

# 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<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** 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、一定時間内における STA の送信機会が減少し、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。本稿では STA の送信機会を増加させるため、上り通信に OFDMA を適用する方式を提案する。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<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** Self-interference cancellation techniques enable in-band full-duplex wireless local area networks (WLANs), where nodes can 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 due to 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 proposed scheme reduces the delay to the same level of 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、急増するトラヒックにより 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。本稿では、この UFD 通信のうち、STA  $j$  から STA  $i$  への AP を介してのリレー通信ではなく、STA  $i, j$  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。UFD 通信には STA における自己干渉が存在しないため、BFD 通信と異なり自己干渉除去技術を持たない従来の 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]。他の一つは、STA  $j$  の送信信号が他方の 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困難である。

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 [3]。これまで著者らは 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 [4]。

しかし、AP と比べ STA のデータフレームの長さが短い場合に、UFD 通信では半二重通信を用いる場合と比較して、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、図 2 に示すように、UFD 通信では 1 回の通信に AP の長いデータフレームの分だけ時間がかかり、一定時間でみたときに半二重通信と比較して 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。

本稿では、遅延時間削減のために図 3 のように UFD 通信に対して、上り通信に OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) を用いる STA 選択手法を提案する。OFDMA

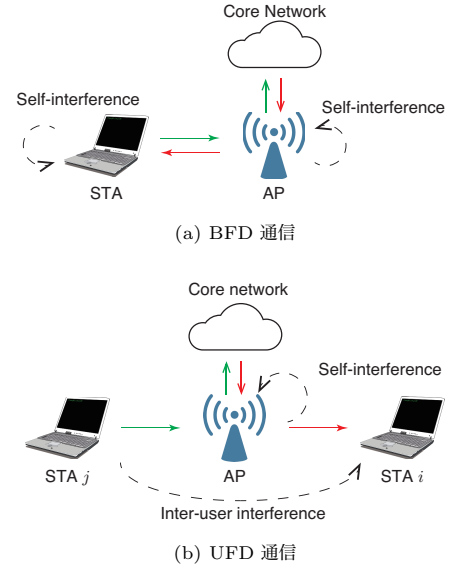


図 1: 全二重通信の適用例

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、時間的に並列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 [5]。提案方式では、この OFDMA によって上り通信を多重化し STA の送信機会を増加させ、遅延時間を削減する。[4] の UFD 通信でのユーザ間干渉を低減するための最適化問題、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 つの通信方式を切り替え、STA 選択を行う手法を提案する。4 つの通信方式を併用することで、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 通信を通信を用い、多くの STA へ送信機会を与えたい場合は OFDMA を用いるといったような状況に応じた制御が可能となる。

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 4 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 による多重化は簡単のため二重までとし、この  $N$  台の STA の中から、図 3 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  $(i, j, k)$  と表現し、 $i, j, k \in \{0\} \cup \mathcal{N}$  であり、STA は自

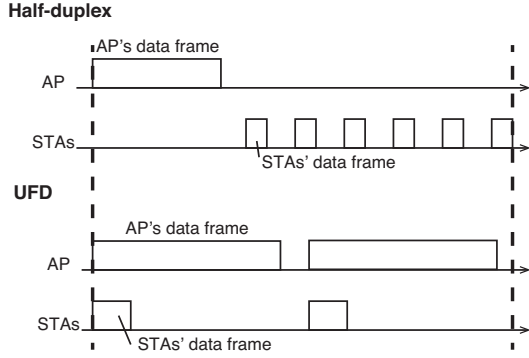


図 2: 半二重通信と UFD 通信における STA の送信機会

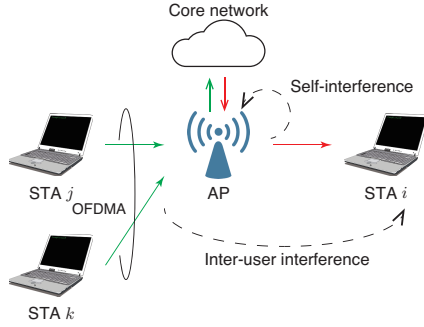


図 3: UFD 通信と OFDMA の組み合わせ

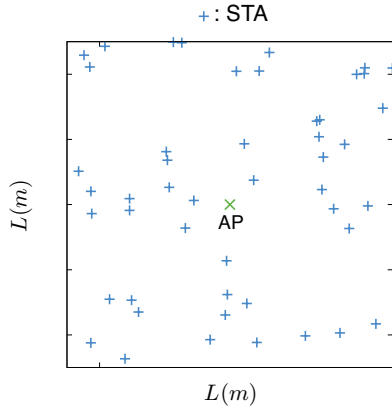


図 4: システムモデル (中心に設置された AP とランダムに配置された STA)

