

無線 LAN における全二重通信と上り OFDMA の併用による遅延時間削減

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。この UFD 通信では、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 による上り通信信号が AP による下り通信の送信先 STA において下り通信信号と干渉するユーザ間干渉が存在する。これらの干渉により、同時に行う上下通信のそれぞれの伝送速度は半二重通信の場合のそれに比べて低くなってしまふ。その結果、フレームの時間長が長くなり遅延時間が長くなってしまふという問題がある。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。具体的には、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、確率的に通信方式の選択、通信に参加する STA の選択を行う。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。

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

Delay Reduction Using In-Band Full-Duplex system and Uplink OFDMA system for wireless LAN

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 seen as an enabler of the WLANs, since UFD is applicable for the conventional STAs without self-interference cancellation capability. However, the UFD communication has a large delay of STAs because low physical(PHY) rates are used due to the interferences. In this paper, we propose a scheme to mitigate delay. The scheme use the UFD communication and uplink OFDMA system, and increase 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, fairness, 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 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(a) 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び出すことや、送信電力制御を行うことが必要である。これに関し、システムスループットを最大化することを目的関数とした最適化問題を解くことで STA 選択し、その後電力制御を行う手法が提案されている [3]。更に、筆者らはこの手法を拡張し、システムスループットだけでなく STA 間の公平性や QoS を改善する手法を提案している [4]。

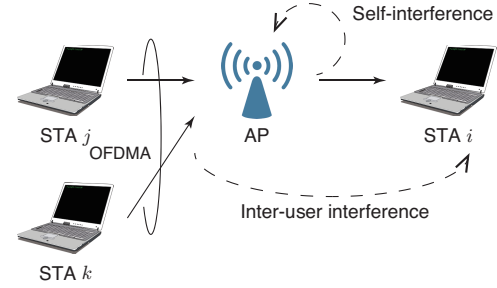
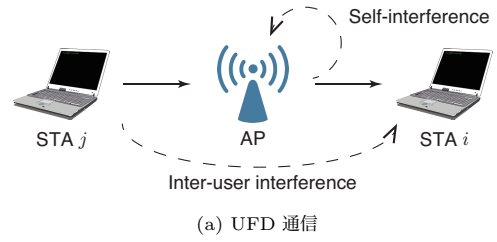
しかし、UFD 通信では半二重通信を用いる場合に比べ、STA の遅延時間が増大してしまうという問題がある。これは、ユーザ間干渉の影響により、半二重通信の場合に比べ伝送速度が低下してしまうため、データフレームの時間長が長くなるのが原因である。

本稿では、遅延時間削減のために図 1(b) のように UFD 通信と上り OFDMA を組み合わせる手法を提案する。上り通信を OFDMA によって多重化し STA の送信機会を増加させることで STA の遅延時間を削減する。具体的には、[4] 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。

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 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。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(b) のよう



(b) UFD 通信と OFDMA 通信の組み合わせ

図 1: 各通信方式

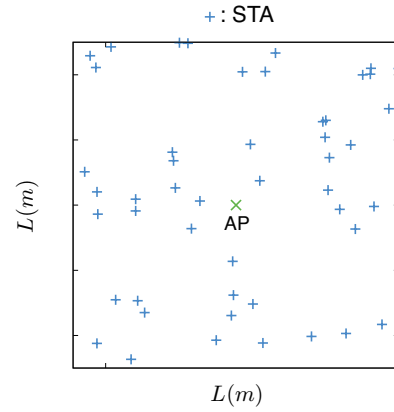


図 2: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

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 (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。

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

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

$i = 0 \cap jk \neq 0 \cap j \neq k$ 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

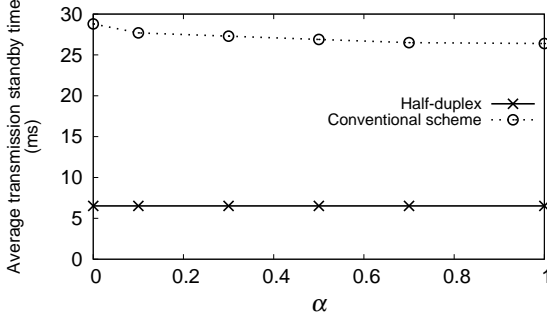


図 3: 半二重通信と従来方式における送信待機時間

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. 従来方式の問題点とその原因

従来の UFD 通信を用いる方式では、半二重通信である場合に比べて遅延時間が増大してしまう。本節では遅延時間の増加という問題点とその原因について述べる。

3.1 遅延時間の増加

図 3 に半二重通信のみを用いる場合と半二重通信と UFD 通信を併用する従来方式 [4] の場合の STA の平均送信待機時間を示す。ただし、送信待機時間とは各 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経過時間であり、 α は目的関数における送信待機時間の影響を調整するパラメータである。送信待機時間が半二重通信の場合と比べて、従来方式は 4 倍以上の値となっていることがわかる。

