

Radio over fiberを用いた 多アンテナミリ波無線LANにおける ハンドオーバーを考慮した動的チャネル割当手法

榊田裕樹¹ 村上航大¹ 真野浩² 高井峰生³ 石原進¹

概要: モバイル機器の普及により増大するトラフィックに対応するため, 従来無線LANに比べ広い帯域を利用できる, 60GHz帯のミリ波を用いた無線通信システムが注目されている. しかしながら, ミリ波は伝搬損失が大きく伝送距離が短いため, 十分なカバレッジ確保のために多数のアクセスポイント (AP) が必要となり, その設置コストが問題となる. Radio over Fiberを用いて, 1台のAPに対し複数のアンテナを接続することでAPの設置コストを低減できるが, APの使用チャネルが固定されているとユーザの地理的分布の変化により, 特定のAPに負荷が偏ることがある. 本稿では, ユーザの地理的分布に基づき各APに割り当てられているユーザ数を平準化するとともに, ハンドオーバーの起こりやすさを低減する同一チャネル割当隣接セル最大化法 (MSCN) を提案する. 提案手法が, APの使用チャネルが固定されている場合と, 筆者らによって既に提案されていた手法と比較し, 高い公平性を確保しつつ, ハンドオーバーの起こりやすさを低減できていることを, シミュレーションによって確認した.

1. はじめに

スマートフォンに代表されるモバイル機器の爆発的な普及により, 無線通信のトラフィック量は急激に増加している. そのため, ネットワークの大容量化が急務となっているが, 従来無線LANで用いられている10GHz以下の無線周波数帯域の使用状況は既に逼迫した状態にあり, これ以上の大容量化は困難である. このような背景により, 10GHz帯未満より広い帯域が利用できるミリ波帯の利用が注目されている [1].

ミリ波無線通信は, 広帯域の利用による高速無線LAN通信が可能であるが, ミリ波は伝搬損失や遮蔽損失が大きく, 伝送距離を確保するために指向性アンテナを用いる必要がある. それに伴いセルサイズが小さくなる. セルサイズが小さいために, 十分なカバレッジを確保するために多数のセルが必要になる. このとき, 1セルあたり1台のアクセスポイント (AP) を設置すると, その設置コストが大きくなってしまふ.

この問題に対し, Radio over Fiber (RoF) 技術を用いる手法がある. RoF技術とは, RF信号を光信号に変換して光ファイバを介し伝送することで, 少ない伝搬損失でRF

信号の長距離伝送を可能にする技術である [3]. この技術を用いて, AP1台に対し複数のアンテナを光ファイバで接続することで, 1台のAPで多数のセルを構築でき, コストを抑えてカバレッジを広げることができる.

RoFを用いた多アンテナミリ波無線LANシステムにおいて, 各セルのアンテナとAPの接続関係が固定されていると, ユーザが特定セルに集中している場合, そのセルと接続されたAPに負荷が集中してしまう. また, セルサイズが小さいことで, 異なるチャネルを用いるセル間でのユーザ移動が起こりやすくなるため, ハンドオーバーが起こりやすくなりシステム全体のスループットの低下をまねく. そこで筆者らは, APとセルの接続関係を, ユーザの地理的分布に基づき動的に切り替えることで特定APの負荷の集中を避けつつ, ハンドオーバーの起こりやすさを抑える手法を提案している [4].

本稿では, [4]手法に対し, ハンドオーバーの起こりやすさを更に低減できるように改良を加えた手法を提案する. また, シミュレーションにより提案手法の効果を評価する. 以下, 2章で本研究の関連研究について述べる. 3章で筆者らが想定するRoFを用いた多アンテナミリ波無線LANシステムの詳細について述べ, 4章で提案手法の詳細を述べる. 5章で提案手法のシミュレーションによる評価について述べ, 6章で本稿をまとめる.

¹ 静岡大学

² KODEN TECHNO & INFO

³ University of California, Los Angeles

2. ミリ波無線 LAN の課題と対策

2.1 ミリ波無線 LAN 技術

60GHz 帯の周波数を用いるミリ波無線 LAN は IEEE802.11ad で標準化されている [2]. この規格では、1 チャンネルあたり 2.16GHz もの広帯域を利用することができるため、チャンネルボンディングや MIMO などの技術を用いることなく、ギガビット/sec の通信速度達成可能である (最大で約 4Gbps から 6Gbps). しかしながら、ミリ波は従来無線 LAN で用いられる 10GHz 以下の周波数帯に比べ伝搬損失と遮蔽損失が激しい. さらに 60GHz 付近の周波数帯は、特異的に酸素分子の吸収による大きな損失も存在するため、伝送距離が短くなる. IEEE802.11ad では、指向性アンテナとビームフォーミング技術を用いることで、ミリ波の短い伝送距離に対する対策としている. その上で、IEEE802.11ad で想定されている利用距離は約 10m である. そのため、従来無線 LAN 同様のカバレッジを確保するためには、多数の AP が必要となり、その設置コストが大きくなるという問題がある.