已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、 $i, j, k$  の全てが 0 になることは無いものとする。 $i, j, k$  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。

「 $i = 0$  かつ  $jk = 0$  かつ  $j + k \neq 0$ 」

または「 $i = 0$  かつ  $j = k \neq 0$ 」の場合

上りの半二重通信

$i \neq 0$  かつ  $j = k = 0$  の場合

下りの半二重通信

「 $i \neq 0$  かつ  $jk \neq 0$  かつ  $j + k \neq 0$ 」

または「 $i \neq 0$  かつ  $j = k \neq 0$ 」の場合

UFD 通信

$i = 0$  かつ  $jk \neq 0$  かつ  $j \neq k$  の場合

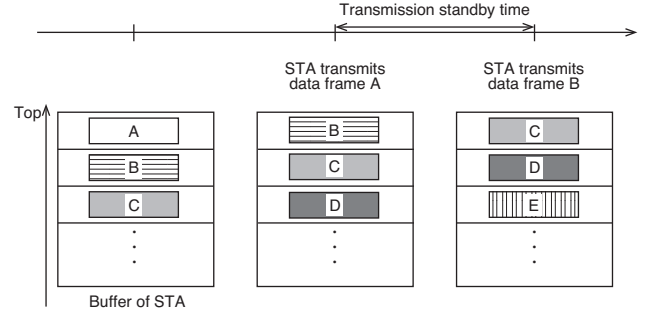


図 5: 送信待機時間の定義

上り OFDMA

$i \neq 0$  かつ  $j \neq 0$  かつ  $k \neq 0$  かつ  $j \neq k$  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) より導出されるシャノン容量を用いる。

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

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間隔を用いる。送信間隔とは、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 [4] における手法を OFDMA を適用できるように拡張する。

#### 3.1 STA の組み合わせ決定手法

まず最初に、この STA 決定手法について概略を述べる。AP は全ての STA の組み合わせについて、各組み合わせで通信が行われた場合のスループットを推定する。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、各組み合わせで通信が行われる確率を求め、その値を全ての STA に通知する。この確率を用いて、AP は下り通信の送信先となる STA  $i$  を決定する。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 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) のバックオフアルゴリズムを用いた競合を行い、STA  $j, k$  が順に決定される。以下、各手順の詳細な説明を行う。

AP は全ての組み合わせ  $(i, j, k)$  に対してスループット  $r_d^{(i,j,k)}$ ,  $r_{u1}^{(i,j,k)}$ ,  $r_{u2}^{(i,j,k)}$  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  $\mathcal{C}$  とし,  $\mathcal{C}$  の要素  $(i, j, k)$  に含まれる  $i, j, k$  の集合をそれぞれ  $\mathcal{N}_i, \mathcal{N}_j, \mathcal{N}_k \subseteq \mathcal{N}$  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, 上り通信を行う STA  $j, k$  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. 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.

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

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

$$\sum_{j \in \mathcal{N}_j} \sum_{i \in \mathcal{N}_i} p^{(i,j,l)} + \sum_{k \in \mathcal{N}_k} \sum_{i \in \mathcal{N}_i} p^{(i,l,k)} - \sum_{i \in \mathcal{N}_i} p^{(i,l,l)} \geq \eta_u^{(l)}, \forall l \in \mathcal{N} \quad (4)$$

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

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

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,  $\alpha$  は目的関数に対する  $d^{(j)}, d^{(k)}$  の影響の大きさを調節するための値であり, 大きいほど送信機会を得られていない STA を含む組が選ばれやすくなる. 第一の制約条件式 (3) 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 (4) 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.  $\eta_d^{(i)}, \eta_u^{(l)}$  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全ての STA に通知される. この最適化問題で用いられる  $d^{(j)}, d^{(k)}$  は時間変化する値であるため, AP は数回のビーコンフレーム送信毎に変化した値を用いてこの最適化問題を解き直し, 確率  $p^{(i,j,k)}$  の更新を行う.

次に, STA  $i, j, k$  を決定する方法を述べる. まず最初に, AP が 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.

