

上り OFDMA 適用による全二重通信無線 LAN の遅延時間削減

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 無線 LAN の大容量化に向けて、自己干渉除去技術により送信と受信を同一帯域で同時に行う全二重通信無線 LAN が有望である。特に、1 台の AP (Access Point) と AP への上り通信を行う STA (Station), AP からの下り通信を受信する STA の 3 台による UFD (user-multiplexing Unidirectional Full-Duplex) 通信は自己干渉除去技術を持たない STA にも適用可能であるという利点がある。従来方式の UFD 通信では、STA の送信頻度が低下し、STA が行う上り通信の遅延時間が大きくなってしまいう問題がある。これは、下りの TCP 通信に対して返送される TCP-ACK の遅延が増大し、TCP スループットを低下させる恐れがある。本稿ではこの問題の解決のために、UFD 通信と OFDMA を組み合わせる方式を提案する。半二重通信と UFD 通信を併用する従来方式に OFDMA を加え、半二重通信、UFD 通信、OFDMA、UFD 通信と OFDMA の組み合わせの 4 方式を用いる。遅延時間を考慮した最適化問題を設計し、それを解くことで、確率的に 4 つの通信方式の選択と通信に参加する STA の選択を行う。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。

キーワード 全二重通信無線 LAN, ユーザ間干渉, 遅延時間, OFDMA

Delay Reduction of In-Band Full-Duplex wireless LAN using Uplink OFDMA system

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 Self-interference cancellation techniques enable in-band full-duplex wireless local area networks (WLANs), where transmit and receive simultaneously in the same frequency band. In particular, user-multiplexing unidirectional full-duplex (UFD) communication, where a full-duplex access point (AP) transmits a frame to a station (STA) and receives a frame from another STA, is a promising technology for broadband WLANs, since UFD is applicable for the conventional STAs without self-interference cancellation capability. However, the UFD communication causes a long data frame transmission delay. This problem decreases the transmission control protocol (TCP) throughput because TCP-acknowledgement (ACK) frames delay. In this paper, we propose a scheme to reduce the data frame transmission delay of STAs. The scheme uses the UFD communication and uplink OFDMA system, and increases transmission opportunities of STAs. Simulation results show that the scheme reduce the delay which is the same level with the half-duplex system.

Key words full-duplex wireless LAN, inter-user interference, delay, OFDMA

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 帯の逼迫も懸念されることから、無線 LAN のさらなる大容量化は急務である。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 では上り通信と下り通信を同一帯域で同時に行うため、システムスループットを向上させることができる。全二重通信無線 LAN には、図 1(a) のような AP (Access Point) の送信先 STA (station) と AP への上り通信を行う STA が同じである双方向全二重 (BFD: Bidirectional Full-Duplex) 通信と、図 1(b) 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 (UFD: user-multiplexing Unidirectional Full-Duplex) 通信がある。UFD 通信は半二重通信にしか対応していない STA にも適用可能であるという利点がある。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。自己干渉を受ける AP にと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 110 dB 除去できることが示されている [1, 2]。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上り通信を行う STA と下り通信を受信する STA の適切な組み合わせを選択することが必要である。我々は UFD 通信における STA 選択を最適化問題として定式化し、システムスループットと STA 間の送信機会に関する公平性を両立させる手法を提案している [3]。

しかし、UFD 通信では半二重通信を用いる場合に比べ、上り通信を行う STA の遅延時間が増大してしまうという課題が残っている。これは、半二重通信の場合と比べて下り通信を行う AP の通信比率が増え、上り通信を行う STA の送信機会が減少するためである。上り通信の遅延時間が増大すると、TCP (Transmission Control Protocol) の下り通信に対して返送される TCP-ACK(Acknowledgement) の送信が遅れ、その結果、下り通信の TCP スループットが低下する恐れがある。

本稿では、遅延時間削減のために図 2 のように UFD 通信に加え、上り通信に OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) を用いるための STA 選択手法を提案する。OFDMA とは周波数チャネルを複数に分割し、サブキャリアを複数のユーザに割り当て、並列に伝送する方式である。現在策定が進められている IEEE 802.11ax において、OFDMA は、短いフレームの並列伝送による周波数利用効率の向上や、TCP-ACK の遅延時間削減による TCP スループットの向上を実現する技術として期待されている。提案方式では、この

