpha \quad (25)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{k \in N'_k} \sum_{j \in N'_j} p^{(i,j,k)} \geq \eta_d^{(i)}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (26)$$

$$\sum_{j \in N'_j} \sum_{i \in N'_i} p^{(i,j,l)} + \sum_{k \in N'_k} \sum_{i \in N'_i} p^{(i,l,k)} - \sum_{i \in N'_i} p^{(i,l,l)} \geq \eta_u^{(l)}, \forall l \in \mathcal{N} \quad (27)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in C'} p^{(i,j,k)} = 1 \quad (28)$$

$$\text{variables : } p^{(i,j,k)} \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \forall (i, j, k) \in C' \quad (29)$$

目的関数は実効スループットが大きく、送信待機時間が大きな STA を含む組ほど通信を行う確率が高くなるようにするため、確率 $p^{(i,j,k)}$ 、実効スループット $r^{(i,j,k)}$ と STA j, k の送信待機時間の和 $d^{(j)} + d^{(k)}$ の積として設計されている。また、システムスループットと STA の遅延時間の優先度を調整するため、パラメータ α を目的関数に導入し、 $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ の影響の大きさを調節できるようにする。 α が大きいほど遅延時間を優先し、送信機会を得られていない STA を含む組が選ばれやすくなる。更に、選ばれる確率が 0 となる STA 組が発生しないよう式 (26), (27) によって下限を設定する。第一の制約条件式 (26) はある STA i が下り通信の送信先となる確率を $\eta_d^{(i)}$ 以上とする条件であり、第二の制約条件式 (27) はある STA l が STA j または k として上り通信を行う確率を $\eta_u^{(l)}$ 以上とする条件である。AP によって算出された確率 $p^{(i,j,k)}$ はビーコンフレームによって全ての STA に通知される。

次に、STA i , STA j , STA k を決定する。まず最初に、AP が下り通信の受信 STA となる STA i の決定を行う。AP は以下の式に従って、各 STA が下り通信の送信先となる確率 $p_d^{(i)}$ を求める。

$$p_d^{(i)} = \sum_{k \in N'_k} \sum_{j \in N'_j} p^{(i,j,k)}, \forall i \in \{0\} \cup \mathcal{N} \quad (30)$$

AP はこの確率 $p_d^{(i)}$ に従って確率的に STA i を選択する。確率的に決定された STA をここでは STA i^* とする。このとき $i^* = 0$ であれば、下り通信が行われないことを示す。全ての STA は以降の手順において AP の送信先を知っておく必要があるため、STA i^* の決定後、AP は STA i^* へ送信するデータフレームのヘッダ部分のみを送信し、送信先が STA i^* であることを全 STA に通知する。

続いて、CSMA/CA 方式のバックオフアルゴリズムを用いた競合によって STA j を決定する。まず、バックオフカウンタを設定するために、STA i^* 以外の STA は以下の確率を計算する。

$$p_{ul}^{(i^*,j,k)} = \left(\sum_{k \in N'_k} p^{(i^*,j,k)} \right) / p_d^{(i^*)}, \forall j \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*\} \quad (31)$$

これは、AP が STA i^* へ送信することが決まった上で、各 STA が上り通信を行う条件付き確率である。この確率をもとに、各 STA はコンテンションウィンドウサイズ $CW_{ul}^{(i^*,j,k)}$ を

$$CW_{ul}^{(i^*,j,k)} = \lceil 1 / p_{ul}^{(i^*,j,k)} \rceil \quad (32)$$

と設定する。各 STA は $[0, CW_{ul}^{(i^*,j,k)}]$ の一様分布から生成されるバックオフカウンタ $w_{ul}^{(i^*,j,k)}$ を設定し、CSMA/CA 方式のバツ

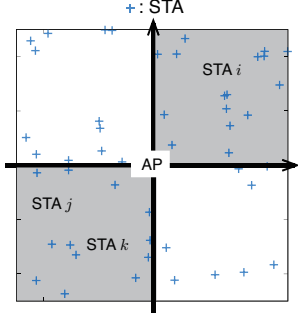


図 14: 位置による STA のグループ分け

クオファ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。ここで、上り通信の送信権を獲得した STA を STA_{j^*} とし、 $j^* = 0$ のときは STA_j による上り通信は行われなことを示す。STA j^* は自身が送信権を獲得したことを他の STA に知らせるため、AP へ送信するデータフレームのヘッダ部分のみを送信する。

