

上下分離可能型異種無線ネットワークにおける 基地局選択手法に関する考察

上熊須 匠¹ 小林 真^{1,2} 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要: 基地局と端末の送信電力の違いを利用して、無線通信のアップリンクとダウンリンクを異なる基地局に接続することで無線ネットワーク全体の帯域利用効率を向上することができる。このようなアップリンクとダウンリンクを異なる基地局に接続する方式は上下分離方式 (DUDe: Downlink/Uplink Decoupling) と呼ばれている。先行研究において、1つの周波数帯において DUDe を行うことで DUDe を用いない場合と比較してアップリンクで約 1.5 倍、ダウンリンクに関しては性能向上しないという結果が得られている。本稿では、DUDe においてアップリンクとダウンリンクで異なる周波数チャンネルで接続することで、さらに帯域利用効率を向上できることを示す。具体的には、複数周波数チャンネルに対応した DUDe における基地局選択手法として、「SINR-Based Decoupling with Re-Association (SBD-RA)」と「SINR-Based Decoupling with First Come First Association (SBD-FCFA)」の 2 つを提案する。シミュレーションを用いて評価を行った結果として、DUDe を行わない場合と比べてダウンリンクが最大で約 1.4 倍、アップリンクが最大で約 2.0 倍の帯域利用効率を得られることを示す。

1 はじめに

スマートフォン、タブレット、IoT デバイスなどの普及に伴って無線通信容量に対する要求が高まり続けている。増大する無線通信容量に対応するために、5G の名の下に様々な取り組みがなされている [1]。本稿では、5G に向けた取り組みの中でも上下分離方式 (DUDe: Downlink Uplink Decoupling) に着目する。

DUDe とは、複数種類の基地局が存在するネットワークにおいて、ダウンリンクの送信元基地局とアップリンクの送信先基地局をそれぞれ独立に選択することでスループットを向上させる方式である [2,3]。図 1、図 2 に DUDe の基本的なアイデアを示す。図 1、図 2 では、マクロセル基地局と端末との間の距離よりもスモールセル基地局と端末との間の距離の方が近いと仮定している。

図 1 は通常の接続方式である。通常の通信では、端末で受信したダウンリンクの RSSI (受信信号強度) が高い方の基地局にアップリンクとダウンリンクの両方とも接続するのが一般的である。同じ周波数チャンネルにおいて、マクロセル基地局は強い電波で、スモールセル基地局と端末は弱い電波でデータを送信するものとする。図 1 では、マクロセル基地局からの信号の方が端末での RSSI



図 1 ダウンリンクとアップリンクを共にマクロセル基地局に接続 (case1)

は強かったため、アップリンクダウンリンク両方ともマクロセル基地局に接続している。

それに対して、DUDe では、受信側の RSSI が高い方にそれぞれ接続することで、スループットを向上することができる。図 2 に DUDe での接続方法の例を示す。前述したとおり、マクロセル基地局は強い電力でデータ送信できるため、図 2 では端末に届く電波はスモールセル基地局よりも大きい。この場合、ダウンリンクはマクロセル基地局に接続する。一方で、図 2 ではマクロセル基地局とスモールセル基地局では端末からの距離はスモールセル基地局の方が近いので、端末からの電波における基地局での受信電力もスモールセル基地局の方が大きい。この場合、アップリンクはスモールセル基地局に接続する。

これまでの DUDe に関する研究では、アップリンクと

¹ 大阪大学

² 日本学術振興会特別研究員 (DC)



図 2 ダウンリンクをマクロセル基地局に、アップリンクをスモールセル基地局に接続 (case2)



図 3 ダウンリンクとアップリンクを共にマクロセル基地局に接続 (case1)



図 4 ダウンリンクをマクロセル基地局に、アップリンクをスモールセル基地局に接続 (case2)



図 5 ダウンリンクをスモールセル基地局に、アップリンクをマクロセル基地局に接続 (case3)



図 6 case4 ダウンリンクとアップリンクを共にスモールセル基地局に接続 (case4)

ダウンリンクは同じ周波数チャネルであることを前提としてきた。それに対して本稿では、アップリンクとダウンリンクが異なる周波数チャネルである場合を考える。半導体技術の進歩による無線モジュールの小型化により、2017年4月の段階でも、現在のスマートフォンはWiMAX、無線LAN、Bluetooth、NFCなど複数のインタフェースを具備している。また、テザリングを利用する場合には複数の異なる無線インタフェースを同時に利用することも現在の技術で既の実現している。すなわち、アップリンクとダウンリンクが異なる周波数チャネルで接続することは技術的には可能であるため、周波数利用効率を向上できることを示せば、将来的には異なる周波数チャネルでのDUEが登場することも考えられる。