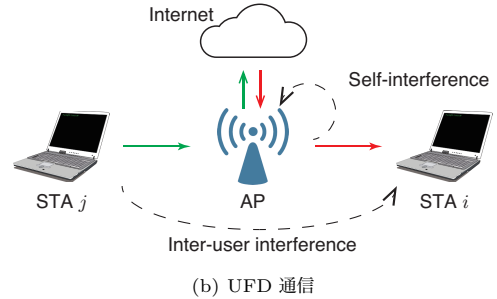
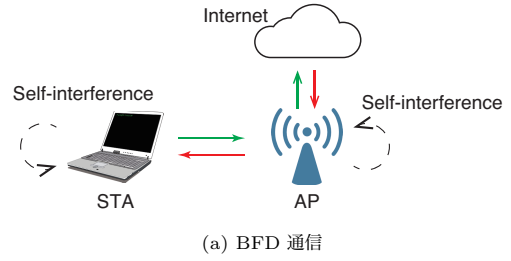


図 1: 全二重通信の適用例

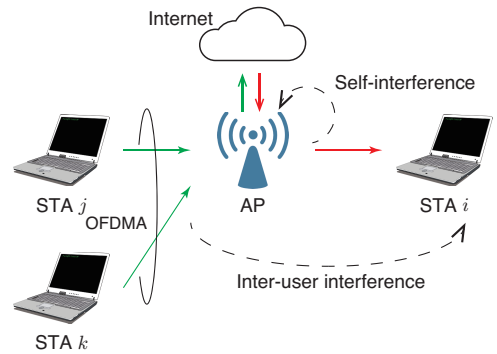


図 2: UFD 通信と OFDMA の組み合わせ

OFDMA によって上り通信を多重化し STA の送信頻度を増加させ、遅延時間を削減する。[3] における最適化問題、STA 選択手法を OFDMA を適用できるように拡張し、半二重通信、UFD 通信、OFDMA 通信、UFD 通信と OFDMA 通信の組み合わせの 4 つの方式を切り替え、STA 選択を行う手法を提案する。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。

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 章では従来方式の問題点について述べる。更に、第 4 章において提案方式について述べ、第 5 章では提案方式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 3 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。OFDMA による多重化は二多重までとし、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, k を選び出す。このとき、STA の組み合わせを

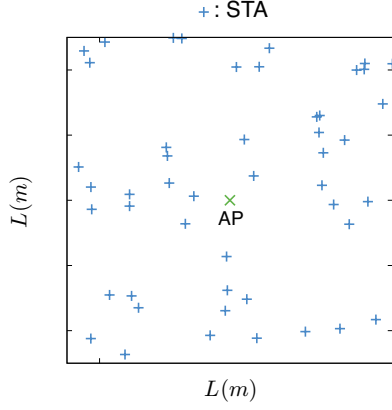


図 3: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

(i, j, k) と表現し, $i, j, k \in \{0\} \cup \mathcal{N}$ 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 $i \neq j$ かつ $i \neq k$ とする. また, i, j, k のすべてが 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示し, 切り替え可能であるものとする.

$i = 0 \cap ((j = 0 \cap j + k \neq 0) \cup (j = k \neq 0))$ の場合

上りの半二重通信

$i \neq 0 \cap j = k = 0$ の場合

下りの半二重通信

$i \neq 0 \cap ((j \neq 0 \cap j + k \neq 0) \cup (j = k \neq 0))$ の場合

UFD 通信

$i = 0 \cap j \neq 0 \cap j \neq k$ の場合

上り OFDMA

$i \neq 0 \cap j \neq 0 \cap k \neq 0$ の場合

OFDMA と UFD 通信の組み合わせ

また, STA の組み合わせを決定する際に用いる推定スループットには, 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.