最後に STA k の決定を行う。STA i^* 以外の STA は、STA j の決定の際と同様に以下の条件付き確率を求める。

$$p_{u2}^{(i^*, j^*, k)} = p^{(i^*, j^*, k)} / \left(\sum_{k \in N_k'} p^{(i^*, j^*, k)} \right), \forall k \in \{0\} \cup N \setminus \{i^*\} \quad (33)$$

これは、STA i^* 、STA j^* が通信に参加することが決まった上で各 STA が STA k として上り通信を行う条件付き確率である。以降 STA j を決定する際と同様に $CW_{u2}^{(i^*, j^*, k)}$ 、 $w_{u2}^{(i^*, j^*, k)}$ を設定し、最初にカウンタが 0 となった STA が上り通信を行う 2 台目の STA である。この STA を STA k^* と呼ぶこととし、 $k^* = 0$ のときは STA k による上り通信は行われなことを示す。また、 $k^* = j^*$ のときは上り通信に OFDMA 方式を適用せずに 1 台の STA によって上り通信が行われることを示す。これをもって、通信を行う STA の組み合わせと通信方式が決定したこととなる。組み合わせ決定後、AP、STA j^* はデータフレームの残りの部分を、STA k^* はデータフレームを送信する。

4.1.3 計算時間の削減

本項では、最適化問題を解くための計算時間を削減する手法について検討する。4.1.1 項で述べたように、AP は最適化問題を定期的に解き確率 $p^{(i, j, k)}$ を更新する。確率 $p^{(i, j, k)}$ は、STA の参加離脱、移動による $\mu^{(i, j, k)}$ の変化、 $d^{(j)}$ 、 $d^{(k)}$ の更新など状態の変化に追従するよう更新する必要があるため、数百ミリ秒単位で最適化問題を解く必要がある。提案方式の最適化問題は線形最適化問題であるが、Karmarkar の内点法 [4] を用いる場合、計算量は変数の数 $n_{\text{variables}}$ に対して $O(n_{\text{variables}}^{3.5})$ であり、指数的に増加する。変数の数は送受信 STA の組み合わせの数 $|C'|$ であり、STA 台数を N 台、OFDMA 方式の多元接続数を M とすると、最大で $(N+1)N^M - 1$ となる。そのため、 N 、 M が大きくなると計算量が爆発的に大きくなる。

そこで、本報告書では計算時間削減の初期検討として、選択可能な STA 組を制限する手法を検討する。ある送受信 STA 組におけるスループットはユーザ間干渉が大きいほど減少する傾向にある。また、ユーザ間干渉の大きさは STA の地理的位置に依存し、STA i と STA j 、STA k との距離が遠いほど干渉が小さくなる傾向にある。そこで、STA を位置によってグループ分けし特定の STA 組に限定することで組み合わせの数を削減する。

STA の組み合わせをユーザ間干渉が小さくなる可能性が高い組み合わせのみに限定するため、下り通信を行う STA i と上り

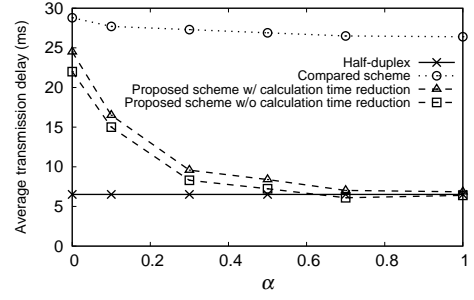


図 15: 上り通信の平均遅延時間

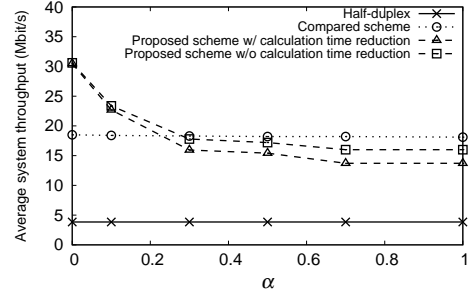


図 16: システムスループット

通信を行う 2 台の STA j 、STA k が AP を中心として対角の位置に存在する組み合わせのみを最適化の対象とする。図 14 のように AP を中心とした直交座標を設定し、それぞれの STA がどの象限に位置するかによって四つのグループに分ける。そして、組み合わせの集合 C' には、OFDMA 方式と UFD 通信を組み合わせる場合は STA i と 2 台の STA j 、STA k は対角の象限、STA j と STA k は同じ象限に存在するような組み合わせ、UFD 通信の場合は STA i と STA j は対角の象限に存在する組み合わせのみを含める。