このような観点から、本稿では、複数周波数チャネルを用いたDUEにおける基地局選択手法「SINR-Based Decoupling with Re-Association (SBD-RA)」と「SINR-Based Decoupling with First Come First Association (SBD-FCFA)」を提案する。SBD-RAは、既存のSINRを基地局を選択するための指標として用いて、各端末がアップリンクをマクロセル基地局かスモールセル基地局のどちらの種類に接続するかを網羅的に算出する手法である。網羅的な計算に必要な計算量を減らす仕組みを導入している。SBD-FCFAは、一度基地局に接続されたユーザ端末の接続先基地局を変更せずにSBD-RAよりもさらに計算量を削減する基地局選択方式である。シミュレーションを用いて評価を行った結果、SBD-FCFA、SBD-RAは共に既存手法よりもスループットが向上することが確認できた。また、SBD-RAは、SBD-FCFAと比較して計算量が大きいものの、高いスループットを達成することも確認できた。

本稿の構成は以下の通りである。2節では、異種無線ネットワークにおけるDUEのシステムモデルを述べる。3節では、提案手法SBD-FCFAを述べる。4節では、提案手法SBD-RAを述べる。5節では、提案手法の有効性を確認するために、シミュレーションによる性能評価の結果を示し考察を述べる。6節では、関連研究について述べる。最後に、7節で結論を述べる。

2 システムモデル

本稿では、アップリンクとダウンリンクが異なる周波数チャネルを用いるDUEを想定する。また、マクロセル基地局の送信電力はスモールセル基地局の送信電力よりも大きいとする。

2.1 基地局接続方式

図3～図6に本稿で想定するマクロセルとスモールセルの複数周波数チャネルを用いたDUEの接続例を示す。緑矢印はマクロセル周波数チャネル、青矢印はスモールセル周波数チャネルでの通信を表している。複数周波数チャネルを用いたDUEでは、以下の4通りの基地局の接続方式が考えられる。

- case1: マクロセル基地局にアップリンクとダウンリンクを接続 (図3)
- case2: マクロセル基地局にダウンリンク、スモール

表 1 マクロセル基地局とスモールセル基地局が同じ
周波数チャネルを使用する DUDe における干渉 [4-9]

			受信側			
			マクロセル		スモールセル	
			BS	UE	BS	UE
送信側	マクロセル	BS	×	✓	×	✓
		UE	✓	×	✓	×
	スモールセル	BS	×	✓	×	✓
		UE	✓	×	✓	×

表 2 マクロセル基地局とスモールセル基地局が異なる
周波数チャネルを使用する DUDe における干渉

			受信側			
			マクロセル		スモールセル	
			BS	UE	BS	UE
送信側	マクロセル	BS	×	✓	×	×
		UE	✓	×	×	×
	スモールセル	BS	×	×	×	✓
		UE	×	×	✓	×

セル基地局にダウンリンクを接続 (図 4)

- case3: マクロセル基地局にアップリンク, スモールセル基地局にダウンリンクを接続 (図 5)
- case4: スモールセル基地局にアップリンクとダウンリンクを接続 (図 6)

2.2 先行研究との干渉モデルの違い

本稿で扱う複数周波数チャネルを用いた DUDe では, 既存のマクロセル基地局とスモールセル基地局が同じ周波数チャネルで通信することを前提としている既存の研究 [4-9] とは干渉モデルが異なる. 文献 [4-9] では, DUDe におけるアップリンクとダウンリンクにおいて周波数チャネルが同じである前提で基地局選択問題を扱っている. 表 1 に文献 [4-9] で想定している基地局と端末の干渉を示す. 表 1 では, BS が基地局, UE がユーザ端末, 干渉を起こす場合が ✓, 干渉を起こさない場合が × である. 文献 [4-9] では, 基地局同士, ユーザ端末同士は基地局によるスケジューリングで時分割に送信されるため, 干渉を起こさないことを想定している. 例えば, 文献 [4] では, DUDe におけるアップリンクとダウンリンクにおいて周波数チャネルが同じだという前提でシステムモデルを定義して, DUDe を用いることでシステム全体のスループットが向上することを示している.

それに対して本稿で扱う複数周波数チャネルを用いた DUDe では, マクロセル基地局とスモールセル基地局が互いに干渉しない干渉モデルを想定する. 表 2 に本稿で想定している干渉モデルを示す. 表 2 から分かるように, 本稿の干渉モデルではマクロセル基地局とスモールセル基地局は互いに干渉しない.

ただし, 本稿で扱う干渉モデルでは, スモールセル基

地局におけるアップリンクとダウンリンクが干渉しない理想的なモデルを使用していることに注意されたい. 例えばスモールセルとして無線 LAN を想定した場合, 一般的にはアップリンクとダウンリンクは相互に干渉する. しかしながら, 無線 LAN の周波数チャネルを用いたとしても, Licensed-Assisted Access (LAA) などの技術を用いることでアップリンクとダウンリンクの干渉が発生しないように制御することは技術的には可能である. また, マクロセル基地局とスモールセル基地局が同一周波数チャネルで DUDe を行うことを想定している先行研究との比較の簡便さも考慮している.

