# 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  $E^1$  小林 真<sup>1,2</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup> 渡辺 尚<sup>1</sup>

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 の基本的なアイディアを示す. 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ため, 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

 <sup>1</sup> 大阪大学

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> 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)

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に実現している.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れば,将来的には異なる周 波数チャネルでのDUDe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 DUDe 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 のどちらの種類の基地局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となる計算量を減 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 DUDe 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.



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)

#### 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 DUDe 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 DUDe 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 DUDe 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	マクロ	BS	×	$\checkmark$	×	$\checkmark$	
信	セル	UE	$\checkmark$	×	$\checkmark$	×	
側	スモール	BS	×	$\checkmark$	×	$\checkmark$	
	セル	UE	$\checkmark$	×	$\checkmark$	×	

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

				受信側				
			マクロセル		スモールセル			
				BS	UE	BS	UE	
	送	マクロ	BS	×	$\checkmark$	×	×	
	信	セル	UE	$\checkmark$	×	×	×	
	側	スモール	BS	×	×	×	$\checkmark$	
		セル	UE	×	×	$\checkmark$	X	

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てい 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.  $\Phi_{M}$ ,  $\Phi_{W}$ ,  $\Phi_{d}$  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<sub>m</sub>) 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<sub>m</sub>) におけ る *j* 番目のマクロセル基地局 (M<sub>j</sub>) からのダウンリンクの 受信電力 (S<sup>D</sup><sub>Mjdm</sub>) は S<sup>D</sup><sub>Mjdm</sub> =  $P_M h_{Mjdm} ||x_{Mj} - x_{dm}||^{-\alpha}$ , *l* 番目のスモールセル基地局 (W<sub>l</sub>) からのダウンリンクの 受信電力 (S<sup>D</sup><sub>Wldm</sub>) は S<sup>D</sup><sub>Wldm</sub> =  $P_W h_{Wldm} ||x_{Wl} - x_{dm}||^{-\alpha}$ となる.ただし,  $h_{Mjdm}$ ,  $h_{Wldm}$  はそれぞれマクロセル 基地局 (M<sub>j</sub>) から端末 (d<sub>m</sub>) 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<sub>l</sub>) から端末 (d<sub>m</sub>) 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.  $||x_{Mj} - x_{dm}||$ ,  $||x_{Wl} - x_{dm}||$  はそれぞれマクロセ ル基地局 (M<sub>j</sub>) と端末 (d<sub>m</sub>) の距離, スモールセル基地局 (W<sub>l</sub>) と端末の距離である,  $\alpha$  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,

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{M}_{j}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}} = \frac{S_{\mathrm{M}_{j}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}}}{\sum_{x_{\mathrm{M}_{j}}\in\Phi_{\mathrm{M}}\setminus\{x_{\mathrm{M}_{j}}\}}S_{\mathrm{M}_{j}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}} + \sigma^{2}}$$

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  $(W_{\hat{i}})$  に ダウンリンクで接続した場合の、端末における SINR は、

$$\mathrm{SINR}_{\mathrm{W}_{\tilde{l}}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}} = \frac{S_{\mathrm{W}_{\tilde{l}}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}}}{\sum_{x_{\mathrm{W}_{l}}\in\Phi_{\mathrm{W}}\setminus\{x_{\mathrm{W}_{\tilde{l}}}\}}S_{\mathrm{W}_{l}\mathrm{d}_{m}}^{\mathrm{D}} + \sigma^{2}}$$

となる. ただし,  $\sigma^2$  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は受けない. 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  $ilde{\Phi}_{
m Md}\,(\in \Phi_{
m d})$ ,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  $(M_i)$ 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  $(S_{d_m M_i}^U)$  は  $S_{d_m M_i}^U = P_d h_{d_m M_i} ||x_{d_m} - x_{M_i}||^{-\alpha}$ となる.ただし、 $h_{d_mM_i}$ は端末  $(d_m)$  とマクロセル基地 局 (M<sub>i</sub>) 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<sub>dm</sub> – x<sub>Mi</sub>|| は端末と基地 局 (M<sub>i</sub>)の距離である. *î* 番目の端末 (d<sub>*î*</sub>) が *j* 番目の マクロセル基地局 (M<sub>i</sub>) にアップリンクで接続した時の 基地局における SINR は,

$$\operatorname{SINR}_{\mathrm{d}_{\hat{m}}\mathrm{M}_{j}}^{\mathrm{U}} = \frac{S_{\mathrm{d}_{\hat{m}\mathrm{M}_{j}}}^{\mathrm{U}}}{\sum_{x_{\mathrm{d}_{m}}\in\tilde{\Phi}_{\mathrm{Md}}\setminus\{x_{\mathrm{d}_{\hat{m}}}\}} S_{\mathrm{d}_{m\mathrm{M}_{j}}}^{\mathrm{U}} + \sigma^{2}}$$

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<sub>l</sub>) にアップリンクで接続した時の基地局 における SINR は,

$$\mathrm{SINR}^{\mathrm{U}}_{\mathrm{d}_{\hat{m}}\mathrm{W}_{l}} = \frac{S^{\mathrm{U}}_{\mathrm{d}_{\hat{m}}\mathrm{W}_{l}}}{\sum_{x_{\mathrm{d}_{m}}\in\tilde{\Phi}_{\mathrm{Wd}}\setminus\{x_{\mathrm{d}_{\hat{m}}}\}}S^{\mathrm{U}}_{\mathrm{d}_{m\mathrm{M}_{j}}} + \sigma^{2}}$$