2.2 Radio over Fiber (RoF) 技術の利用

Radio over Fiber (RoF) 技術を用いて、1 台の AP に対し複数のアンテナを接続することで、少ない台数の AP で多数のセル環境を構築できるため、AP の設置コストを抑えつつカバレッジを確保することが可能であり、RoF 技術のミリ波無線 LAN への応用について活発に研究が行われている [5][6]. また、Kalfas らによって 60GHz 帯のミリ波無線 LAN に RoF 技術を利用したシステムにおける MAC アルゴリズムが提案されている [7].

以下、本稿で扱う RoF を使用した多アンテナミリ波無線 LAN システムにおける特有の課題について記述する.

2.2.1 特定 AP への負荷の集中

RoF を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システムにおいて、AP とアンテナの接続関係が固定されていると、ユーザの地理的分布によって特定の AP に負荷が偏る場合があり、システム全体のスループットが低下する原因となる.

特定の AP への負荷集中は、RoF を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システムに限らず、既存の無線 LAN システムにおいてもその性能に関わる重要な問題であり、それを防ぐ手法についてこれまでに様々な提案がなされている [8][9]. これらの手法は、AP が自分自身にかかっている負荷の情報をビーコンに付加して送信し、そのビーコンを受け取った端末が、ビーコンの受信強度とビーコンから読み取れる各 AP の負荷状況に基づいて、負荷が分散されるように接続先 AP の選択を行う.

2.2.2 ハンドオーバーの頻発

本稿で扱う RoF を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システムでは、アンテナ方向を固定した指向性アンテナを多

数設置し、極小セルが隙間なく配置されるようなセル環境を構築する. そのような環境下でユーザが移動した場合、セル間をまたいだ移動が増えるため、ハンドオーバーが起りやすくなる. したがって、ハンドオーバーによるオーバーヘッドが増加するためシステム全体のスループットの低下の原因となる.

2.2.3 チャンネル割当問題

本稿では、使用するチャンネルの固定された AP と、各アンテナの接続関係を適宜切り替えることで、以上の問題の対処を試みている. この切替動作をセル (アンテナ) へのチャンネル割当と呼称しているが、チャンネル割当問題は、2.2.1 で述べた特定 AP への負荷集中の問題と同様に、既存の無線 LAN システムにおいて議論されてきており、これまでにさまざまなチャンネル割当手法が提案されている [10][11]. しかし、これらで議論されているチャンネル割当問題とは、同一のチャンネルを用いた複数の通信による電波干渉を防ぐためのチャンネル割当に関する問題である. 本稿で議論するチャンネル割当とは、それぞれ別のチャンネルを 1 ずつ固定して用いる各 AP と多数のアンテナとの接続関係を切り替えることを言う. これは、既存の無線 LAN システムにおける AP ごとのチャンネル割当とは異なる.

3. Radio over Fiber を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システム

3.1 概要

本システムは、ミリ波を用いた無線 LAN において、1 台の AP に対し地理的に分散配置された複数のアンテナを RoF を用いて接続することで、少ない AP 数で十分なカバレッジを確保することが可能である. ミリ波無線 LAN の標準規格である IEEE802.11ad では、ミリ波の短い伝送距離に対応するために指向性アンテナを用いる. アンテナの指向性が強いと、セルサイズが小さくなるため、カバレッジ確保のために多数の AP が必要となり、その設置コストが問題となる. 本システムを用いることで、設置コストを抑えつつ、カバレッジ確保が可能となる. また本システムは、AP とアンテナの接続関係を自由に切り替えることが可能である. AP とアンテナの接続関係が固定されていると、ユーザの地理的分布が特定セルに集中している場合、そのセルと接続された AP に負荷が集中する. 本システムは、ユーザの地理的分布に基づいて AP とアンテナの接続関係を適宜切り替えることで、特定 AP への負荷の集中を防ぐことができる.

3.2 想定環境

以下、本システムの想定環境を示す.

- 本システムは、スタジアムや空港などのユーザの密度が高い環境での使用を想定している.
- 中央局に集約された多数のアンテナを下向きに固定し

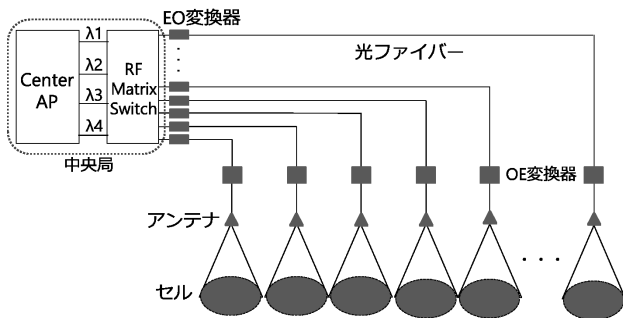


図 1 システム概要

て天井に設置する。

- 使用する無線デバイスは、IEEE802.11ad をベースにしたものを用いる。アンテナは高い指向性を持っているが、ビームフォーミングによる指向性制御は行わない。
- セルサイズは半径 3m の円を想定している。
- WiFi や NFC を用いた端末の位置検出技術の使用によって、中央局で端末の位置と数を把握できる [12][13][14][15]。
- 中央局は、RoF によって接続されている AP と各アンテナの接続の組み合わせを容易に変更できる。
- IEEE802.11ad で定義されている 4 チャンネルの全てを利用する。
- 広帯域の E/O 及び O/E 変換は容易では無いため、AP1 台につき 1 チャンネル分の帯域を使用する。