2.3 干渉モデル

本稿では, 文献 [4] で定義されている SINR モデルを基準として, 複数周波数チャネルを用いた DUDe の SINR モデルを定義した. Φ_M, Φ_W, Φ_d をそれぞれマクロセル基地局の位置を表す点の集合, スモールセル基地局の位置を表す点の集合, 端末の位置を表す点の集合とする. マクロセル基地局, スモールセル基地局と端末はそれぞれランダムに配置される. $x_{M_j} (\in \Phi_M), x_{W_l} (\in \Phi_W), x_{d_m} (\in \Phi_d)$ はそれぞれ j 番目のマクロセル基地局 (M_j) の位置, l 番目のスモールセル基地局 (W_l) の位置, m 番目の端末 (d_m) の位置を表す. j, l, m は無数に存在する基地局または端末に対して便宜上割り当てる自然数である. ただし, $x_{M_j}, x_{W_l}, x_{d_m}$ は, $x_{M_j}, x_{W_l}, x_{d_m} \in \mathbb{R}^2$ を満たす二次元の座標である. P_M, P_W, P_d をそれぞれマクロセル基地局の送信電力, スモールセル基地局の送信電力, 端末の送信電力と定義する.

m 番目の端末 (d_m) に着目して, 基地局からのダウンリンクの受信電力および SINR を考える. 端末 (d_m) における j 番目のマクロセル基地局 (M_j) からのダウンリンクの受信電力 ($S_{M_j d_m}^D$) は $S_{M_j d_m}^D = P_M h_{M_j d_m} \|x_{M_j} - x_{d_m}\|^{-\alpha}$, l 番目のスモールセル基地局 (W_l) からのダウンリンクの受信電力 ($S_{W_l d_m}^D$) は $S_{W_l d_m}^D = P_W h_{W_l d_m} \|x_{W_l} - x_{d_m}\|^{-\alpha}$ となる. ただし, $h_{M_j d_m}, h_{W_l d_m}$ はそれぞれマクロセル基地局 (M_j) から端末 (d_m) への電波伝搬で生じるレイリーフェージングを表す平均 1 の独立指数分布, スモールセル基地局 (W_l) から端末 (d_m) への電波伝搬で生じるレイリーフェージングを表す平均 1 の独立指数分布である. $\|x_{M_j} - x_{d_m}\|, \|x_{W_l} - x_{d_m}\|$ はそれぞれマクロセル基地局 (M_j) と端末 (d_m) の距離, スモールセル基地局 (W_l) と端末の距離である, α はパスロス係数 ($\alpha > 2$) である.

複数周波数チャネルを用いた DUDe において, m 番目の端末 (d_m) が \hat{j} 番目のマクロセル基地局 ($M_{\hat{j}}$) にダウンリンクで接続した場合の, 端末における SINR は,

$$\text{SINR}_{M_j d_m}^D = \frac{S_{M_j d_m}^D}{\sum_{x_{M_j} \in \Phi_M \setminus \{x_{M_j}\}} S_{M_j d_m}^D + \sigma^2}$$

となる。また、複数周波数チャネルを用いた DUDe で、 m 番目の端末 (d_m) が \hat{l} 番目のスモールセル基地局 ($W_{\hat{l}}$) にダウンリンクで接続した場合の、端末における SINR は、

$$\text{SINR}_{W_{\hat{l}} d_m}^D = \frac{S_{W_{\hat{l}} d_m}^D}{\sum_{x_{W_{\hat{l}}} \in \Phi_W \setminus \{x_{W_{\hat{l}}}\}} S_{W_{\hat{l}} d_m}^D + \sigma^2}$$

となる。ただし、 σ^2 は雑音の大きさである。

複数周波数チャネルを用いた DUDe のアップリンクの通信における干渉は、各端末がマクロセル基地局に接続しているかスモールセル基地局に接続しているかに依存する。具体的には、マクロセル基地局にアップリンク接続した端末は、スモールセル基地局に接続している端末の通信による干渉の影響を受けない。マクロセル基地局およびスモールセル基地局に接続している端末を分離して取り扱う必要がある。そこで、マクロセル基地局にアップリンクを接続している端末位置の集合を $\tilde{\Phi}_{Md}$ ($\in \Phi_d$)、スモールセル基地局にアップリンクを接続している端末位置の集合を $\tilde{\Phi}_{Wd}$ ($\in \Phi_d$) と定義する。ただし、 $\tilde{\Phi}_{Md} \cap \tilde{\Phi}_{Wd} = \phi$ を満たす。

ダウンリンクと同様に、 j 番目のマクロセル基地局 (M_j) における、 m 番目の端末 (d_m) からのアップリンク受信電力 ($S_{d_m M_j}^U$) は $S_{d_m M_j}^U = P_d h_{d_m M_j} \|x_{d_m} - x_{M_j}\|^{-\alpha}$ となる。ただし、 $h_{d_m M_j}$ は端末 (d_m) とマクロセル基地局 (M_j) 間の電波伝搬で生じるレイリーフェージングを表す平均 1 の独立指数分布、 $\|x_{d_m} - x_{M_j}\|$ は端末と基地局 (M_j) の距離である。 \hat{m} 番目の端末 ($d_{\hat{m}}$) が j 番目のマクロセル基地局 (M_j) にアップリンクで接続した時の基地局における SINR は、

$$\text{SINR}_{d_{\hat{m}} M_j}^U = \frac{S_{d_{\hat{m}} M_j}^U}{\sum_{x_{d_m} \in \tilde{\Phi}_{Md} \setminus \{x_{d_{\hat{m}}}\}} S_{d_m M_j}^U + \sigma^2}$$

