

上下分離可能型異種無線ネットワークのスループットに関する基礎検討

上熊須 匠[†] 小林 真[‡] 猿渡 俊介[‡] 渡辺 尚[‡]
[†]大阪大学工学部 [‡]大阪大学大学院情報科学研究科

1 はじめに

上下分離 (DUDe: Downlink/Uplink Decoupling) とは、端末から見て、ダウンリンク (DL) の基地局とアップリンク (UL) の基地局に別々の基地局を用いる技術である [1]。本稿では、セルラーネットワークと Wi-Fi ネットワークを同時に用いる異種無線統合ネットワークにおいて、DUDe を利用した無線通信のスループットについて検討する。

2 システムモデル

2.1 セルラーにおける DUDe

現在の無線ネットワークでは、DRP (Downlink Reference signal received Power) が用いられている。DRP では端末は DL と UL を同じ基地局に接続する。端末は DL の受信電力が最大となる基地局を接続先として選択する。マクロセルとフェムトセルが共存するセルラーネットワークでは、マクロセル基地局の送信電力がフェムトセル基地局の送信電力より大きいため、DRP を用いると UL の受信電力という観点からは適切な基地局に接続されない場合がある。しかしながら、UL 接続先の観点では、端末に最も近いフェムトセル基地局を用いる方が UL 受信電力が大きくなる。

一方 DUDe では、DL の送信元基地局と UL の送信先基地局を、それぞれ独立に選択した基地局と接続する (図 1)[1, 2]。図 1 では、DL 接続には端末はマクロセル基地局を用いている。一方、端末は UL 接続先には受信電力が最大となるフェムトセル基地局に UL を接続している。DL と UL 両方をマクロセル基地局に接続する DRP に比べて、図 1 では UL の基地局における受信電力が向上する。DUDe により、UL の SINR (Signal to Interference Noise Ratio) の向上、端末送信電力の削減、UL 接続先基地局の負荷分散が実現される [2]。

DUDe での接続先基地局を決定する手法として、文献 [3] は RSSI (Received Signal Strength Indicator) に基づいた接続先基地局を選択する手法 (RSSI Base) を提案している。具体的には、端末は DL 接続先として、端末での受信電力が最大となる基地局を、UL 接続先として、端末は基地局での受信電力が最大となる基地局をそれぞれ用いる。文献 [3] は、DUDe における RSSI Base の性能を評価するために、ポアソン点過程を用いたセルラーにおける DUDe での UL と DL の受信電力および SINR を定義している。

2.2 セルラーと Wi-Fi 統合環境における DUDe

本稿では、セルラーと Wi-Fi を同時に用いる異種無線統合ネットワークにおける DUDe を想定する。図 3 に本稿で想定するセルラーと Wi-Fi を同時に用いる DUDe を示す。セルラーと Wi-Fi は異なる周波数帯を利用しているために、2.1 節で示した DUDe の SINR モデルを異種無線統合ネットワークでは用いる事ができない。

そこで本稿では、セルラーと Wi-Fi を同時利用する異種無線統合ネットワークにおける DUDe の SINR モデルを定義する。文献 [3] で定義されている SINR モデルに基づいて、異種無線統合ネットワークにおける DUDe の SINR 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、Wi-Fi 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、Wi-Fi 基地局と端末はそれぞれ強度 $\lambda_M, \lambda_W, \lambda_d$ のポアソン点過程に従って配置される。 $x_{M_j} (\in \Phi_M), x_{W_l} (\in \Phi_W), x_{d_m} (\in \Phi_d)$ 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 Wi-Fi 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 はそれぞれポアソン点過程に従って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、Wi-Fi 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 DL 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 DL 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 Wi-Fi 基地局 (W_l) からの DL 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、Wi-Fi 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。 $\|x_{M_j} - x_{d_m}\|, \|x_{W_l} - x_{d_m}\|$ はそれぞれマクロセル基地局 (M_j) と端末 (d_m) の距離、Wi-Fi 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。

異種無線統合ネットワークで、 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 DL で接続した場合の、端末における SINR は、

$$\text{SINR}_{M_{\hat{j}} d_m}^D = \frac{S_{M_{\hat{j}} d_m}^D}{\sum_{x_{M_j} \in \Phi_M \setminus \{x_{M_{\hat{j}}}\}} S_{M_j d_m}^D + \sigma^2} \quad (1)$$

となる。同様に、 m 番目の端末 (d_m) が \hat{l} 番目の Wi-Fi 基地局 ($W_{\hat{l}}$) に DL で接続した場合の、端末における SINR は、

