

下りNOMAにおけるペアリングと電力割当のアルゴリズムの演算量と平均スループットのトレードオフについて

著者	石井 洋平, 鈴木 利則, 吉川 英機
雑誌名	東北学院大学工学部研究報告
巻	55
号	1
ページ	23-28
発行年	2021-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024691/

研究論文

下り NOMA におけるペアリングと電力割当のアルゴリズムの演算量と平均スループットのトレードオフについて

Tradeoff between the Throughput Performance and Calculation Cost for Pairing and Power Allocation Algorithms in a Downlink Non-Orthogonal Multiple Access

石井 洋平* 鈴木 利則* 吉川 英機*
Yohei ISHII Toshinori SUZUKI Hideki YOSHIKAWA

Abstract: Recently, the number of wireless communication terminals such as IoT-devices and mobile terminals have increased rapidly, and it is expected that non-orthogonal multiple access (NOMA), which can improve the frequency utilization efficiency, will be adopted. In NOMA, it is known that the scheduling method and transmission power allocation method have a significant influence on the characteristic of throughput. In the first method, a plurality of the power ratio sets were prepared, and all possible combinations of the terminals were also considered. In the latter method, the throughput and scheduling were adjusted using a cost function. The former method shows high throughput characteristics but has the disadvantage of increasing the number of calculations. The latter method controls the magnitude of the throughput and reduces the number of calculations. However, the differences in characteristics when these are examined in the same environment have not been verified. In this study, the change in throughput characteristics between the conventional method and the cost function method when unified into a multi-cell environment was verified using computer simulations.

Keywords: NOMA, Calculation, Proportional Fair Scheduling, Power Allocation, Multi Cell,

1. はじめに

近年、スマートフォンの普及や IoT(Internet of Things)などの無線通信端末は、図 1 に示すように急激に増加している[1]。これによる通信量の増加に対処するため、通信容量を拡大することが期待できる非直交多元接続 (NOMA : Non-Orthogonal Multiple Access)[2-4,6,7,12]の活用が注目されている。特に下りリンクの NOMA では、複数のユーザ端末(UE : User Equipment)をリソース上で、割り当てる送信電力の大きさに差を与えて多重化を行うことで、既存の周波数帯の利用効率を向上させることができる。

ここで、NOMA による容量拡大に大きな影響を与えるアルゴリズムが、リソースを割り当てる複数(通常は2つ)の UE を選ぶペアリングと、選んだ UE に配分する電力比(電力割当)である。本論文ではこれら 2 つを合わせて割当アルゴリズムと呼ぶ。従来の割当アルゴリズム[3]では、固定した電力比を 1 以上用意し、ペアリングする UE のフェアネスの和が最大になる UE と電力比を選ぶ。この割当アルゴリズムは広く用いられている[17-22]ものの、割り当てに要する演算量が多い点が指摘されている

[4,16]。具体的には割り当て候補となる UE 数を K とし、用意した電力比の数を $|P_s|$ とすると、 $K(K-1)|P_s|/2$ 通りのフェアネス和を計算し、その中で最大となる組み合わせを選ぶ必要がある。

この演算量を緩和するため、文献[4,16]では、コスト関数を用いた割当法を提案し、その演算量は K に比例する規模であることを示している。しかしながら同一条件下で NOMA 容量特性に関する従来手法[3]との比較は示されていない。

そこで本論文では、統一したマルチセル環境において、従来手法[3]とコスト関数法[4]の NOMA 特性を計算機シミュレーションにより比較し、演算量だけでなくスループット特性についても検討する。第 2 節では、下りリンク NOMA とシステムモデルについて述べる。第 3 節では、従来手法[3]とコスト関数法[4]を概説する。第 4 節では、評価条件と評価結果について述べる。第 5 節はまとめである。

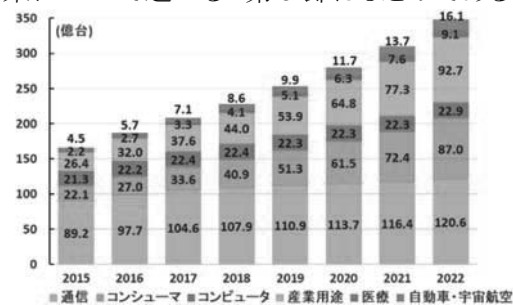


図 1. 世界の IoT デバイス数の推移及び予測[1]