3.2 伝送速度の低下

本節では送信待機時間が半二重通信の場合と比べて大きくなっていく原因について述べる。AP の送信電力を P_{AP} 、STA j の送信電力を P_j とし、AP-STA i 間、AP-STA j 間、STA i - j 間のチャネル係数をそれぞれ $h_{AP,i}$ 、 $h_{AP,j}$ 、 $h_{i,j}$ とし、雑音電力を σ^2 とすると、半二重通信の場合における上下通信の SINR はそれぞれ、

$$\text{SINR}_d^h = \frac{P_{AP}|h_{AP,i}|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

$$\text{SINR}_u^h = \frac{P_j|h_{AP,j}|^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

となる。一方、UFD 通信の場合の上下通信の SINR はそれぞれ、

$$\text{SINR}_d^f = \frac{P_{AP}|h_{AP,i}|^2}{\sigma^2 + P_j'|h_{i,j}|^2} \quad (4)$$

$$\text{SINR}_u^f = \frac{P_j'|h_{AP,j}|^2}{\sigma^2 + P_{AP}|h_{AP,AP}|^2} \quad (5)$$

となる。ただし、 P_j' は [3] による送信電力制御を行った場合の STA j の送信電力であり $P_j' \leq P_j$ である。また、 $h_{AP,AP}$ は

AP の送信信号が AP 自身によって受信されるまでの伝搬路のチャネル係数に、自己干渉除去技術による干渉除去の効果を加味した値である。

式 (2) と (4) の比較、式 (3) と (5) の比較からわかるように、UFD 通信における上下通信の SINR は、半二重通信の場合の SINR と比べて干渉と送信電力制御による送信電力低下の分だけ悪化する。これにより、UFD 通信では、半二重通信の場合に比べて上下通信それぞれの伝送速度が低下してしまう。

4. 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、前節で述べた伝送速度の低下による遅延時間の増大を軽減する。STA 決定手法は従来方式 [4] 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。

4.1 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 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。

$$P_1: \max \sum_{(i,j,k) \in C} p^{(i,j,k)} r^{(i,j,k)} (d^{(j)} + d^{(k)})^\alpha \quad (6)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{j,k \in \{j,k:(i,j,k) \in C\}} p^{(i,j,k)} \geq \eta_d^{(i)}, \forall i \in \mathcal{N} \quad (7)$$

$$\sum_{i,j \in \{i,j:(i,j,k) \in C\}} p^{(i,j,a)} + \sum_{i,k \in \{i,k:(i,j,k) \in C\}} p^{(i,a,k)} - \sum_{i \in \{i:(i,j,k) \in C\}} p^{(i,a,a)} \geq \eta_u^{(a)}, \forall a \in \mathcal{N} \quad (8)$$

$$\sum_{(i,j,k) \in C} p^{(i,j,k)} = 1 \quad (9)$$

$$\text{variables: } p^{(i,j,k)} \in \mathbb{R}_{\geq 0}, \forall (i,j,k) \in C \quad (10)$$

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_a , 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。

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

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。

$$p_{u1}^{(i^*,j,k)} = \left(\sum_{k \in \{k:(i^*,j,k) \in C\}} p^{(i^*,j,k)} \right) / p_d^{(i^*)}, \quad (12)$$

$$\forall j \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*\} \quad (13)$$

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 はコンテンツウィンドウサイズ $CW_{u1}^{(i^*,j,k)}$ を

$$CW_{u1}^{(i^*,j,k)} = \lceil 1/p_{u1}^{(i^*,j,k)} \rceil \quad (14)$$

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 $[0, CW_{u1}^{(i^*,j,k)}]$ 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。

$$p_{u2}^{(i^*,j^*,k)} = p^{(i^*,j^*,k)} / \left(\sum_{k \in \{k:(i^*,j^*,k) \in C\}} p^{(i^*,j^*,k)} \right) \quad (15)$$

$$\forall k \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*, j^*\} \quad (16)$$

