

上り OFDMA 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。しかし、UFD 通信では下り通信の送信機会が大きく増加しシステムスループットは向上するものの、ユーザ間干渉による伝送速度の低下や STA の送信頻度の低下のため、STA からの上り通信の遅延時間が大きく増加する問題がある。STA の上り送信の遅延時間削減に向け、上り OFDMA を用いた全二重通信無線 LAN における送受信 STA 選択手法を提案する。上り OFDMA により、1 回の送信機会に複数の STA の同時送信を可能とし、STA の送信機会を向上させ遅延時間を削減する。送受信をおこなう STA 組の決定問題を最適化問題として定式化し、AP は本最適化問題より各 STA の選択確率を決定する。シミュレーション評価により、提案方式はシステムスループットを大きく低下させることなく遅延時間を半二重通信と同等まで削減できることを示した。

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

Station Selection Scheme for In-Band Full-Duplex WLAN with UL-OFDMA for Reducting Transmission Delay

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 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 increases an uplink transmission delay. In this paper, we propose a station selection scheme where combination of sender and receiver STAs are adaptively selected in order to increase a throughput and reduce the transmission delay. 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 as 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 2.4GHz 帯は逼迫しており、近い将来 5GHz 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) に示す AP (Access Point) からの下り通信を受信する STA (station) と上り通信を行う STA が同一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。全二重通信では送信と受信を同時に行うため、送信信号が所望受信信号に干渉を及ぼす自己干渉が生じる。自己干渉は既知の信号であることを用いて干渉を除去する技術が検討されており、最大で 110dB 除去できることが示されている [1, 2]。BFD 通信では自己干渉が AP と STA の両方で生じる。そのため、干渉除去機能を有しない既存の無線 LAN 機器には適用できない。UFD 通信では STA における自己干渉が生じないため、自己干渉除去機能を持たない従来の STA にも適用可能であるという利点がある。一方で、UFD 通信では 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が生じる。ユーザ間干渉は、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 通信における送受信 STA 選択手法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するアクセス制御方式を提案している [4]。

しかし、AP と比べ STA のデータフレーム長が短い場合に、UFD 通信では半二重通信と比較して、上り通信を行う STA の遅延時間が増大する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 (Transmission Control Protocol) 下り通信における TCP-ACK (Acknowledgement) 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 [5]。

本稿では、遅延時間削減に向け、UFD 通信の上り通信へ OFDMA を適用した無線 LAN と本無線 LAN における送受信 STA 選択手法を提案する。図 3 にシステムモデルを示す。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、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

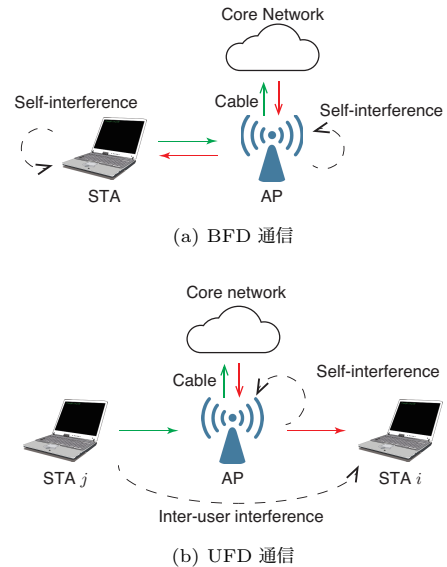


図 1: 全二重通信の適用例

Half-duplex

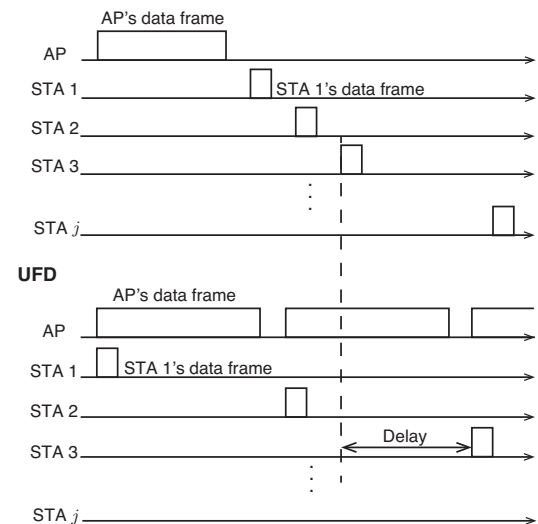


図 2: 半二重通信と UFD 通信における STA の送信機会

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 [6]。提案方式では、OFDMA 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。本稿では、[4] で提案する送受信 STA 選択最適化問題を拡張し、上り OFDMA に対応した STA 選択を可能とする。提案手法では、半二重通信、UFD 通信、上り OFDMA、UFD 通信と上り OFDMA の組み合わせの 4 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 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