* 東北学院大学大学院

2. システムモデル

2.1. NOMA の特徴

NOMA は基地局近傍に存在する受信品質の良い UE には小さな送信電力を、基地局遠方に存在する受信品質の悪い UE には大きな送信電力を与えて多重化を行う。この際、多重化される UE ではお互いの信号が干渉としてあらわれるが、基地局遠方の UE では減衰によって干渉の影響は小さくなり、基地局近傍の UE では干渉除去を行うことによって干渉の影響を取り除くことができる。

2.2. 干渉除去

基地局から送信されて通信路を通り UE が受信する信号には、ペアの UE 宛の信号が含まれており、自局宛以外の信号は干渉として扱われる。基地局遠方の UE はこの干渉を減衰の影響により熱雑音程度と考えることができ、自局宛信号の復調、復号を行うことができる。しかし、小さな電力が割り当てられている基地局近傍の UE は、基地局遠方 UE 宛の信号による干渉の影響を受けているため、そのままでは自局宛の正しい信号の復調、復号を行うことができない。そこで、図 2 に示すように基地局近傍 UE は干渉除去を行う必要がある。まず、近傍 UE は、受信した信号から大きな電力が与えられている遠方 UE 宛の信号を復調し復号を行う。ここで得られた信号を再度符号化し、遠方 UE 宛信号のレプリカを作成する。このレプリカを近傍 UE が受信した元の信号から減算することで、遠方 UE 宛の信号を除去することができる。遠方 UE 宛の信号には大きな電力が割り当てられているので、レプリカの精度は高く干渉除去は成功すると想定される。近傍 UE は干渉除去後の信号を復調、復号を行うことで自局宛信号を得ることができる[14-15]。

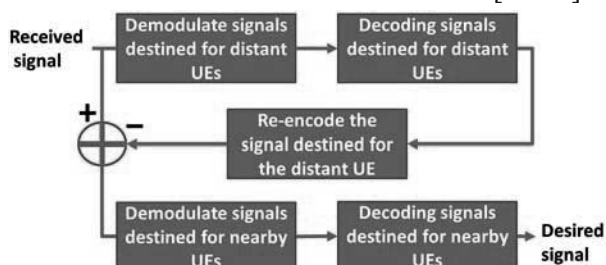


図 2. 近傍 UE における信号処理

2.3. マルチセル

図 3 に示すマルチセル環境で、ISD(Inter-Site Distance) は隣接する基地局間の距離を示してい

る。マルチセルでは隣接している基地局で同一の周波数を利用するとセル間の干渉が大きくなってしまいうため、周波数を複数に区切り繰り返して用いる[13]。この繰り返し数を RF(Reuse Factor)という。マルチセルにおける平均スループット特性は、中央の基地局に接続される UE の平均スループットを用いる。この時、シャドローイングの影響により、図 4 のように隣接するセルに存在している UE が中央の基地局に接続される場合がある。本論文ではこの影響を考慮し、中央のセルと隣接する 6 セルに UE を分布させ、中央の基地局に接続された時の SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)が最大になる UE を中央のセルに分布する UE とする。これによって中央のセルに存在する UE 数は平均 K 台として検討を進める。

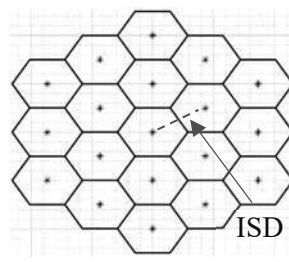


図 3. マルチセル(19セル)

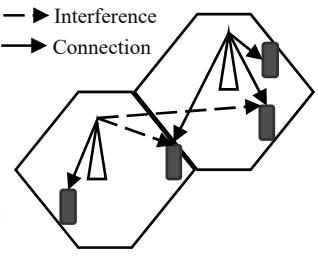


図 4. セル間干渉

2.4. スループット導出式

現在用いられている直交多元接続(OMA: Orthogonal Multiple Access)における瞬時スループット R は、シャノンの通信路容量式を用いて式(1)で与えられるものとする¹。ここで x は UE の SNR(Signal to Noise Ratio)を示している。

$$R(x) = \log_2(1 + x) \tag{1}$$

基地局数が C の時、中心の基地局 1 に接続される UE k の SINR x は式(2)より導出する。ここで P は基地局からの送信電力、 $|h_{c,k}|^2$ は基地局 c ($1 \leq c \leq C$) と UE k 間の複素チャネル利得、 N は雑音電力を示している。