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。

4.2 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

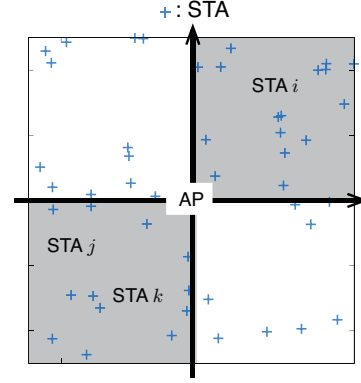


図 4: システムスレープット

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 が送信を行う度に値変化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る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 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。

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

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

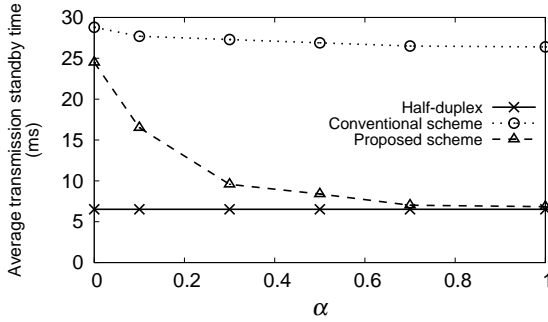


図 5: STA の平均送信待機時間

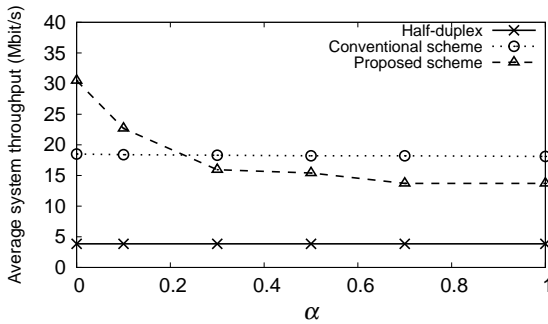


図 6: システムスループット

する。半二重通信のみを用いる場合、従来方式 [4] を用いて半二重通信と UFD 通信を併用する場合と、提案方式を比較する。OFDMA による多重化は二多重までとし、チャネル幅は二分するものとする。図 2 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 4.1 節で述べた部分以外の MAC プロトコルは [3] に従うものとする。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。また、本稿では遅延時間の代わりに送信待機時間を評価指標とする。

5.1 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。第 3. 章で述べた通り、従来方式の送信待機時間は半二重通信の場合のそれと比べ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

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

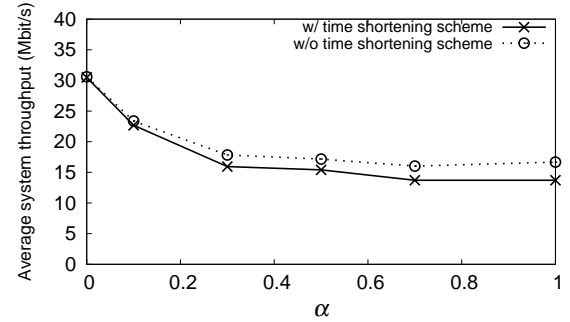


図 7: システムスループットへの計算時間削減手法の影響

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、送信待機時間が大きい STA に通信させるために OFDMA 単体による通信が多くなることが原因であると考えられる。

5.2 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 4.2 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、最適化問題を一回解くために必要な平均時間を示す。結果から分かる通り、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 7 に両者のシステムスループットを示す。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。 α が小さいときには送信待機時間 $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ の影響が小さく、干渉の小さな組み合わせが選ばれやすい。干渉の小さな組み合わせは、AP に対して STA i と STA j, k が対角の位置に存在している場合であり、このような組み合わせは計算時間削減手法を用いていても除外されていないため、影響が少ないと考えられる。一方、 α が大きいときには送信待機時間 $d^{(j)}$, $d^{(k)}$ の影響が大きく、例えある程度干渉が大きい組み合わせでも送信待機時間が大きい STA を選ばざる負えない。このような場合は、計算時間削減手法によって除外された組み合わせの中によりよい組み合わせが含まれてしまっていることがあるため、システムスループットが低下してしまうと考えられる。

6. 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 の遅延時間が増大するという 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] 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.
- [4] 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.