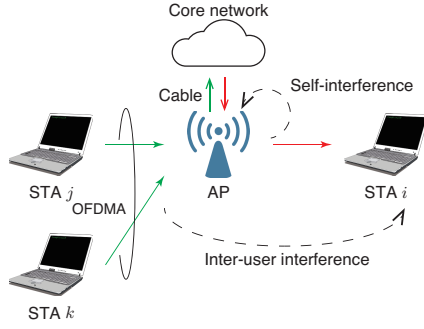


図 3: UFD 通信と OFDMA の組み合わせ

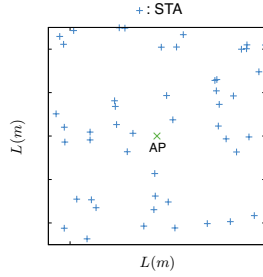


図 4: AP と STA の配置の一例

テムモデルについて述べ、第 3 章において提案方式について述べる。第 4 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し、最後に第 5 章でまとめとする。

2. システムモデル

図 4 に AP と STA の配置の一例を示す。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、半二重通信、UFD 通信で用いるチャネルを 2 台の STA が二等分して用いる。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、 $i, j, k \in \{0\} \cup \mathcal{N}$ 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 0 になることはないものとする。 i, j, k のそれぞれが取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
- $i \neq 0 \wedge j = k = 0$
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
- $i \neq 0 \wedge jk \neq 0 \wedge j \neq k$
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

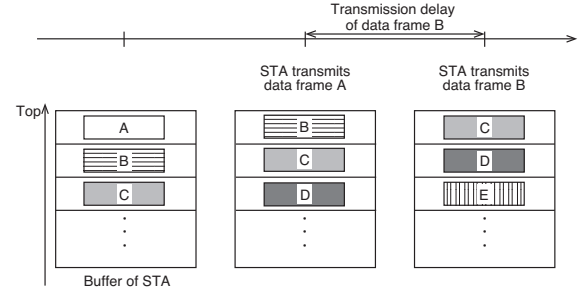


図 5: 遅延時間の定義

ットには、上り下り通信のそれぞれの SINR (Signal-to-Interference plus Noise power Ratio) に対するシャノン容量を用いる。ただし、 B は通信に用いる帯域幅である。

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

本稿では、図 5 に示すように STA の遅延時間を、あるデータフレームに対しそのフレームが STA の送信バッファの先頭に到着した時刻から送信機会を獲得しそのフレームの送信が開始した時刻までの経過時間とする。これは、輻輳制御やバッファ制御の影響を排除した無線メディアアクセス制御における遅延を評価するためである。

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。また、本章で述べる部分以外の MAC (Media Access Control) プロトコルは [3] に従う。

3.1 送受信 STA 組決定手法の概要

本手法の手順は図 6 の通りである。太枠で示した部分が、OFDMA 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 の遅延時間をもとに、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。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現在時刻までの経過時間である。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 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、前述の推定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。推定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化する上、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 は定期的な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

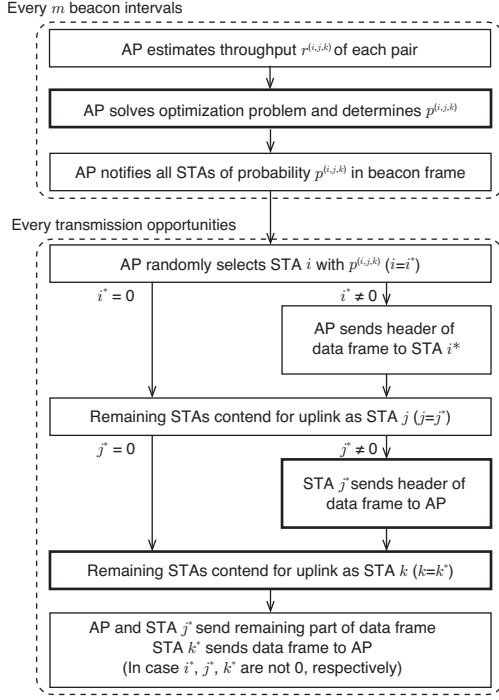


図 6: 送受信 STA 選択手法の手順

よって全ての STA へ通知される。

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 (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。決定した STA をそれぞれ STA j^*, 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。

3.2 送受信 STA 組決定手法の詳細

本節では前節で述べた各手順について詳細を述べる。従来方式 [4] に対しては、OFDMA 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 $r_d^{(i,j,k)}$, $r_{u1}^{(i,j,k)}$, $r_{u2}^{(i,j,k)}$ 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 $\mathcal{N}_i, \mathcal{N}_j, \mathcal{N}_k \subseteq \{0\} \cup \mathcal{N}$ 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。