本稿では, 遅延時間の指標として送信待機時間を用いる. 送信待機時間とは, STA においてあるデータフレームがバッファの先頭に到着してから送信が開始されるまでの時間とする. これは, データフレームがバッファに到着してから先頭に来るまでの時間はトラヒックやバッファサイズ, 輻輳制御によって変動することから, 無線 LAN での通信方式による遅延時間の違いを知るためにはこれらを除く必要があるためである.

3. 提案方式

本節では, 遅延時間の増大を防ぐため, 上り通信を OFDMA を用いて多重化することを提案する. OFDMA を用いて STA の送信機会を増加させることで遅延時間を削減する. STA 決定手法は従来方式 [3] における手法を OFDMA を適用できるように拡張する. また, 計算時間削減のための手法についても検

討する.

3.1 STA の組み合わせ決定手法

AP はすべての組み合わせ (i, j, k) に対してスループット $r_d^{(i,j,k)}$, $r_{u1}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ を推定する. ただし, $r_d^{(i,j,k)}$ は AP から STA i への下り通信の推定スループット, $r_{u1}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ は STA j, k による上り通信の推定スループットである. ここで, 全組み合わせの集合から最低伝送速度の所要 SINR を満たさない通信が含まれている組み合わせを除外した集合を \mathcal{C} とする, AP は $r^{(i,j,k)} = r_d^{(i,j,k)} + r_{u1}^{(i,j,k)} + r_{u2}^{(i,j,k)}$ とすべての STA の送信待機時間 $d^{(j)}$ 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. ただし, 送信待機時間とはあるデータフレームがバッファの先頭に到着してから経過時間である.

$$\mathcal{P}_1: \quad \max \sum_{(i,j,k) \in \mathcal{C}} p^{(i,j,k)} r^{(i,j,k)} (d^{(j)} + d^{(k)})^\alpha \quad (2)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j,k \in \{j,k:(i,j,k) \in \mathcal{C}\}} p^{(i,j,k)} \geq \eta_d^{(i)}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (3)$$

$$\sum_{i,j \in \{i,j:(i,j,k) \in \mathcal{C}\}} p^{(i,j,a)} + \sum_{i,k \in \{i,k:(i,j,k) \in \mathcal{C}\}} p^{(i,a,k)} - \sum_{i \in \{i:(i,j,k) \in \mathcal{C}\}} p^{(i,a,a)} \geq \eta_u^{(a)}, \forall a \in \mathcal{N} \quad (4)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in \mathcal{C}} p^{(i,j,k)} = 1 \quad (5)$$

$$\text{variables: } p^{(i,j,k)} \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \forall (i,j,k) \in \mathcal{C} \quad (6)$$

目的関数は確率 $p^{(i,j,k)}$, 推定スループット $r^{(i,j,k)}$, STA j, k の送信待機時間の和 $d^{(j)} + d^{(k)}$ の積となっており, 推定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設計されている. また, α は目的関数に対する送信待機時間の影響の大きさを調節するための値であり, 大きいほど送信待機時間の大きな STA を含む組が選ばれやすくなる. 一つ目の制約条件はある 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, 二つ目はある STA a が上り通信を行う確率を $\eta_u^{(a)}$ 以上とする条件である. η_d, η_u は 0 より大きく, それぞれのトラヒックに比例した値が設定される. これらは, 選ばれる確率が 0 となる STA が発生しないようにするための条件である. 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 STA に通知される.

次に, STA i, j, k を決定する方法を述べる. 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.

$$p_d^{(i)} = \sum_{j,k \in \{j,k:(i,j,k) \in \mathcal{C}\}} p^{(i,j,k)}, \forall i \in \{0\} \cup \mathcal{N} \quad (7)$$

AP はこの確率 $p_d^{(i)}$ に従って確率的に STA i を選択する. ここで下り通信の送信先として決定した STA を 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. STA i^* の決定後 AP は STA i^* へ送信するデータフレームの