3.3 アーキテクチャ

本システムの概要を図 1 に示す。本システムは、4 台の AP を集約した CenterAP、RF スイッチマトリックス、E/O、O/E 変換器、光ファイバ、指向性アンテナで構成される。CenterAP と RF スイッチマトリックスを中央局とする。各 AP は IEEE802.11ad で定義されている 4 チャンネルをそれぞれ 1 つずつ用いる。CenterAP の 4 つのポートからは異なるチャンネルの RF 信号が入出力される ($\lambda_1 \sim \lambda_4$) それらの RF 信号を、RF スイッチマトリックスを介して、AP とアンテナの接続関係に従い、E/O 変換器へ伝送される。そして E/O 変換器により光信号に変換後、光ファイバで伝送し、O/E 変換器で RF 信号に戻してアンテナから出力する。E/O 変換、及び O/E 変換は技術的に広帯域の変換が困難である。そのため、各アンテナの E/O、O/E 変換器で扱えるのは 1 チャンネルのみである。RF スイッチマトリックスでは、AP とアンテナの接続関係の変更が可能である。各アンテナが使用するのは 1 チャンネルのみなので、アンテナと接続される AP を変更することは、アンテナが使用するチャンネルを変更することに相当する。以下、アンテナと接続する AP を変更することを、チャンネルを変更することと同義として扱う。また、同じ AP の接続関係にあるアンテナには、全て同じ信号が伝送される。

4. 動的チャンネル割当手法

RoF を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システムにおいて、AP (チャンネル) とセル (アンテナ) との接続関係が固定されていると、ユーザの分布の偏り具合によって、特定 AP (チャンネル) へ負荷が集中してしまう。また、セルサイズが小さいことから、ユーザのセル間移動が起こりやすくなるため、ハンドオーバーが頻発する。そのため、ユーザの地理的分布に基づき、AP (チャンネル) に対する負荷を分散しつつ、ハンドオーバーが起こりにくくなるようにチャンネル割り当てを動的に変更するためのアルゴリズムが筆者らによって提案されている [4]。本稿では、[4] で提案されているセル集約型負荷平準化法に対し、ハンドオーバーの起こりやすさをさらに低減できるように改良を加えた手法である。同一チャンネル割当隣接セル最大化法 (Maximize Same Channel-Neighbor) を提案する。本章では、4.1 にて、動的チャンネル割当アルゴリズムの基本戦略について述べ、4.2、4.3 にて提案手法の基本となったアルゴリズムについて述べる。そして、4.4 にて、提案手法である同一チャンネル割当隣接セル最大化法について述べる。

4.1 基本戦略

本稿で議論するチャンネル割当アルゴリズムでは、以下の 2 つの課題を解決するようにチャンネル割当を行う。

- チャンネルごとの収容ユーザ数の平準化
- ハンドオーバーの起こりやすさの抑制

以下、それぞれの項目について述べる。

4.1.1 チャンネルごとの収容ユーザ数の平準化

システム内の全ユーザの使用するトラフィック量が同じであると仮定すると、AP の負荷を分散することは、チャンネル (AP) ごとの収容ユーザ数を平準化することと同じと考えられる。チャンネル (AP) あたりの収容ユーザ数を平準化する問題は、NP 完全問題の一つである Multi-way Number Partitioning 問題と考えることができる。この問題は、与えられた n 個の整数 a_1, \dots, a_n を複数の集合に分ける際、それぞれの集合の和ができるだけ等しくなるように分ける問題である。

チャンネル (AP) あたりの収容ユーザ数を平準化する問題も同様に、 N_c 個のセルの収容ユーザ数 u_1, \dots, u_{N_c} をチャンネル数である N_{CH} 個の集合に分ける際、それぞれの集合の和が等しくなるように分ける問題であると考えることができる。ここで、 N_c はセルの総数、 u_i はセル i の収容ユーザ数、 N_{CH} はチャンネル総数を表している。

Korf によって、Multi-way Number Partitioning 問題における効率的な解法がいくつか提案されている [17]。それらの手法の一つに貪欲法がある。貪欲法は、少ない計算量で比較的良好な解が得られる解法である。チャンネル割り当て問題に貪欲法のみを用いた場合、チャンネルごとの収容