$$x(k) = \frac{P|h_{1,k}|^2}{\sum_{c=2}^C P|h_{c,k}|^2 + N} \tag{2}$$

NOMA において UE を多重化した際、UE k が near のとき、瞬時スループット R_{near} は干渉を完全に除去できると考えられるため、式(1)と同様にシャノンの通信容量式を適応して式(3)で与える。同様に UE k が far のとき、瞬時スループット R_{far} は、干渉除去を行わず熱雑音程度の近傍 UE 宛の信号を含んでいるため、式(4)で与える。 x_{near} 、 x_{far} は近傍と遠方で選ばれた UE の SINR(送信電力が 100%の時の値)を示している。ここで α ($0 \leq \alpha \leq$

¹ シャノンの通信路容量は理論上誤りなく達成可能とされている通信路容量の上限値である。

1)は, 中央の基地局が近傍 UE に割り当てる送信電力の比を示しており, 2UE を多重する時, 遠方 UE に割り当てられる送信電力の比は $1-\alpha$ で表すことができる. なお, 近傍 UE に大きな電力を割り当ててしまうと遠方 UE 宛の信号が復号できなくなるため, α の上限を $1/3$ 程度に制限して用いられることが多い. また, α を複数用意した値の中から選ぶ際, 基地局が UE に対してどの値を UE に割り当てているのかを通知する.

$$\begin{aligned} x_{near}(k) &= \frac{\alpha P |h_{1,k}|^2}{\sum_{c=2}^C P |h_{c,k}|^2 + N} \\ R_{near}(k) &= \log_2(1 + x_{near}(k)) \\ &= \log_2(1 + \alpha x(k)) \\ &\equiv R_{near}(k, \alpha) \\ x_{far}(k) &= \frac{(1-\alpha)P |h_{1,k}|^2}{\sum_{c=2}^C P |h_{c,k}|^2 + \alpha P |h_{1,k}|^2 + N} \\ R_{far}(k) &= \log_2(1 + x_{far}(k)) \\ &= \log_2\left(\frac{1 + x(k)}{1 + \alpha x(k)}\right) \\ &\equiv R_{far}(k, \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

2.5. Proportional Fair Sharing (PFS)

UE をスケジューリングする際, UE 選択の公平性をある程度満足しつつチャネル状態を活用する方法として Proportional Fair Sharing(PFS)がある[13]. UE k のメトリック PF は式(5)によって定義する. R と \bar{R} は, それぞれ UE の瞬時スループットとこれまでに割り当てられた平均スループットを示している. \bar{R} はスロットごとに時定数 τ で重み付き平均の値が更新される[12].

$$PF(k) = \frac{R(k)}{\bar{R}(k)} \quad (5)$$

3. 従来の割当アルゴリズム

3.1. 文献[3]の従来手法

基地局に接続される UE 全ての組み合わせを U ($U = \{(1,2), (1,3) \dots (i,j) \mid 1 \leq i < K, i < j \leq K\}$) とする. UE は SINR が高い順に並んでいるものとする. また, 事前に近傍 UE に割り当てる固定した送信電力比のセット P_s ($P_s = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots\}$) を 1 つ以上準備する. UE i の x_i を near, UE j の x_j を far とし, 式(3)と式(4)を用いて瞬時スループット $R_{near}(i, \alpha)$ または $R_{far}(j, \alpha)$ を算出する. 算出した瞬時スループットと平均スループット $\bar{R}(i), \bar{R}(j)$ を用いて, 式(6)

から 2UE を組み合わせた時の PF の和 $Q(i, j, \alpha)$ を求める.

$$Q(i, j, \alpha) = \frac{R_{near}(i, \alpha)}{\bar{R}(i)} + \frac{R_{far}(j, \alpha)}{\bar{R}(j)} \quad (6)$$

ここで得られた $Q(i, j, \alpha)$ から式(7)を用いて最大の PF をとる UE の組み合わせ i_{max}, j_{max} と電力比 α_{max} を選び出し, リソースを割り当てる.

$$\begin{aligned} &\{i_{max}, j_{max}, \alpha_{max}\} \\ &= \arg \max_{(i,j) \in U, \alpha \in P_s} Q(i, j, \alpha) \end{aligned} \quad (7)$$

この手法について, 本論文では単独の UE にリソースを割り当てた時の PF が, NOMA で割り当てた時の 2UE の PF の和よりも大きくなることも考慮している. そのため式(8)と式(5)より OMA で割り当てた時の PF も算出する. この場合, 最大の PF をとる UE 1 台に 100% の電力を割り当てる.

$$R_{oma}(k) = R(x(k)) = \log_2(1 + x(k)) \quad (8)$$

すなわち

$$\max_{(i,j) \in U, \alpha \in P_s} Q(i, j, \alpha) < \max_k PF(k)$$

のときのみ PF が最大となる UE に電力を 100% 割り当てる OMA となる.