となる。また、 \hat{m} 番目の端末 ($d_{\hat{m}}$) が l 番目のスモールセル基地局 (W_l) にアップリンクで接続した時の基地局における SINR は、

$$\text{SINR}_{d_{\hat{m}} W_l}^U = \frac{S_{d_{\hat{m}} W_l}^U}{\sum_{x_{d_m} \in \tilde{\Phi}_{Wd} \setminus \{x_{d_{\hat{m}}}\}} S_{d_m M_j}^U + \sigma^2}$$

となる。

3 提案手法: SBD-RA

2 節に示したシステムモデルにおいてユーザ端末とユーザ端末が接続する基地局では、端末数を m 、マクロセル基地局数を j 、スモールセル基地局数を l とすると、計算量は $O((j+l)^m)$ となる。すなわち、 $(j+l)^m$ 通りの組

Algorithm 1 SBD-RA 接続先基地局選択手法

```

1: for all  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md} + \tilde{\Phi}_{Wd}$  do
2:   for all  $B \in \Phi_M + \Phi_W$  do
3:      $\text{Th}_{Bd_o}^D \leftarrow \text{calcDownlinkThroughput}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ 
4:   end for
5:    $B_{d_o}^D \leftarrow \arg \max_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{Th}_{Bd_o}^D$ 
6:    $d_o$  connect to the station ( $B_{d_o}^D$ ) in the downlink
7: end for
8: for all  $R_o$  do
9:   decideUEway( $R_o$ )
10:  for all  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md} + \tilde{\Phi}_{Wd}$  do
11:    if  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md}$  then
12:      for all  $B \in \Phi_M$  do
13:         $\text{Th}_{d_o B}^U \leftarrow \text{calcUplinkThroughput}(B, d_o, \tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd})$ 
14:      end for
15:    end if
16:    if  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Wd}$  then
17:      for all  $B \in \Phi_W$  do
18:         $\text{Th}_{d_o B}^U \leftarrow \text{calcUplinkThroughput}(B, d_o, \tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd})$ 
19:      end for
20:    end if
21:  end for
22:  if ( $\sum_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{Th}_{d_o B}^U > \text{Th}_{MAX}$ ) then
23:     $\text{Th}_{MAX} \leftarrow \sum_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{Th}_{d_o B}^U$ 
24:     $R_b \leftarrow R_o$ 
25:  end if
26: end for
27: decideUEway( $R_b$ )
28: for all  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md} + \tilde{\Phi}_{Wd}$  do
29:    $B_{d_o}^U \leftarrow \arg \max_{B \in \Phi_W} \text{Th}_{d_o B}^U$ 
30:    $d_o$  connect to the station ( $B_{d_o}^U$ ) in the uplink
31: end for

```

み合わせを試せば総スループットが最大となるユーザ端末の接続先を全て決定することができる。しかしながら、ユーザ端末と基地局の組み合わせは端末数の増加に従って指数関数的に増大するため、膨大な数の端末が存在する実環境でユーザ端末と基地局の組み合わせを $(j+l)^m$ 通り試行するのは現実的ではない。

組み合わせ時の計算量を削減することを目的として、各端末のアップリンクをマクロセル基地局に接続するかスモールセル基地局に接続するかを先に決定できることを利用した基地局選択方式 SBD-RA を提案する。SBD-RA では、アップリンクにおける各ユーザ端末が各基地局に接続する組み合わせ数は端末数を m 、マクロセル基地局数を j 、スモールセル基地局数を l とすると、計算量は $O(m(j+l)2^m)$ となる。

Algorithm 1 に SBD-RA の接続先基地局選択手法を示す。変数 B は任意の基地局、変数 d_o は任意のユーザ端末、変数 B^D, B^U はそれぞれユーザ端末 d がダウンリンク接続先とアップリンク接続先に選択した基地局、変数 R_o は全てのユーザ端末のアップリンク接続先基地局がマクロセル基地局かスモールセル基地局のどちらで

あるかを格納した配列, 変数 R_b は全てのユーザ端末のアップリンク接続先基地局がマクロセル基地局かスモールセル基地局のどちらであるかを格納した配列の中で最もスループットが高い配列, 集合 Φ_M, Φ_W はそれぞれ 2.3 節で定義したマクロセル基地局とスモールセル基地局の位置の集合, 集合 $\tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd}$ はそれぞれ 2.3 節で定義したマクロセル基地局に接続している端末の集合とスモールセル基地局に接続している端末の集合である. $\text{calcDownlinkThroughput}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ は基地局 (B) から端末 (d_o) へのダウンリンクのスループットを算出する関数, $\text{calcUplinkThroughput}(B, d_o, \tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd})$ は端末 (d_o) から基地局 (B) へのアップリンクのスループットを算出する関数, $\text{decideUEWay}(R_o)$ は全てのユーザ端末を R_o に従ってマクロセル基地局かスモールセル基地局のどちらに接続するかを決定する関数である.