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

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, STA  $i^*$  を含めた全ての STA はどの STA が

AP からの下り通信の送信先となったのかを知る必要があるため, 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 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 は以下の条件付き確率を計算する.

$$p_{u1}^{(i^*,j,k)} = \left( \sum_{k \in \mathcal{N}_k} p^{(i^*,j,k)} \right) / p_d^{(i)}, \forall j \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*\} \quad (8)$$

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

$$CW_{u1}^{(i^*,j,k)} = \lceil 1/p_{u1}^{(i^*,j,k)} \rceil \quad (9)$$

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いことを示す. 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.

$$p_{u2}^{(i^*,j^*,k)} = p^{(i^*,j^*,k)} / \left( \sum_{k \in \mathcal{N}_k} p^{(i^*,j^*,k)} \right), \quad \forall k \in \{0\} \cup \mathcal{N} \setminus \{i^*, j^*\} \quad (10)$$

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いことを示す. また,  $k^* = j^*$  のときは上り通信に OFDMA 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,  $k^*$  は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  $d^{(j)}, d^{(k)}$  は時間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, ビーコンフレームを送信する度に最適化問題を解く場合は最大で 100 ms

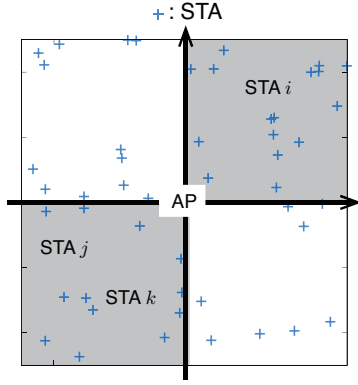


図 6: 位置による STA のグループ分け

以内に解かねばならず、仮にビーコンフレーム送信の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。一方、STA が 50 台存在する場合に、すべての組み合わせを対象として最適化問題を解くためには 1 秒程度必要であることがシミュレーションにより判明しているため、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、例えば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 6 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、時間変化はないものとする。

#### 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 [4] 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 による多重化は簡単のため二重重

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

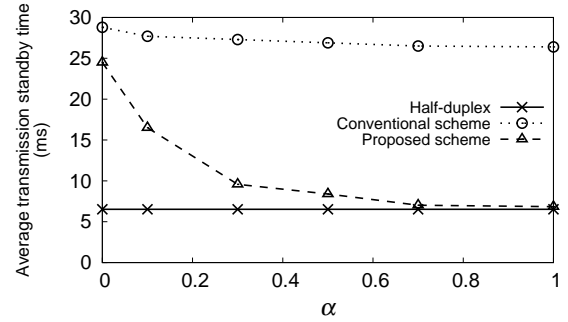


図 7: STA の平均送信待機時間

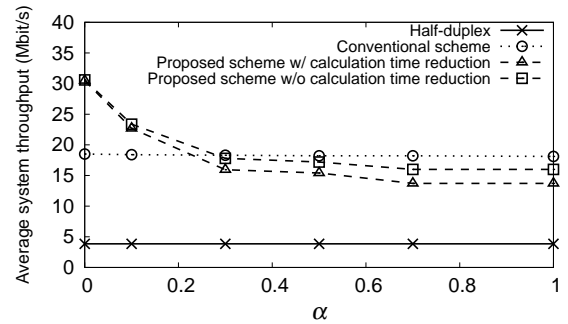


図 8: システムスループット

でとし、チャンネル幅は二等分するものとする。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。第 3.1 節で述べた STA 選択に関する部分以外の MAC プロトコルは [3] 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  $\eta_u^{(i)}$  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 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られるからである [6]。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

図 7, 8 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。ただし、平均送信待機時間とは各 STA において送信毎の送信待機時間の平均をとった後、全 STA において平均をとったものである。半二重通信と UFD 通信を用いる従来方式

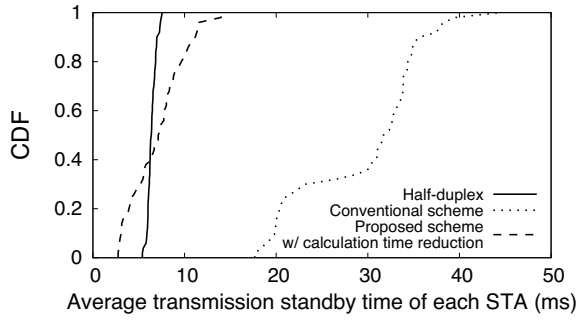


図 9: 各 STA の平均送信待機時間の CDF

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	226 ms

の送信待機時間は半二重通信と比べ大きい。一方、提案方式はパラメータ  $\alpha$  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。しかし、 $\alpha$  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、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。 $\alpha$  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。

図 9 に各 STA の平均送信待機時間の CDF (Cumulative distribution function) を示す。提案方式は半二重通信と比較して平均送信待機時間のばらつきが大きいものの、従来方式と比べると小さい。これは各 STA 間の送信待機時間に関する公平性が高いことを示す。

#### 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、最適化問題を 1 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。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 8 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幅な計算時間削減が可能である。

### 5. まとめ

本稿では、OFDMA と UFD 通信を組み合わせて用いる手法を提案した。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.
- [5] S. Kim, H. Choi, J. Kim, K. Ryu, and H.G. Cho, “OFDMA performance in 11ax,” Sept. 2015. <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/15/11-15-1095-00-00ax-ofdma-performance-in-11ax.ppt>
- [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.