ユーザ数の平準化は達成できるが、セル（チャンネル）の隣接関係は考慮していないため、ハンドオーバーの起こりやすさを低減することはできない。

4.1.2 ハンドオーバーの起こりやすさの抑制

本システムにおいてハンドオーバーは、ユーザが異なるチャンネルを割り当てられたセル間を移動する際に発生する。一方、同一のチャンネルを用いているセル間であれば、ユーザが移動してもハンドオーバーは発生しない。つまり、同じチャンネル AP を割り当てられたセルがなるべく多く隣接するように割り当てることで、ハンドオーバーの起こりやすさを抑制できると考える。そこで、貪欲法を基本として、チャンネルあたりのユーザ数を平準化しつつ、隣接するセルが同じチャンネルを用いるように割り当てるセル集約型負荷平準化法が、村上らによって提案されている [4]。本稿では、この手法に改良を加え、隣接セルに割り当てられている同一チャンネルの数が最大化されるように割り当てる同一チャンネル割当セル最大化法を提案する。

4.2 貪欲法

貪欲法は、Multi-way number Partitining 問題における単純かつ比較的良好な解が得られる手法の一つである。貪欲法をチャンネル割当問題に適用した場合の動作を以下に示す。

1. 収容ユーザ数が多いセルから順にチャンネル割当処理を行う。
2. 処理対象のセルに、割り当て済みのユーザ数が最も少ないチャンネルを割り当てる。
3. 2において、割り当て済みユーザ数が同じチャンネルが存在した場合、チャンネル番号が最も若いチャンネルを処理対象のセルに割り当てる。

4.3 セル集約型負荷平準化法 (Same Channel-Neighbor)

セル集約型負荷平準化法 (SCN) は、提案手法である同一チャンネル割当隣接セル最大化法 (MSCN) の改良元である手法で、筆者らによって提案された [4]。この手法は、貪欲法を基本とし、チャンネルごとの収容ユーザ数を平準化し、かつ、ハンドオーバーの起こりやすさを低減するため、隣接セルが同じチャンネルを用いるように割り当てる。

以下にアルゴリズムを示す。

1. セル内のユーザ数 (u_1, \dots, u_{N_c}) の降順にセルをソートする。
2. 最上位のセルのユーザ数を加えてもチャンネルの収容ユーザ数が閾値 (総ユーザ数/総チャンネル数) を超えないチャンネルを候補として選択する。ここで、どのチャンネルも該当しない場合、閾値をインクリメントする。
3. 最上位のセルの隣接セルに、チャンネル割り当て済のセルがある場合、そのチャンネル以外を候補から外す。

4. チャンネルの候補の中から収容ユーザ数が最も少ないチャンネルを選択し、セルに割り当てる。
5. 全てのセルにチャンネルが割り当てられるまで 2-4 を繰り返す。

4.4 同一チャンネル割当隣接セル最大化法 (Maximize Same Channel-Neighbors)

本稿では、同一チャンネル割当隣接セル最大化法 (MSCN) を提案する。この手法は、同一チャンネルを割り当てられた隣接セルの数が最大化されるように割り当てる。SCN は、対象セルに割り当てるチャンネルの候補を、対象セルの隣接セルに既に割り当てられているかどうかで決定している。一方、MSCN では、対象セルの隣接セルに最も多く割り当てられているチャンネルを選択する。そうすることで、同じチャンネルを割り当てられているセルが、SCN に比べてさらに多く隣接するような割り当てが可能となる。

アルゴリズムの説明のため、異チャンネル隣接セル数 $b_{i,j}$ を定義する。これは、セル i にチャンネル j を割り当てたとき、セル i の隣接セルの内、 j 以外のチャンネルを割り当てられているセルの数である。全てのセルに対し、 $b_{i,j}$ が少なくなるようにチャンネルを割り当てることで、同一チャンネルを割り当てられた隣接セルの数が最大化される。

以下にアルゴリズムを示す。

1. N_c 個のセルに関して収容ユーザ数が多い順に以下の処理を行う。
2. 処理対象のセル i に関して、全てのチャンネル $j = 1, 2, \dots, N_{CH}$ について、 $b_{i,j}$ を求める。このとき、セル i の隣接セル k にチャンネルが割り当てられていないときは、 $b_{i,j}$ は無限大であるとみなす。
3. $b_{i,j}$ の値が小さい順に、チャンネルの番号を並び替える。 $b_{i,j} = b_{i,k}$ となるチャンネル j, k が存在する場合、収容ユーザ数が少ない方のチャンネルを前に配置する。
4. この並び替えたチャンネル番号のリストからチャンネル番号を順に調べ、セル i のユーザ数をそのチャンネルの収容済ユーザ数に加えた値が閾値 (総ユーザ数/総チャンネル数) を超えなければ、そのチャンネルをセル i に割り当てる。
5. 全てのチャンネルに関し、収容済ユーザ数とセル i のユーザ数の和が閾値を超える場合、あるいはセル i の全ての隣接セルがまだチャンネルを割り当てられていない場合、最も収容済ユーザ数が少ないチャンネルをセル i に割り当てる。