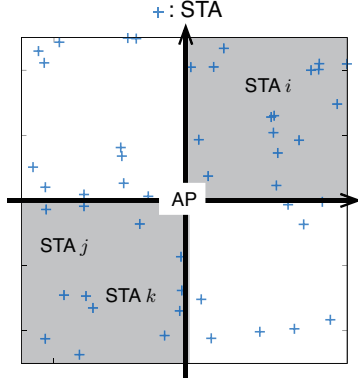


図 4: 位置による STA のグループ分け

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。STA i^* 以外の STA は以下の条件付き確率を計算する。

$$p_{u1}^{(i^*,j,k)} = \left(\sum_{k \in \{k: (i^*,j,k) \in C\}} p^{(i^*,j,k)} \right) / p_d^{(i)}, \quad (8)$$

$$\forall j \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*\} \quad (9)$$

これは、AP が STA i^* へ送信することが決まった上で、各 STA j が上り通信を行う確率である。この条件付き確率をもとに、各 STA はコンテンションウィンドウサイズ $CW_{u1}^{(i,j,k)}$ を

$$CW_{u1}^{(i,j,k)} = \lceil 1/p_{u1}^{(i,j,k)} \rceil \quad (10)$$

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 $[0, CW_{u1}^{(i,j,k)}]$ の一様分布から生成されるバックオフカウンタ $w_{u1}^{(i,j,k)}$ 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 STA を STA j^* とすると、STA j^* は AP へ送信するデータフレームのヘッダ部分のみを送信し、他の STA に自身が上り通信を行うことを通知する。残りの 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。

$$p_{u2}^{(i^*,j^*,k)} = p^{(i^*,j^*,k)} / \left(\sum_{k \in \{k: (i^*,j^*,k) \in C\}} p^{(i^*,j^*,k)} \right) \quad (11)$$

$$\forall k \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*, j^*\} \quad (12)$$

これは、STA i^* 、STA j^* が通信に参加することが決まった上での各 STA が STA k として上り通信を行う確率である。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、最小の $w_{u2}^{(i^*,j^*,k)}$ を設定した STA が STA k^* となり、組み合わせが決まる。組み合わせ決定後、AP、STA j^* 、 k^* はそれぞれデータフレームを送信する。

3.2 計算時間の削減

本節では、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。AP は前節の最適化問題を定期的に解いて、確率 $p^{(i,j,k)}$ を更新しなければならない。なぜなら、目的関数に含まれる送信待機時間 $d^{(j)}$ 、 $d^{(k)}$ は STA が送信を行う度に変化

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	$30 \log D + 40$ (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

する値であるためである。計算結果はビーコンフレームによって全 STA に通知されるが、一般的なビーコン周期は 100 ms であり、ビーコン毎に最適化問題を解く場合は最大で 100 ms 以内に解かねばならず、仮にビーコン数回毎に更新するように計算頻度を減らしたとしても数百ミリ秒単位で解けなければならない。そのため、計算時間を削減することを考えなければならない。

一般的に最適化問題の計算時間は変数の数に依存する。提案方式における変数は $p^{(i,j,k)}$ であり、この数は組み合わせの数 $|C|$ と同じである。したがって、集合 C に含まれる組み合わせの数を減らすことができれば計算時間を削減することができる。最適化の結果に与える影響をできるだけ小さくしながら組み合わせの数を減らすためには、ユーザ間干渉が大きくなり、例え通信ができたとしても伝送速度が低くなってしまような組み合わせを除けばよい。

そこで、本稿では計算時間の削減を行うために STA を位置によってグループ分けを行い、その中から組み合わせを決定するという方法をとる。具体的には、図 4 のように AP を中心とした直行座標を設定し、それぞれの STA がどの象限に位置するかによって 4 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 と UFD 通信を組み合わせる場合は STA i と 2 台の STA j, k は対角の象限、STA j と 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 j は対角の象限に存在する組み合わせのみ含める。ユーザ間干渉は STA i と STA j, k の間の距離が小さいほど大きくなるため、STA i と STA j, k が隣り合った象限に存在する組み合わせはユーザ間干渉が大きくなる可能性が高い。そのため、そういった組み合わせは選択される可能性が低く、選択対象から除外しても影響は小さいと考えられる。