Algorithm 1 では, まず, 各々の端末と全ての基地局とのダウンリンクにおけるスループットを算出する. **Algorithm 1** の 1-4 行目で, 各々のユーザ端末は全ての基地局との間のダウンリンクにおけるスループットを算出する. **Algorithm 1** の 5, 6 行目で, ユーザ端末を最も高いダウンリンク SINR を達成する基地局に対してダウンリンクで接続する. 次に, 各ユーザ端末をアップリンクをマクロセル基地局に接続するのか, スモールセル基地局に接続するのかを総当たりで検証する. このマクロセル基地局とスモールセル基地局のどちらに接続すれば良いかを先に決定するのが SBD-RA の工夫点である. **Algorithm 1** の 9 行目で各ユーザ端末のアップリンク接続先がマクロセル基地局なのか, スモールセル基地局なのかを決定している. その後, 各ユーザ端末はマクロセル基地局あるいはスモールセル基地局の中で, 最大となるスループットを求める. マクロセル基地局に接続するユーザ端末は **Algorithm 1** の 11-15 行目で, スモールセル基地局に接続するユーザ端末は **Algorithm 1** の 16-20 行目で最大となるアップリンクスループットを求めている. 最後に, **Algorithm 1** の 27-31 行目で全てのユーザ端末におけるアップリンクスループットの総和が最大となる組み合わせでアップリンクを接続する.

4 SBD-FCFA

3 節に示した SBD-RA では, 全てを総当たりする場合に比べて計算量を削減しているものの, 依然として計算量が $\mathcal{O}((j+l)^m)$ と大きい. 実際のネットワークでは端末の追加や離脱が繰り返されるため, 計算量の大きさがネットワークの規模によっては問題となる場合があると考えられる.

異種無線ネットワーク下の DUDe では, 端末のアップリンクの SINR は他の端末の接続先基地局の種類に依存

する. 異種無線ネットワークで RSSI Base を用いると, 干渉が増加してアップリンクのスループットが低下する. 具体的には, 異種無線ネットワークではスモールセル基地局数がマクロセル基地局数よりも多い時に RSSI Base を用いると, 基地局数が多いスモールセルにアップリンクを接続する端末が, マクロセルに接続する端末よりも多くなる. スモールセルにアップリンクを接続する端末が多い時, スモールセル基地局における干渉が大きくなるため, スモールセル基地局に接続した端末のスループットが低下する. スループットを向上するためには, 全ての端末についてアップリンク接続先基地局を SINR に基づいて選択する必要がある.

しかしながら, 全ての端末についてアップリンク接続先基地局を総当たりで決定することは現実的ではない. 総当たりする場合, 端末数を m , マクロセル基地局数を j , スモールセル基地局数を l とすると $(j+l)^m$ 通りの組み合わせが存在する. 端末数の増加に従って計算量が指数関数的に増大する. 大量の無線端末が存在して時々刻々と変動する無線ネットワークでは, 少ない計算量で SINR に基づいて基地局選択を行う必要がある.

4.1 提案手法

想定する無線ネットワークにおいて, 一度基地局に接続されたユーザ端末の接続先基地局を変更しないことで計算量の削減を行う基地局選択方式 SBD-FCFA を提案する. 具体的には, 各ユーザ端末が接続する際に, 既に基地局に接続されているユーザ端末の干渉のみを考慮した SINR に基づいてダウンリンク接続先基地局とアップリンク接続先基地局をそれぞれ選択する. また, 一度接続された基地局を変更しないことにより計算量の削減を行う.

Algorithm 2 に SBD-FCFA の接続先基地局選択手法を示す. 変数 B は任意の基地局, 変数 d_o は新たに接続した端末, 変数 B^D, B^U はそれぞれダウンリンク接続先とアップリンク接続先に選択された基地局, 集合 Φ_M, Φ_W はそれぞれ 2.3 節で定義したマクロセル基地局とスモールセル基地局の位置の集合, 集合 $\tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd}$ はそれぞれ 2.3 節で定義したマクロセル基地局に接続している端末の集合とスモールセル基地局に接続している端末の集合, 関数 $\text{calcDownlinkSINR}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ は基地局 (B) から端末 (d_o) へのダウンリンクの SINR を算出する関数, 関数 $\text{calcUplinkSINR}(B, d_o, \tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd})$ は端末 (d_o) から基地局 (B) へのアップリンクの SINR を算出する関数である.

まず, 端末は全ての基地局とのダウンリンクとアップリンクの SINR を算出する. 具体的には, **Algorithm 2** の 1-4 行目で, 全ての基地局との間の SINR を算出す

Algorithm 2 SBD-FCFA 接続先基地局選択手法

```

1: for all  $B \in \Phi_M + \Phi_W$  do
2:    $\text{SINR}_{B,d_o}^D \leftarrow \text{calcDownlinkSINR}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ 
3:    $\text{SINR}_{d_o,B}^U \leftarrow \text{calcUplinkSINR}(B, d_o, \Phi_{M_d}, \Phi_{W_d})$ 
4: end for
5:  $B^D \leftarrow \arg \max_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{SINR}_{B,d_o}^D$ 
6: connect to the station ( $B^D$ ) in the downlink
7:  $B^U \leftarrow \arg \max_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{SINR}_{d_o,B}^U$ 
8: connect to the station ( $B^U$ ) in the uplink
    
```