5. チャンネル割当手法の評価

提案手法によるチャンネル割り当ての効果を示すため、提案手法 (MSCN)、セル集約型負荷平準化法 (SCN)、貪欲法 (Greedy) に加え、単純に隣接セルに異なるチャンネルを割り当てる Naive 法の 4 手法に対し、ハンドオーバーの起

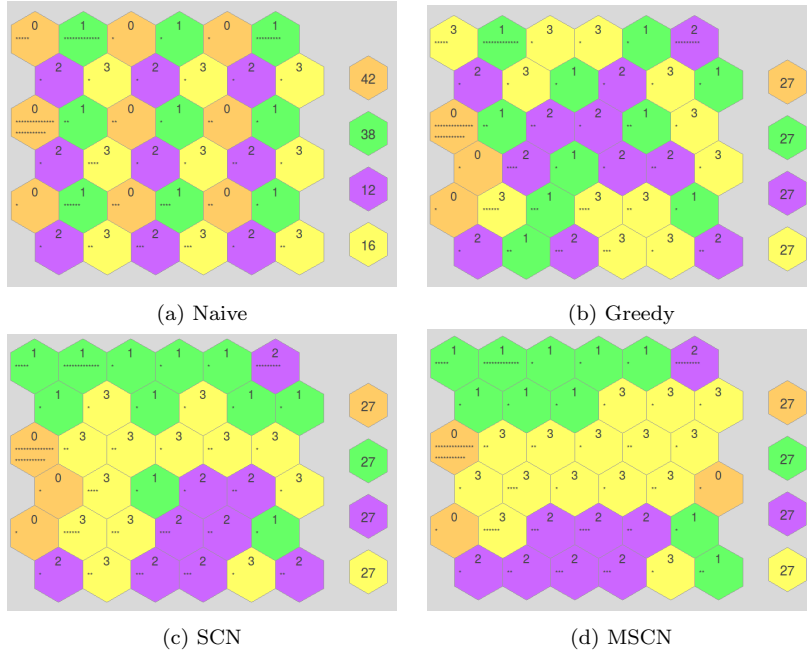


図 2 各手法の割当の 1 例

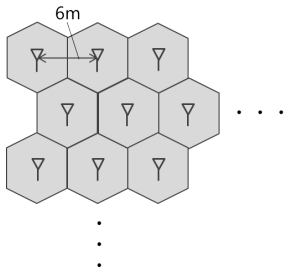


図 3 セルの配置図

こりやすさとスループットの公平性について、シミュレーションにより評価を行った。比較した 4 手法によるチャンネル割当の 1 例を図 2 に示す。

5.1 シミュレーションシナリオ

図 3 のように中心間の距離が 6m の正六角形セルを 16, 25, 36, 49 の 4 通りのパターンで配置し、アンテナを各セルの中心に 1 本ずつ設置した。アンテナ方向は下向きで、アンテナの高さは 10m とした。AP は 4 つ設置し、それぞれが別のチャンネルを用いる。セル数の 3 倍の数の端末を、各セルの収容端末数が Zipf 則 $f(k; s, N_c)$ に従うように割り当てた (式 1)。

$$f(k; s, N_c) = \frac{1/k^s}{\sum_{n=1}^{N_c} 1/n^s} \quad (1)$$

ここで、 N_c はセルの総数で、 k は端末数に関する降順の順位である。 s (≥ 0) は、Zipf 則における端末数のばらつき度合いを定めるパラメータであり、 s の値が大きいくほど端末配置のばらつきが大きいことを示す。

5.2 ハンドオーバーの起こりやすさ

ハンドオーバーの起こりやすさを定量的に評価するため、Likelihood of Handover (LoH) という指標を以下のように定義した (式 2)

$$h = \frac{\sum_{k=1}^{N_c} u_k b_k}{\sum_{k=1}^{N_c} u_k B_k} \quad (2)$$

ここで、 u_k はセル k に収容されている端末数で、 B_k はセル k の隣接セルの総数である。 b_k はセル k の隣接セルの内、セル k に割り当てられているチャンネルと異なるチャンネルが割り当てられている数を表している。LoH の値が大きいほど、ハンドオーバーが起こりやすいことを示している。式 1 の s の値を 0 から 1 まで 0.1 刻みで変化させ、各 s の値につき 10 通りの異なる端末配置を行い、 s の値ごとに LoH の値の平均を得た。

5.3 スループットの公平性

各端末配置に対して、対象システム全体のスループットの公平性を評価するため、Jain's Fairness Index を評価指標として用いる (式 3) [18]。

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3)$$

ここで、 x_i は各リンクのスループットを表している。この指標は、1 に近づくほどスループットの公平性が高いことを示す。各端末と AP の間で Iperf により上りと下りの両方で UDP パケットを送信した。その他の使用パラメータは表 1 の通りである。

表 1 シミュレーションパラメータ

シミュレーション時間	3s
パスロスモデル	Free Space
使用周波数帯	60GHz 帯
チャンネル帯域幅	2,160MHz
通信規格	IEEE802.ad
各アンテナの送信電力	21dBm
AP のアンテナパターン	半値幅 90 度, 最大利得 7dbi
STA のアンテナパターン	Isotropic
パケットサイズ	1,470Bytes

5.4 シミュレータ

スループットの公平性のシミュレーションには, Space-Time Engineering 社の Scenargie を使用した [16]. 今回使用した Scenargie には, RoF を用いた多アンテナシステムの評価のために, 村上によって修正が加えられている [4].