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

となる。ただし、 σ^2 は雑音の大きさである。

異種無線統合ネットワークの UL の通信における干渉量は、各端末がマクロセル基地局に接続しているか Wi-Fi 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 UL 接続した端末は、Wi-Fi 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 Wi-Fi 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 UL を接続している端末位置の集合を $\tilde{\Phi}_{Md} (\in \Phi_d)$ 、Wi-Fi 基地局に UL 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、 $\tilde{\Phi}_{Md}$ と $\tilde{\Phi}_{Wd}$ はポアソン点過程には従わず、 $\tilde{\Phi}_{Md} \cap \tilde{\Phi}_{Wd} = \phi$ を満たす。

DL 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 UL 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 \hat{j} 番目のマクロセル基地局 ($M_{\hat{j}}$) に UL で接続した時の基地局における SINR は、

$$\text{SINR}_{d_{\hat{m}} M_{\hat{j}}}^U = \frac{S_{d_{\hat{m}} M_{\hat{j}}}^U}{\sum_{x_{d_m} \in \tilde{\Phi}_{Md} \setminus \{x_{d_{\hat{m}}}\}} S_{d_m M_{\hat{j}}}^U + \sigma^2} \quad (3)$$

となる。マクロセルと同様に、 \hat{m} 番目の端末 ($d_{\hat{m}}$) が \hat{l} 番目のマクロセル基地局 ($W_{\hat{l}}$) に UL で接続した時の基地局における SINR は、

$$\text{SINR}_{d_{\hat{m}} W_{\hat{l}}}^U = \frac{S_{d_{\hat{m}} W_{\hat{l}}}^U}{\sum_{x_{d_m} \in \tilde{\Phi}_{Wd} \setminus \{x_{d_{\hat{m}}}\}} S_{d_m W_{\hat{l}}}^U + \sigma^2} \quad (4)$$

となる。

2.3 課題

セルラーと Wi-Fi の異種無線統合ネットワークにおける DUDe では、セルラーにおいて DUDe を用いる場合と異なり UL の干渉量が各端末の接続先選択によって変動する。異種無線統合ネットワークで、端末が RSSI に基づいた接続先基地局選択を行う RSSI Base [3] を用いるとスループットが低下するという問題が発生する。異種無線統合ネットワークの DUDe では、式 (3), (4) で示したように、端末の UL の SINR は他の端末の接続先基地局の種類に

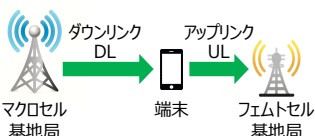


図 1: DUDe の基地局接続例

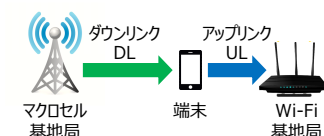


図 2: セルラーと Wi-Fi を同時に用いる DUDe の基地局接続例

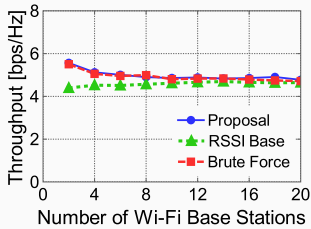


図 3: DL 平均スループット (小規模ネットワーク)

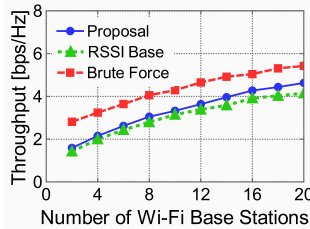


図 4: UL 平均スループット (小規模ネットワーク)

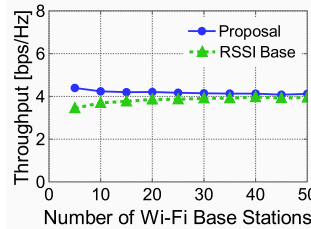


図 5: DL 平均スループット (大規模ネットワーク)

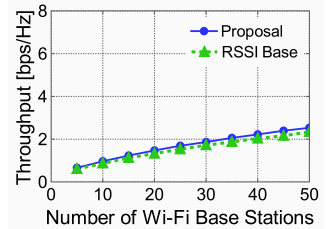


図 6: UL 平均スループット (大規模ネットワーク)

Algorithm 1 接続先基地局選択手法

```

1: for all  $B \in \Phi_M + \Phi_W$  do
2:    $\text{SINR}_{Bd_o}^D \leftarrow \text{calculateDownlinkSINR}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ 
3:    $\text{SINR}_{d_o B}^U \leftarrow \text{calculateUplinkSINR}(B, d_o, \Phi_{M_d}, \Phi_{W_d})$ 
4: end for
5:  $B^D \leftarrow \arg \max_{B \in \Phi_M + \Phi_W} \text{SINR}_{Bd_o}^D$ 
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
    
```

依存する。異種無線統合ネットワークで RSSI Base を用いると、干渉量が増大して UL のスループットが低下する。具体的には、異種無線統合ネットワークでは Wi-Fi 基地局数がセルラー基地局数よりも多い。RSSI Base を用いると、基地局数が多い Wi-Fi に UL を接続する端末が、セルラーに接続する端末よりも多くなる。Wi-Fi に UL を接続する端末が多い時、Wi-Fi 基地局における干渉量が大きくなるため、Wi-Fi 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 UL 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 UL 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 、基地局数を $j+l$ 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。