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

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

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

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

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

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にするため、確率 $p^{(i,j,k)}$ 、推定スループット $r^{(i,j,k)}$ 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。さらに、選ばれる確率が 0 となる STA 組みが発生しないよう式 (3), (4) によって下限を設定する。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。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, j, 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。

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

AP はこの確率 $p_d^{(i)}$ に従って確率的に STA i を選択する。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 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。

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

これは、AP が STA i^* へ送信することが決まった上で、各 STA

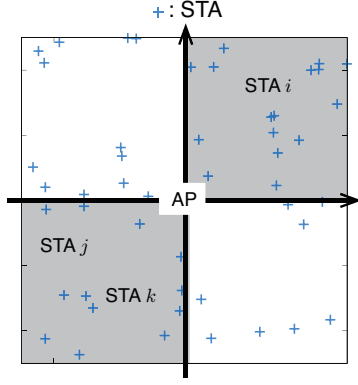


図 7: 位置による STA のグループ分け

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 $CW_{u1}^{(i^*,j,k)}$ 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 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。

3.3 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。第 3.1 節で述べたように、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 $r^{(i,j,k)}$ 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

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	2.4 GHz
帯域幅 (半二重, UFD 通信)	20 MHz
帯域幅 (OFDMA)	10MHz ずつ
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

化問題は線形最適化問題であるが、Karmarkar の内点法 [7] を用いる場合、計算量は変数の数 n に対して $O(n^{3.5})$ 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 の多重数を M とすると、最大で $(N+1)N^M - 1$ となる。そのため、 N が大きくなると計算量が爆発的に大きくなる。

そこで、本稿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、受信 STA と送信 STA 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 と上り通信を行う 2 台の STA j, 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 7 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を含める。

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。シミュレーションは最適化問題は MATLAB により計算し、そのほかの部分は C 言語で作成したシミュレータによって行う。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、上り OFDMA、UFD 通信と上り OFDMA 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多重までとし、チャ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。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

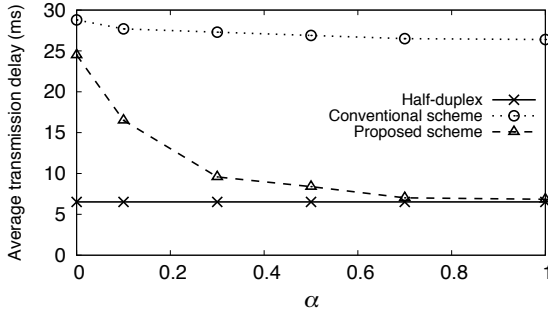


図 8: 上り通信の平均遅延時間

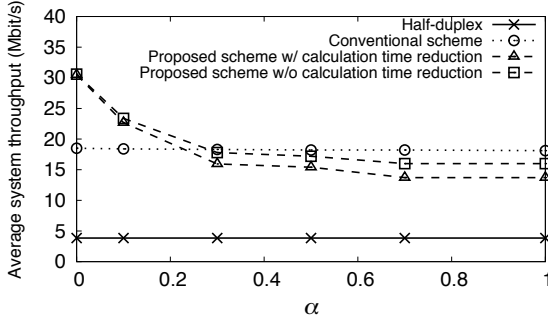


図 9: システムスループット

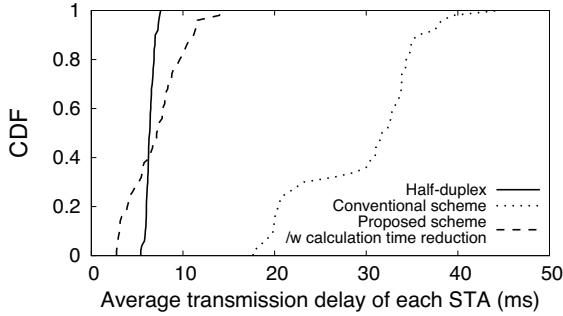


図 10: ある試行における各 STA の平均遅延時間の CDF

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 [8]。

図 8, 9 に STA の平均遅延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 間の公平性を示すため、図 10 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

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

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、従来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 2 に第 3.3 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、送受信 STA の組み合わせを制限するため、利得の高い組み合わせまで除外されることがありシステムスループットが低下する。図 9 より計算量削減手法を用いた場合でもシステムスループットの低下は最大 18% となった。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

本稿では、UFD 通信に上り OFDMA を適用するための送受信 STA 選択手法を提案した。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改善を行った。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検討した。

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 GLOBE-COM, 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 SRW2016-38, vol.116, no.187, pp.31–36, Aug. 2016.
- [5] 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.
- [6] 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>
- [7] N. Karmarkar, "A new polynomial-time algorithm for linear programming," Combinatorica, vol.4, no.4, pp.373–395, 1984.
- [8] 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.