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
- for all  $B \in \Phi_{\mathrm{M}} + \Phi_{\mathrm{W}}$  do 2:
- $\operatorname{Th}_{Bd_o}^{D} \leftarrow \operatorname{calcDownlinkThroughput}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ 3:
- 4: end for
- 5: $B_{\mathbf{d}_o}^{\mathbf{D}} \leftarrow \arg \max \operatorname{Th}_{B\mathbf{d}_o}^{\mathbf{D}}$  $B \in \Phi_M + \Phi_W$
- 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
- if  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md}$  then 11:
- 12:for all  $B \in \Phi_M$  do
- $\operatorname{Th}_{\mathrm{d}_{o}B}^{\mathrm{U}} \leftarrow \operatorname{calcUplinkThroughput}(B, \mathrm{d}_{o}, \tilde{\Phi}_{\mathrm{Md}}, \tilde{\Phi}_{\mathrm{Wd}})$ 13:end for
- 14:end if 15:
- 16:
- $\mathbf{if} \, \mathrm{d}_o \in \tilde{\Phi}_{\mathrm{Wd}_o} \, \mathbf{then}$ for all  $B \in \Phi_W$  do 17:

  - $\operatorname{Th}_{\mathrm{d}_{o}B}^{\mathrm{U}} \leftarrow \operatorname{calcUplinkThroughput}(B, \mathrm{d}_{o}, \tilde{\Phi}_{\mathrm{Md}}, \tilde{\Phi}_{\mathrm{Wd}})$ end for
- 19:20:end if

18:

24:

end for 21:

if  $(\sum_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \operatorname{Th}_{d_o B}^U > \operatorname{Th}_{MAX})$  then 22:

23: 
$$Th_{MAX} \leftarrow \sum_{B \in \Phi_M + \Phi_W} Th_{d_o B}^U$$

 $\mathbf{R}_b \leftarrow \mathbf{R}_o$ 

end if 25:

26: end for

27: decideUEway( $R_b$ )

28: for all  $d_o \in \tilde{\Phi}_{Md} + \tilde{\Phi}_{Wd}$  do

 $B_{\mathbf{d}_o}^{\mathbf{U}} \leftarrow \arg \max \mathbf{Th}_{\mathbf{d}_o B}^{\mathbf{U}}$ 29:

30:  $d_o$  connect to the station  $(B_d^U)$  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)<sup>m</sup> 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 $\mathcal{O}(m(j+l)2^m)$ 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。は任意のユーザ 端末,変数 B<sup>D</sup>, B<sup>U</sup> 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<sub>o</sub> 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  $\Phi_M, \Phi_W$ 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 さ. 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, 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, 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  $O((j+l)^m)$ 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替えされるため,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*)<sup>*m*</sup>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<sub>o</sub> 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  $\Phi_{M}$ ,  $\Phi_{W}$ 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 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 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 SE	3D-FCFA 接続	先基地局選択手法
----------------	------------	----------

1: for all  $B \in \Phi_{\mathrm{M}} + \Phi_{\mathrm{W}}$  do

- 2: SINR<sup>D</sup><sub>Bd<sub>o</sub></sub>  $\leftarrow$  calcDownlinkSINR(B, d<sub>o</sub>,  $\Phi_{\rm M}, \Phi_{\rm W})$
- 3: SINR<sup>U</sup><sub>d<sub>o</sub>B</sub>  $\leftarrow$  calcUplinkSINR $(B, d_o, \tilde{\Phi}_{Md}, \tilde{\Phi}_{Wd})$
- 4: end for
- 5:  $B^{\mathrm{D}} \leftarrow \underset{B \in \Phi_{\mathrm{M}} + \Phi_{\mathrm{W}}}{\operatorname{arg max}} \operatorname{SINR}_{Bd_{o}}^{\mathrm{D}}$
- 6: connect to the station  $(B^{\rm D})$  in the downlink
- 7:  $B^{\mathrm{U}} \leftarrow \arg \max \operatorname{SINR}_{\mathrm{d}_{o}B}^{\mathrm{U}}$

表3 ンミュレー	- ンヨン粂仵
$P_{\mathrm{M}}$	$46 \; [\mathrm{dBm}]$
$P_{ m W}$	$20 \; [dBm]$
$P_{ m d}$	$20 \; [dBm]$
$\sigma^2$	-90 [dBm]
α	4
トラヒックモデル	フルバッファ
試行回数	1000 回

A 11

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 ( $P_{\rm M}$ )を46 [dBm],スモールセル 基地局の送信電力 ( $P_{\rm W}$ )を20 [dBm],端末の送信電力 ( $P_{\rm d}$ )を20 [dBm],雑音 $\sigma^2$ を-90 [dBm],パスロス係数  $\alpha$ を4とした.トラヒ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 [km<sup>2</sup>] 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 [km<sup>2</sup>] 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 (Fravtional 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	マクロ	BS	×	Х	×	$\checkmark$	
信	セル	UE	$\checkmark$	Х	$\checkmark$	×	
側	スモール	BS	×	$\checkmark$	×	$\checkmark$	
	セル	UE	$\checkmark$	×	$\checkmark$	×	

表 5	Cellular	と	5 1	リ波を想定した場合の干渉 [	[12]
-----	----------	---	-----	----------------	------

		受信側				
			マク	マクロセル スモール・		
			BS	UE	BS	UE
送	マクロ	BS	×	$\checkmark$	×	×
信	セル	UE	$\checkmark$	×	х	×
側	スモール	BS	×	×	Х	×
	セル	UE	×	×	×	×

リ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 Communi*cation 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 GLOBE-COM'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] Smiljkovikj, 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).