ただし、本稿においては STA の位置は既知であるとし、時間変化もないものとする。

4. 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。半二重通信のみを用いる場合、半二重通信と UFD 通信を併用する従来方式 [3] と、半二重通信、UFD 通信、OFDMA、UFD 通信と OFDMA 通信の組み合わせの 4 方式を用いる提案方式を比較する。OFDMA による多重化は二多重までとし、

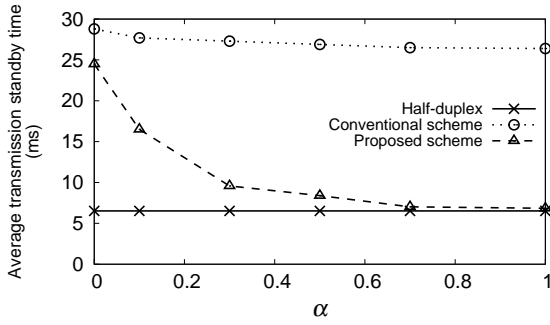


図 5: 上り通信の遅延時間

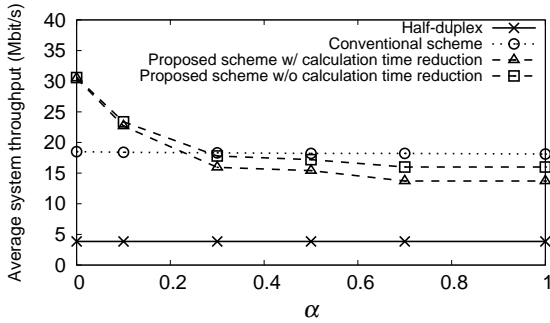


図 6: システムスループット

チャネル幅は二等分するものとする。図 3 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 台の STA がランダムに配置されているとする。第 3.1 節で述べた部分以外の MAC プロトコルは [4] に従うものとする。式 (3) における $\eta_d^{(i)}$ には各 STA 共通の $1/[(N+1)N]$ を、式 (4) における $\eta_a^{(a)}$ 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 に従う。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、トラヒックのほとんどが 64 B 以下の短いフレームと 1500 B 付近の長さのフレームによって占めるからである [5]。また、本稿では遅延時間を送信待機時間と定義する。

4.1 遅延時間の削減

$N=50$ 台の場合について、図 5, 6 に STA の平均送信待機時間とシステムスループットを示す。半二重通信と UFD 通信を用いる従来方式の送信待機時間は半二重通信のときと比べて大きいことがわかる。一方、提案方式はパラメータ α を大きくすることで送信待機時間を半二重通信と同等の値まで削減できていることがわかる。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しまっている。これは、送信待機時間 $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ の項の影響が大きくなり、遅延時間削減を優先しているためである。 α を増加させ遅延時間削減を優先した結果、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。

4.2 計算時間の削減

次に計算時間について評価する。表 2 に第 3.2 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、最

表 2: 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	483 ms

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 40% 削減できている。さらに、計算時間削減手法を用いたことによる影響を調べるために図 6 の両者のシステムスループットを比較すると、全体的に計算時間削減手法を用いた方が用いない場合に比べてシステムスループットが小さくなっている。差は $\alpha=0$ のときには 1%, $\alpha=1$ のときには 18% となっている。簡易な方式ながら大きく計算時間を削減できた。より高度な方式を採用することでさらなる改善が見込まれる。

5. まとめ

本稿では、OFDMA と UFD 通信を組み合わせる手法を提案した。STA の遅延時間が增大するという UFD 通信の問題点を、上り通信を OFDMA により多重化し、STA の送信機会を増加させることで遅延時間の削減を行った。更に、STA のグループ分けを行い最適化問題の変数の数を減らすことで、計算時間を削減する手法についても述べた。

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, March 2014.
- [2] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.43, no.4, pp.375–386, Oct. 2013.
- [3] 飯田直人, 西尾理志, 山本高至, 守倉正博, 鍋谷寿久, 青木亜秀, "全二重通信における公平性と qos の改善," 信学技報 SRW, vol.116, no.187, pp.31–36, Aug. 2016.
- [4] 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.
- [5] 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.