3.2. コスト関数法[4]

マルチセルの中央の基地局に接続される UE が K 台あるとする. まず式(5)と式(8)を用いて K 台全ての UE について, 100% の電力を割り当てた時の PF を求める. ここで式(9)より PF が最大になる UE k ($1 \leq k \leq K$) を選出する.

$$k_{max} = \arg \max_k PF(k) \quad (9)$$

ここで得られた UE k_{max} と, ペアになり得るすべての UE の組み合わせを U ($U = \{(k_{max}, 1), \dots (k_{max}, l) \mid 1 \leq l \leq K, l \neq k_{max}\}$) とする. 式(10)と式(11)を用いて, ペアを組んだ 2UE の瞬時スループットを等しくする近傍 UE 宛の送信電力比 α を算出する. 式(11)は式(10)を α について解いた結果である. この時, UE k_{max} と UE l の SINR $x_{k_{max}}$ と x_l で, SINR が高い方を x_{near} , 低い方を x_{far} として計算する.

$$\log_2(1 + \alpha x_{near}) = \log_2\left(\frac{1 + x_{far}}{1 + \alpha x_{far}}\right) \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{-(x_{near} + x_{far}) + \sqrt{(x_{near} + x_{far})^2 + 4x_{near}x_{far}}}{2x_{near}x_{far}} \quad (11)$$

α を用いて得られる 2UE のスループットの和 R_t と, SINR $x_{near}[\text{dB}]$ と $x_{far}[\text{dB}]$ を用いて, 式(12), (13)および式(14)を用いて UE k_{max} とペアにした時に最小のコストをとる UE l を選出し, リソースを割り当てる.

$$R_t = R_{near} + R_{far} \tag{12}$$

$$Cost(k_{max}, l) = \frac{1}{1 + R_t |x_{near[dB]} - x_{far[dB]}|} \tag{13}$$

$$l_{min} = \arg \min_l Cost(k_{max}, l) \tag{14}$$

4. 評価

4.1. 評価パラメータ

表 2 に本論文で用いたパラメータを示す。

表 2. 評価パラメータ

Reuse Factor	1
Cell layout	7,19
Inter-site-distance	500 [m]
Minimum distance between BS and UE	20 [m]
Noise	-100 [dBm]
Average number of UE	10
Maximum multiples	OMA:1, NOMA:2
Distance attenuation formula, d [km]	$138.5336 + 38 \log(d)$ [dB]
Carrier frequency	2 [GHz]
Shadowing	Average:0 [dB] Standard deviation:8 [dB] Correlation between BS:0.5
Time slot time	1 [ms]
Number of Timeslot t	10000 [slot]
Average time constant τ	100 [slot]
Max. Doppler frequency	10 [Hz]
Delay spread	1 [μ s] [5]
Number of paths	23 [5]
Receiver configuration	Maximum ratio synthesis
BS Transmission Power	1 [W]
Transmission power ratio set to nearby UE P_s	1set: 0.22 5set: 0.12,0.17,0.22,0.27,0.32 10set: 0.12,0.15,0.17,0.19,0.22, 0.25,0.27,0.29,0.32,0.35

本論文では、セル数の変化による特性の差を確認するために 7 セルと 19 セルを用いて検討した。距離減衰は Walfisch-池上モデル[8]を用いて算出している。また、通信路はシャドーイング、フェージング[5]による変動と AWGN (加算性白色ガウス雑音:Additive White Gaussian Noise)を考慮している。シャドーイングの影響を考慮して、中央の基地局に接続される UE の平均が 10 になるようにシミュレーションを繰り返している。これによってシミュレーション誤差は 1.6%以下の精度となっている。近傍 UE 宛の送信電力比の数は従来手法に合わせて、1, 5, 10 で行っている。