3 提案手法

2.3 の課題を解決するために、既に接続されている端末からの干渉を考慮した送信先基地局決定手法を提案する。提案手法では、各端末が接続する際に DL 接続先基地局と UL 接続先基地局をそれぞれ選択する。

Algorithm 1 に提案手法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 DL 接続先と UL 接続先に選択された基地局、集合 Φ_M, Φ_W はそれぞれ 2.2 節で定義したマクロセル基地局と Wi-Fi 基地局の位置の集合、集合 Φ_{M_d}, Φ_{W_d} はそれぞれ 2.2 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 Wi-Fi 基地局に接続している端末の集合、関数 $\text{calculateDownlinkSINR}(B, d_o, \Phi_M, \Phi_W)$ は基地局 (B) から端末 (d_o) への DL の SINR を算出する関数、関数 $\text{calculateUplinkSINR}(B, d_o, \Phi_{M_d}, \Phi_{W_d})$ は端末 (d_o) から基地局 (B) への UL 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 DL と UL の SINR を算出する。具体的には、**Algorithm 1** の 1-4 行目で、全ての基地局との間の SINR を算出する。UL 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 Wi-Fi 基地局のいずれの基地局に接続しているかを考慮する。つづいて、**Algorithm 1** の 5, 6 行目で、端末は最も高い DL SINR を達成する基地局に対して DL の接続を行う。最後に、**Algorithm 1** の 7, 8 行目で、端末は最も高い UL SINR を達成する基地局に対して UL の接続を行う。一度接続された端末は接続先を変更しない。提案手法では、基地局数を $j+l$ とすると $j+l$ 通りの組み合わせに対して計算する。従って、総当たりよりも計算量を削減できる。

4 評価

4.1 評価環境

提案手法の計算機シミュレーションによって UL と DL のスループットを評価した。1 × 1 [km²] の範囲に基地局と端末をランダムに配置した。セルラー基地局の送信電力 (P_M) を 46 [dBm]、Wi-Fi 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 10^{-12} 、パスロス係数 α 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求め、シャノン容量の総和を端末数で割ったものとする。結果は 1,000 回の平均を用いた。

比較対象として、RSSI Base、総当たり手法 (Brute Force) を用いた。RSSI Base は文献 [3] の手法である。Brute Force は、全ての端末と全てのセルラー基地局と Wi-Fi 基地局との DUDe での接続の組み合わせを総当たりして、最も高い総スループットを達成する組み合わせを用いて接続する。

4.2 小規模なネットワークでの評価

セルラー基地局 2 台、端末 10 台、Wi-Fi 基地局数を 2 から 20 に変更して平均スループットを評価した。図 3 に、DL のスループットを、図 4 に、UL のスループットを示す。図 3 より、提案手法は、Brute Force と同じ DL スループットを達成した。DL では端末の接続先基地局が変化しても、干渉量は変化しないためである。さらに、提案手法は RSSI Base と比較して、Wi-Fi 基地局が少ないほど高いスループットを達成した。

図 4 より、提案手法は、Wi-Fi 基地局数によらず RSSI Base と比較して約 10% 高い UL スループットを達成した。しかしながら、提案手法は Brute Force と比較して UL のスループットが低くなった。新たな接続の時に、提案手法が既に接続されている端末の接続先の変更を行わないためだと考えられる。

4.3 大規模なネットワークでの評価

セルラー基地局 5 台、端末 50 台、Wi-Fi 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。Brute Force の計算が困難であるため、提案手法と RSSI Base とを比較した。

図 5 に、DL のスループットを、図 6 に、UL のスループットを示す。図 5 より、提案手法は、Wi-Fi 基地局が少ないほど高いスループットを達成した。図 6 より、提案手法は、Wi-Fi 基地局数によらず RSSI Base と比較して UL スループットが約 10% 高くなった。それぞれ図 3、図 4 と同等のスループット改善を達成しているため、提案手法は端末数が増加しても有効である。

5 おわりに

本稿では、セルラーと Wi-Fi を用いた DUDe における、接続先基地局選択手法を提案した。提案手法は端末接続時に SINR を用いた接続先基地局選択を行うことで、高いスループットを達成した。現在、既に接続されている基地局を動的に変更する手法について検討している。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP16H01718 と総務省 SCOPE(受付番号 155007006) の助成を受けたものです。

参考文献

[1] Elshaer, H., et al. : Downlink and Uplink Decoupling: A disruptive architectural design for 5G networks, Proceedings of IEEE Global Communications Conference (IEEE GLOBECOM '14), pp. 1798-1803 (2014). [2] Boccardi, F., et al. : 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). [3] Smiljkovic, K., et al. : 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).