4.2 シミュレーション評価

4.2.1 シミュレーション条件

本項では UFD 通信と上り OFDMA 方式の併用による遅延時間削減に関するシミュレーションの条件について述べる。前章と同様、図 4 のように、1 台の AP が $L = 100$ m 四方の領域の中心に設置され、その周りに $N = 50$ 台の STA がランダムに配置されているとする。簡単のため OFDMA 方式による多元接続数は 2 とし、チャネル幅は二等分するものとする。式 (26) における $\eta_d^{(i)}$ には各 STA 共通の $1/[(N+1)N]$ を、式 (27) における $\eta_u^{(i)}$ には各 STA 共通の $1/(N+1)$ を設定している。伝送速度は IEEE 802.11a 規格に従う [5]。上下通信ともに飽和トラヒックであり、AP には 1500 B の、STA には 64 B のデータフレームが発生しているものとする。これは、トラヒックの多くが TCP-ACK を中心とする 64 B 以下のフレームと 1500 B のフレームによって占められるからである [6]。

本シミュレーションでは以下の四つの方式を比較する。

- 半二重通信のみを用いる方式
- 半二重通信と UFD 通信を併用する 3.1.1 項で提案した方式 (比較方式)
- 半二重通信、UFD 通信、上り OFDMA 方式、UFD 通信と上り OFDMA 方式の組み合わせの 4 方式を用いる提案方式
- 提案方式に 4.1.3 項で述べた計算時間削減手法を適用した方式

4.2.2 シミュレーション結果

図 15、16 に STA の平均遅延時間とシステムスループットを

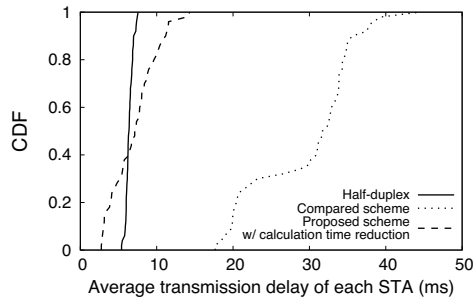


図 17: ある試行における各 STA の平均遅延時間の CDF

表 3: 最適化問題を 1 回解くために必要な平均時間

計算時間削減なし	計算時間削減あり
803 ms	226 ms

示す。半二重通信と UFD 通信を用いる方式の遅延時間は半二重通信と比べ 20 ms 以上大きい。一方、提案方式はパラメータ α を大きくすることで遅延時間を半二重通信と同等の値まで削減できている。しかし、 α が大きくなるにつれて、システムスループットが低下している。これは、最適化問題の目的関数において $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ の項の影響が大きくなり、スループットの低下による利得の減少より遅延時間削減による利得向上が上回るためである。提案方式はシステムスループットは低下したものの、半二重通信に対しては 3 倍程度の値を維持しつつ、遅延時間を半二重通信と同等まで削減することができた。

STA 間の公平性を確認するため、図 17 に各 STA 毎の平均遅延時間の CDF (Cumulative distribution function) を示す。半二重通信では全 STA が平等に送信機会を獲得するため、STA 間の遅延時間のばらつきは非常に小さい。提案方式は半二重通信には及ばないものの、半二重通信と UFD 通信を用いる方式と比べて大幅にばらつきが小さくなっており、遅延時間に対する公平性が高いことを示している。

次に計算時間について評価する。表 3 に第 4.1.3 節で述べた計算時間削減手法を用いた場合と用いない場合について、 $\alpha = 1$ における最適化問題を一回解くために必要な平均時間を示す。計算時間を 72% 削減できている一方、図 16 より計算量削減手法を用いない場合と比較してシステムスループットは最大 18% 低下し、図 15 より遅延時間は 15% 増加した。これは、計算時間削減手法によって除いた送受信 STA の組み合わせの中に干渉が小さく比較的高いスループットで UFD 通信可能な組み合わせが含まれていたためであると考えられる。簡易な方式ながら、システムスループットを大幅に低下させることなく、計算時間を削減することができた。

5. ま と め

文 献

- [1] 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.
- [2] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling TCP throughput: A simple model and its empirical validation," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.28, no.4, pp.303–314, Oct. 1998.
- [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.
- [4] N. Karmarkar, "A new polynomial-time algorithm for linear programming," Combinatorica, vol.4, no.4, pp.373–395, 1984.

- [5] IEEE Std 802.11-2012, "Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications," 2012.
- [6] F. Wamser, R. Pries, D. Staehle, K. Heck, and P. Tran-Gia, "Traffic characterization of a residential wireless Internet access," Telecommunication Systems, vol.48, no.1-2, pp.5–17, Oct. 2011.