表 3 シミュレーション条件

P_M	46 [dBm]
P_W	20 [dBm]
P_d	20 [dBm]
σ^2	-90 [dBm]
α	4
トラフィックモデル	フルバッファ
試行回数	1000 回

る。アップリンクの SINR を算出する際、既に接続している他の端末がマクロセル基地局とスモールセル基地局のいずれの基地局に接続しているかを考慮する。続いて、Algorithm 2 の 5, 6 行目で、端末は最も高いダウンリンク SINR を達成する基地局に対してダウンリンクの接続を行う。最後に、Algorithm 2 の 7, 8 行目で、端末は最も高いアップリンク SINR を達成する基地局に対してアップリンクの接続を行う。

SBD-FCFA では、端末数を m 、基地局数を $j+l$ とすると $m(j+l)$ 通りの組み合わせが存在する。これは SBD-RA の $m(j+l)2^m$ 通りよりも少なく、計算量は減少しているといえる。また、端末数が増加しても計算量が指数関数的に増大することがないので、大規模なネットワークにも適用することが可能だと考えられる。

5 評価

本章では提案手法の有効性を示すために、計算機シミュレーションを利用した性能評価について述べる。具体的には、小規模なネットワークと大規模なネットワークの 2 種類で、各ユーザ端末当たりの平均スループットを評価して、SBD-RA と SBD-FCFA の有効性を明らかにする。

5.1 評価環境

提案手法を計算機シミュレーションによってアップリンクとダウンリンクのスループットを評価した。マクロセル基地局の送信電力 (P_M) を 46 [dBm]、スモールセル基地局の送信電力 (P_W) を 20 [dBm]、端末の送信電力 (P_d) を 20 [dBm]、雑音 σ^2 を -90 [dBm]、パスロス係数 α を 4 とした。トラフィックモデルはフルバッファとした。スループットは端末と基地局間のシャノン容量の総和を

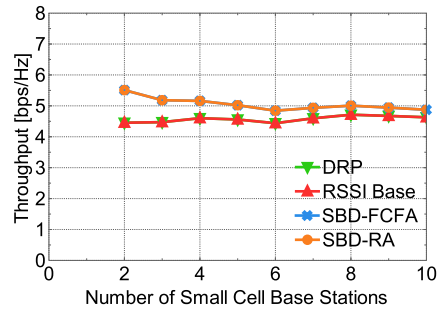


図 7 ダウンリンク平均スループット(小規模ネットワーク)

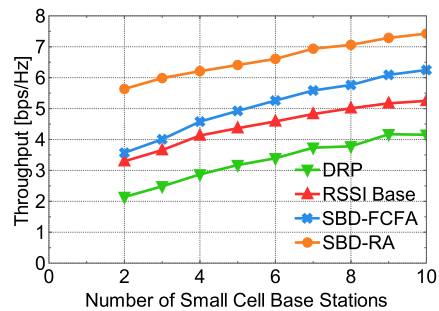


図 8 アップリンク平均スループット(小規模ネットワーク)

求め、シャノン容量の総和を端末数で割ったものとする。1000 回シミュレーションを行って、その平均をスループットとして用いた。

比較対象として DRP, RSSI Base を用いた。DRP は、2.3 節で述べた、ダウンリンクの受信電力に基づいてアップリンクとダウンリンクを同一の基地局に接続する手法である。RSSI Base は文献 [3] の手法で、受信電力に基づいてアップリンク、ダウンリンクの接続先基地局を独立に接続する手法である。提案手法である SBD-FCFA と SBD-RA を加えた 4 手法で比較する。

5.2 小規模なネットワークでの評価

1×1 [km²] の範囲に基地局と端末をランダムに配置して、マクロセル基地局 2 台、端末 5 台、スモールセル基地局数を 2 から 10 に変更して平均スループットを評価した。図 7 に、ダウンリンクのスループットを示す。図 7 から 2 つのことがわかる。1 つ目に、SBD-FCFA, SBD-RA は DRP や RSSI Base と比較して、最大 1.2 [bps/Hz] ダウンリンクのスループットが向上した。これは、SBD-FCFA によってユーザ端末が他のユーザ端末の干渉が少ない基地局を選択したからである。2 つ目に、SBD-FCFA は SBD-RA と同じダウンリンクのスループットを達成した。これは、ダウンリンクでは端末の接続先基地局が変化しても干渉は変化しないからである。

図 8 に、アップリンクのスループットを示す。図 8 から 2 つのことがわかる。1 つ目に、SBD-FCFA は DRP と比較して最大 2.2 [bps/Hz], RSSI Base と比較して最

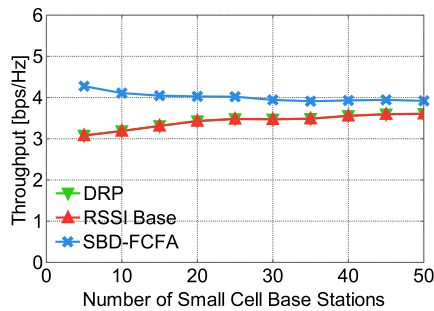


図 9 ダウンリンク平均スループット(大規模ネットワーク)