- IEEE802.11ad の標準機能として実装されているビームフォーミング機能を無効とする.
- 複数の地理的に異なる位置のアンテナが利用できる.
- AP の各ポートから出力される信号は, そのポートと接続しているアンテナ全てから同一の送信電力で出力される.
- AP は最初に受信した信号のみを受信電力として加算する.

5.5 シミュレーション結果

5.5.1 ハンドオーバーの起こりやすさ

ハンドオーバーの起こりやすさについての各手法の評価結果を図 4 に示す. Naive 法は隣接セルにすべて異なるチャンネルが割り当てられているため, LoH はいずれの場合でも 1 となっている. 貪欲法と比べると, SCN, 及び MSCN は, 両手法ともハンドオーバーの起こりやすさを低減できている. また, セル数が多くなるにつれて, SCN と比べ MSCN のハンドオーバーの起こりやすさを低減する効果は高くなることわかる. これは, 総セル数が多くなると同じチャンネルを割り当てられた隣接するセルの集合のサイズが大きくなるため, MSCN の同じチャンネルを割り当てられた隣接セル数を最大化する効果がより現れるようになるからと考えられる.

5.5.2 スループットの公平性

上りトラフィックを発生させた場合と, 下りトラフィックを発生させた場合の Jain's Fairness Index を, それぞれ図 5 と図 6 に示す. 両図を見ると, 貪欲法と SCN, 及び MSCN を用いた場合は, s に依存することなく公平性が高く保たれていることがわかる. これは, 端末数の偏りが大きくなっても, チャンネルごとの収容ユーザ数が平準化されるように割り当てられているからである. 一方, Naive 法を用いた場合, トラフィックを発生させた方向, 端末の

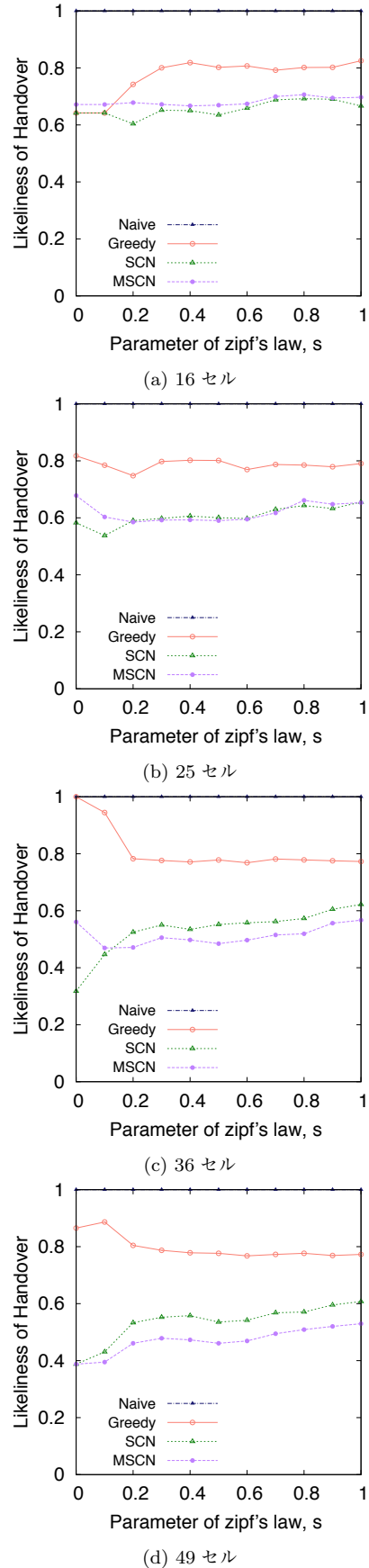
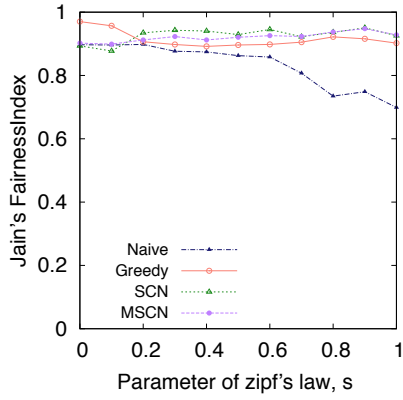
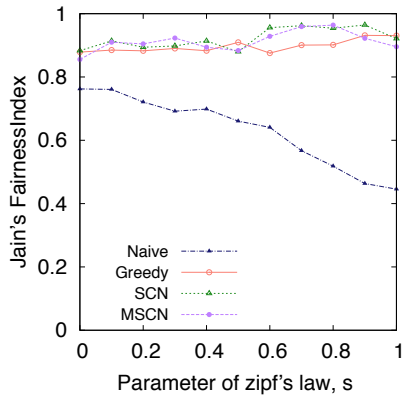