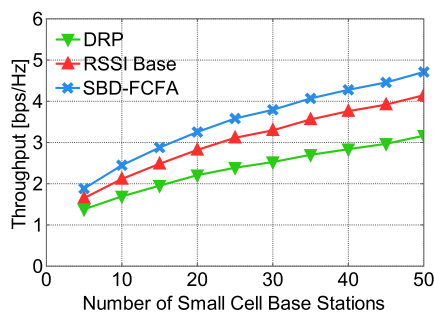


図 10 アップリンク平均スループット(大規模ネットワーク)

大 1.1 [bps/Hz] アップリンクのスループットが向上した。これは、SBD-FCFA によってユーザ端末が他のユーザ端末からの干渉が少ない基地局を選択したからである。2 つ目に、SBD-FCFA は SBD-RA と比較して最大 2.2 [bps/Hz] アップリンクのスループットが低くなった。これは、新たなユーザ端末が接続する時に、SBD-FCFA では既に接続されているユーザ端末の接続先を変更しないことにより、新しく加わるユーザ端末の干渉について考慮されていない。そのため、先に接続したユーザ端末が SINR が最大となる基地局に接続できなかったのが原因と考えられる。

5.3 大規模なネットワークでの評価

2 × 2 [km²] の範囲に基地局と端末をランダムに配置して、マクロセル基地局 10 台、端末 25 台、スモールセル基地局数を 5 から 50 に変更して平均スループットを評価した。SBD-RA の計算が困難であるため、DRP, RSSI Base, SBD-FCFA を比較した。

図 9 に、ダウンリンクのスループットを示す。図 9 から、SBD-FCFA は DRP や RSSI Base と比較して、最大 1 [bps/Hz] ダウンリンクのスループットが向上したことがわかる。これは、SBD-FCFA によってユーザ端末が他のユーザ端末からの干渉が少ない基地局を選択したからである。

図 10 に、アップリンクのスループットを示す。図 10 から、SBD-FCFA は DRP と比較して最大 1.6 [bps/Hz], RSSI Base と比較して最大 0.7 [bps/Hz] アップリンクの

スループットが向上したことがわかる。これは、SBD-FCFA によってユーザ端末が他のユーザ端末からの干渉が少ない基地局を選択したからである。

図 9 に、ダウンリンクのスループットを、図 10 に、アップリンクのスループットを示す。図 9 から、SBD-FCFA はダウンリンクで DRP, RSSI Base と比較して、最大 1 [bps/Hz] スループットが向上したことがわかる。これは端末数が増加しても、SBD-FCFA によってユーザ端末が干渉の少ない基地局に接続できるからである。図 10 から、SBD-FCFA はアップリンクで、DRP と比較して最大 1.6 [bps/Hz], RSSI Base と比較して最大 0.7 [bps/Hz] スループットが向上したことがわかる。これは端末数が増加しても、SBD-FCFA によってユーザ端末が干渉の少ない基地局に接続できるからである。

6 関連研究

DUDe における先行研究は、干渉モデルの違い、評価指標、周波数選択方式の 3 つの観点から分類することができる。最も多く検討されている干渉モデルは、2 節でも述べたとおり、マクロセル基地局とスモールセル基地局が同じ周波数チャンネルを用いて、アップリンクとダウンリンクは時分割で通信するので干渉を行わないという表 1 に示したモデルである [4–9]。これらの研究では、様々な評価指標の観点から、基地局の選択方式が検討されている。例えば、文献 [5] では、一定以上のスループットを達成できない場合を呼損をして、通信成功率を評価指標としている。文献 [6] では、FPC (Fractional Power Control) を考慮した基地局選択手法を示している。文献 [8] では、FPC を考慮した DUDe における電力消費の最適化について示している。文献 [7] では、基地局が送信電力制御を行うことを前提としてエネルギー効率の良い基地局選択方式を提案している。文献 [9] では、DUDe における backhaul の要求キャパシティを算出している。

表 1 のモデルと異なる干渉モデルを想定した研究も成されている [10–15]。文献 [11] では、マクロセル基地局が MIMO を用いた場合の DUDe を扱っている。表 4 に文献 [11] で想定している基地局と端末の干渉を示す。MIMO では、マクロセル基地局からユーザ端末への通信はビームフォーミングにより干渉の影響を除去できるため、干渉しないという想定がされている。

文献 [12, 13] では、マクロセル基地局に cellular, スモールセル基地局にミリ波を用いた場合の DUDe を扱っている。表 5 に文献 [12, 13] で想定している基地局と端末の干渉を示す。文献 [12, 13] では、ミリ波による通信同士は指向性が強いいため、お互いに干渉の影響を受けないことを想定している。文献 [12] では、DUDe においてマクロセル基地局に cellular, スモールセル基地局にミ

表 4 MIMO を想定した場合の干渉 [11]