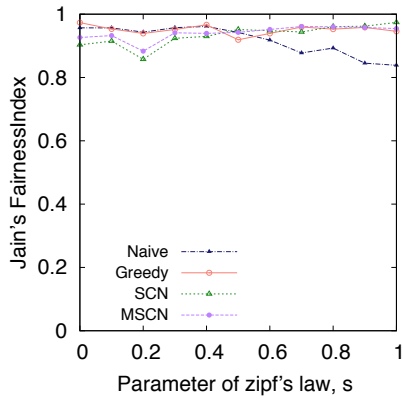
図 4 Likelihood of Handover



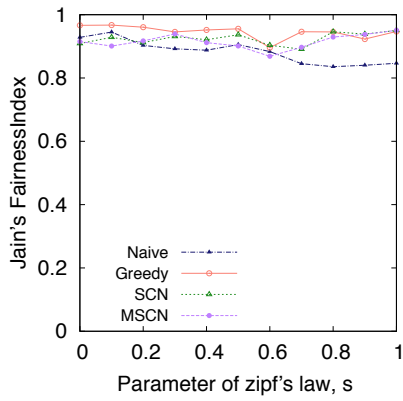
(a) 16 セル



(b) 25 セル

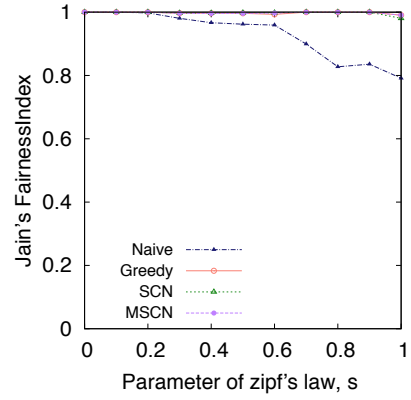


(c) 36 セル

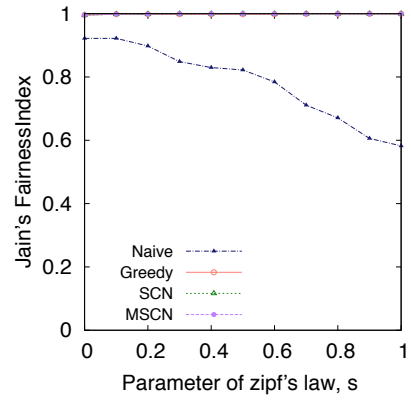


(d) 49 セル

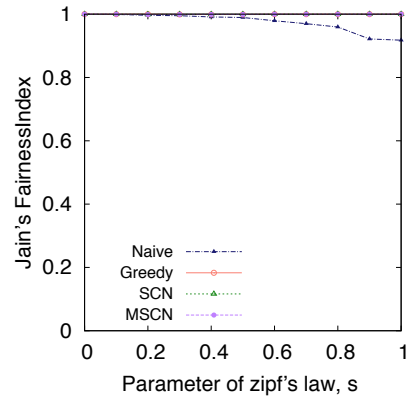
図 5 Jain's FairnessIndex (上り)



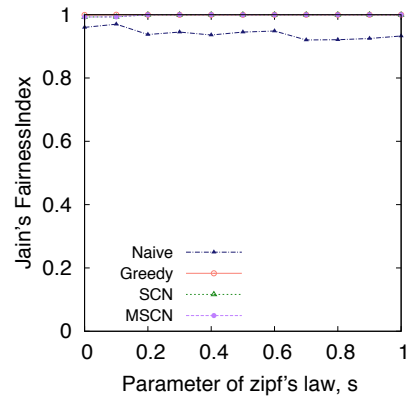
(a) 16 セル



(b) 25 セル



(c) 36 セル



(d) 49 セル

図 6 Jain's FairnessIndex (下り)

偏り具合 s に関わらず、他手法より公平性が低くなった。さらに、 s の値が大きくなるにつれて、その傾向は顕著に現れている。これは、 s の値が大きくなると各セルの収容ユーザー数の偏りが大きくなるため、静的にチャンネルを割り当てる Naive 法による割り当てだと、チャンネルごとの収容ユーザー数の偏りが大きくなるからと考えられる。