			受信側			
			マクロセル		スモールセル	
			BS	UE	BS	UE
送信側	マクロセル	BS	×	×	×	✓
		UE	✓	×	✓	×
	スモールセル	BS	×	✓	×	✓
		UE	✓	×	✓	×

表 5 Cellular とミリ波を想定した場合の干渉 [12]

			受信側			
			マクロセル		スモールセル	
			BS	UE	BS	UE
送信側	マクロセル	BS	×	✓	×	×
		UE	✓	×	×	×
	スモールセル	BS	×	×	×	×
		UE	×	×	×	×

り波を用いた場合の接続確率等の理論解析が、文献 [13] では文献 [12] のモデルにおける周波数割り当ての最適化が述べられている。

7 おわりに

本稿では、アップリンクとダウンリンクが異なる周波数チャネルを用いる DUDe において、SBD-RA と SBD-FCFA の 2 つの基地局選択手法を提案した。SBD-RA は、各ユーザ端末におけるアップリンク接続先基地局の種類を総当たりすることによって、最大のスループットを求めるための計算量を削減した。SBD-FCFA は、Cellular における DUDe で用いられる RSSI Base を拡張して、基地局選択指標に SINR を用いることによって、干渉を考慮した基地局選択を少ない計算量で可能にした。計算機シミュレーションによる性能評価を行って、SBD-RA と SBD-FCFA の有効性を確認した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H01718, NTT アクセスサービスシステム研究所の支援の下で行った。

参考文献

[1] Barreto, A. N., Faria, B., Almeida, E., Rodriguez, I., Lauridsen, M., Amorim, R. and Vieira, R.: 5G Wireless Communications for 2020, *Journal of Communication and Information Systems*, Vol. 31, No. 1, pp. 146–163 (2016).

[2] Elshaer, H., Boccardi, F., Dohler, M. and Irmer, R.: Downlink and Uplink Decoupling: A Disruptive Architectural Design for 5G networks, *Proceeding of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'14)*, pp. 1798–1803 (2014).

[3] Boccardi, F., Andrews, J., Elshaer, H., Dohler, M., Parkvall, S., Popovski, P. and Singh, S.: Why to Decouple the Uplink and Downlink in Cellular Networks and How To Do It, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 54, No. 3, pp. 110–117 (2016).

[4] Smiljkovic, K., Popovski, P. and Gavrilovska, L.: Analysis of the Decoupled Access for Downlink and Uplink in Wireless Heterogeneous Networks, *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 4, No. 2, pp. 173–176 (2015).

[5] Kim, D. M. and Popovski, P.: Reliability Improvement of Uplink Communication through Double Association in Wireless Heterogeneous Networks, *ArXiv e-prints*, pp. 1–4 (online), available from (<http://arxiv.org/abs/1505.02054>) (2015).

[6] Zhang, L., Feng, G., Nie, W. and Qin, S.: A Comparison Study of Coupled and Decoupled Uplink-Downlink Access in Heterogeneous Cellular Networks, *Proceeding of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'15)*, pp. 1–7 (2015).

[7] Sui, X., Zhao, Z., Li, R. and Zhang, H.: Energy Efficiency Analysis of Heterogeneous Cellular Networks with Downlink and Uplink Decoupling, *Proceeding of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM'15)*, pp. 1–7 (2015).

[8] Martin-Vega, F. J., Gomez, G., Aguayo-Torres, M. C. and Renzo, M. D.: Analytical Modeling of Interference Aware Power Control for the Uplink of Heterogeneous Cellular Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, No. 10, pp. 6742–6757 (2016).

[9] Elshaer, H., Boccardi, F., Dohler, M. and Irmer, R.: Load & Backhaul Aware Decoupled Downlink/Uplink Access in 5G systems, *Proceeding of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'15)*, pp. 5380–5385 (2015).

[10] Sekander, S., Tabassum, H. and Hossain, E.: Matching with Externalities for Decoupled Uplink-Downlink User Association in Full-duplex Small Cell Networks, *Proceeding of IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (IEEE WIECONECE'15)*, pp. 411–414 (2015).

[11] Li, R., Luo, K., Jiang, T. and Jin, S.: Uplink Spectral Efficiency Analysis of Decoupled Access in Multiuser MIMO Communications, *ArXiv e-prints*, pp. 1–30 (2016).

[12] Elshaer, H., Kulkarni, M. N., Boccardi, F., Andrews, J. G. and Dohler, M.: Downlink and Uplink Cell Association With Traditional Macrocells and Millimeter Wave Small Cells, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, No. 9, pp. 6244–6258 (2016).

[13] Park, J., Kim, S. L. and Zander, J.: Tractable Resource Management With Uplink Decoupled Millimeter-Wave Overlay in Ultra-Dense Cellular Networks, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 15, No. 6, pp. 4362–4379 (2016).

[14] Elshaer, H., Vlachos, C., Friderikos, V., Dohler, M.: Interference-Aware Decoupled Cell Association in Device-to-Device based 5G Networks, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, (2016).

[15] Sakr, A. H. and Hossain, E.: On Cell Association in Multi-Tier Full-Duplex Cellular Networks, *ArXiv e-prints*, pp. 1–30 (online), available from (<http://arxiv.org/abs/1607.01119>) (2016).