6. まとめ

本稿では、RoF を用いた多アンテナミリ波無線 LAN システムにおける AP 負荷の平準化とハンドオーバー頻度を低減するためのチャンネル割当アルゴリズムの改良手法 M である SNC 法を提案した。周波数の特性上伝送距離が短いミリ波を使用する無線 LAN では、十分に広いカバレッジを確保するために多数の AP が必要となり、その AP の設置コストが高くなるという課題がある。その課題を解決するため、Radio over Fiber (RoF) 技術を用いて、1 台の AP に対して複数のアンテナを RoF 技術を用いて接続し、動的に AP と各アンテナの接続関係を変更可能とするアーキテクチャを考案し、このアーキテクチャのためのチャンネル割当アルゴリズムを開発した。シミュレーションの結果、本稿で提案した MSCN 法は筆者らがこれまでに提案していた SCN 法に比べて、より高いハンドオーバー抑制の効果が確かめられた。また、MSCN 法は SCN 法と同程度に AP の負荷を平準化し、高いユーザスループットの公平性を達成できることがわかった。

本稿ではシステム内の全ユーザのトラフィック量は一定だと仮定したが、実環境では必ずしもそうなるとは限らない。今後は、チャンネルあたりのトラフィック量を平準化できるようにアルゴリズムを拡張することを検討している。また、今回用いた Scenargie シミュレータは、IEEE802.111ai で提案されている高速ハンドオーバーの処理を考慮したシミュレーションはそのままでは行えない。今後、ハンドオーバー処理を含めたシミュレーション機能を拡張し、ユーザの移動を含めてアルゴリズムの評価を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 A (課題番号: 24240009) の助成によるものである。また、本研究は、RAPID-5G 研究チームの協力の下で行われたものである。

参考文献

- [1] G. Athanasiou, P.C. Weeraddana, C. Fischione, and L. Tassiulas: Optimizing client association for load balancing and fairness in millimeter-wave wireless networks, *IEEE/ACM Trans. Netw.* vol.23, no.3, pp.836–850 (2015).
- [2] IEEE 802.11ad Working Group, IEEE 802.11ad, Amendment 3: Enhancements for Very high Throughput in the

- 60GHz Band (2012).
- [3] J. Guillory, S. Meyer, I. Siaud, A.M. Ulmer-Moll, B. Charbonnier, A. Pizzinat, and C. Algani: Radio-over-Fiber architectures, *Future Multigigabit Wireless Systems in the Home Area Network*, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, pp.30–38 (2010).
- [4] 村上航大, 他: Radio over Fiber を使用した多アンテナミリ波無線通信システムにおける動的チャンネル割当の効果, *信学技報*, No. 430, pp. 193–198 (2016).
- [5] A. Kanno, T. Kawanishi, H. Ogawa, N. Shibagaki and H. Hanyu: Multigigabit Relay Link Using Millimeter-wave Radio-Over-Fiber Technologies, *IEEE photonics Journal*, vol.5, no.6, p.7902909 (2013).
- [6] H. Murata and A. Stöhr: Radio Technologies for 5G using an Advanced photonic Infrastructure for Dense User Environments, *EU-Japan Symposium*, pp.16–17 (2014).
- [7] G. Kalfas, P. Maniotis, S. Markou, D. Tsiokos, N. Pleros, L. Alonso, and C. Verikoukis: Client-Weighted Medium-Transparent MAC Protocol for User-Centric Fairness in 60GHz Radio-Over-Fiber WLANs, *J. Opt. Commun. Netw.* vol.6, pp.33–44 (2014).
- [8] H. Gong, K. Nahm, J.W. Kim: Distributed Fair Access Point Selection for Multi-Rate IEEE 802.11 WLANs, in *Proc. CCNC 2008*, pp.528–532 (2008).
- [9] N. Papaoulakis, C.Z. Patrikakis: A Proactive, Terminal Based Best Access Point Selection Mechanism for Wireless LANs, in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, pp.1–4 (2008).
- [10] Anand Prabhu Subramanian, Himanshu Gupta, Samir R. Das, Jing Cao: Minimum Interference Channel Assignment in Multiradio Wireless Mesh Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.7, pp. 1459–1473 (2008).
- [11] Habiba Skalli, Samik Ghosh, Sajal K. Das, Luciano Lenzi: Channel Assignment Strategies for Multiradio Wireless Mesh Networks: Issues and Solutions, *IEEE Communications Magazine*, vol.45, pp. 86–95 (2007).
- [12] P. Bahl and V. N. Padmanabhan, RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system, in *Proc. IEEE Infocom 2000*, pp.775–784 (2000).
- [13] M.Youssef and A.K. Agrawala: The Horus WLAN location determination system, in *Proc. ACM MobiSys 2005*, pp. 205–218 (2005).
- [14] K. Chintalapudi, A.P. Iyer, and V.N. Padmanabhan: Indoor localization without the pain, in *Proc. ACM Mobi-com 2010*, pp.173–184 (2010).
- [15] J. Xiong and K. Jameison, ArrayTrack: A fine-grained indoor location system, in *Proc. USENIX NSDI*, pp.71–84 (2013).
- [16] Space Time Engineering: <https://www.spacetime-eng.com>.
- [17] R. E. Korf: Multi-way number partitioning, in *Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pp.538–543 (2009).
- [18] R. Jain, D.Chiu, and W. Hawe, A Quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems, *Technical Report TR-301*, DEC Research (1984).