4.2. 評価結果

4.2.1. 演算量の比較

演算量は、割当アルゴリズムの中で最大値または最小値を選ぶ際に必要となる候補の数と定義する。従来手法では電力比のセット長 $|P_s|$ と K UE 全ての組み合わせの積に加え、 K UE 全てで OMA 接続する場合を考慮し、演算量は式(15)で求めることができる。コスト関数法は、 K 台の中から PF が最大になる UE を 1 つ求め、 $K - 1$ 個のコスト関数から最小値を求めているため、演算量は式(16)で求めることができる。表 3 に演算量の結果を示す。また、UE 数が増加した時の演算量の変化を図 5 に示す。グラフの縦軸は演算量、横軸は UE 数を示している。

$$\frac{K(K-1)}{2} |P_s| + K \tag{15}$$

$$2K - 1 \tag{16}$$

図 5 より従来手法では UE 数の 2 乗に比例して演算量が増加しているのに対して、コスト関数法では UE 数に比例して演算量が増加していることがわかる。

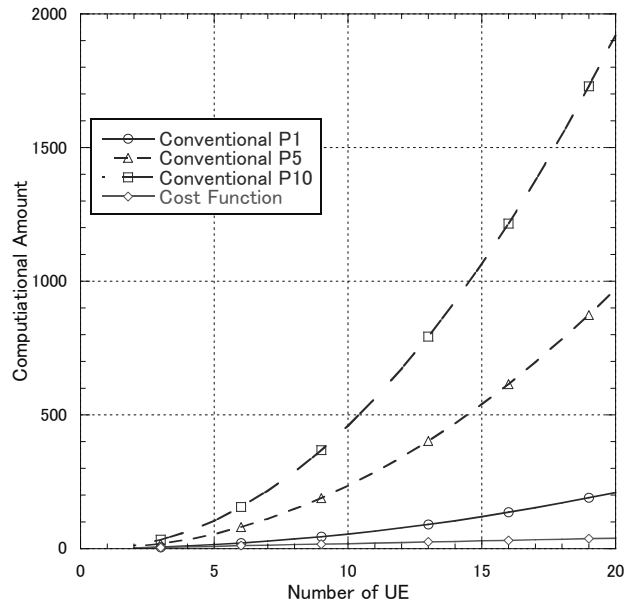


図 5. UE 数と演算量の変化

表 3. 従来手法とコスト関数法の演算量比較

$K = 10$	$ P_s = 1$	$ P_s = 5$	$ P_s = 10$
従来手法	55	235	460
コスト関数法	19		
コスト関数従来比	0.345	0.080	0.041

4.2.2. 平均スループット特性

従来手法、コスト関数法と PFS-OMA の平均スループット特性について、図 6 と表 4 に示す。グラフの縦軸は平均スループット、横軸は UE の累積確率を示しており Conventional は従来手法を、

Cost Function はコスト関数法を示している。現行システムとの比較のために、同一環境で PFS-OMA を用いた結果も示している。ここで PFS-OMA は、式(5)と式(8)を用いて最大のPFをとる UE に 100% のリソースを割り当てている。表 4 より従来手法に対してコスト関数法では、平均スループット特性が 5~15%程度が低下していることがわかる。これは、コスト関数法でペアを選ぶ際、2UE のスループットが等しくなるように送信電力を割り当てている。そのため、距離減衰の影響が大きい基地局遠方の UE に大きな電力を割り当てる必要があり、基地局近傍でスケジュールされた UE に十分な電力を割り当てることができないため低下したと考えることができる。PFS-OMA と比較した時、平均して従来手法は 32~40%程度、コスト関数法は 24~26%程度特性が向上していることがわかる。これは PFS-OMA に比べて、UE へのリソースの割り当て回数が増加したため向上したと考えることができる。

表 4. 平均スループット特性
(上:7セル RF1 下:19セル RF1)

7RF1	5%	50	95%	AVE
Conv $ P_s = 1$	3.36	4.89	6.87	4.98
Conv $ P_s = 5$	3.45	5.13	7.30	5.23
Conv $ P_s = 10$	3.45	5.13	7.30	5.23
Cost	3.02	4.67	6.68	4.75
PFS-OMA	2.68	3.70	5.10	3.78
19RF1	5%	50	95%	AVE
Conv $ P_s = 1$	2.94	4.48	6.60	4.58
Conv $ P_s = 5$	3.03	4.70	7.03	4.81
Conv $ P_s = 10$	3.03	4.70	7.03	4.81
Cost	2.62	4.17	6.30	4.27
PFS-OMA	2.36	3.36	4.78	3.43

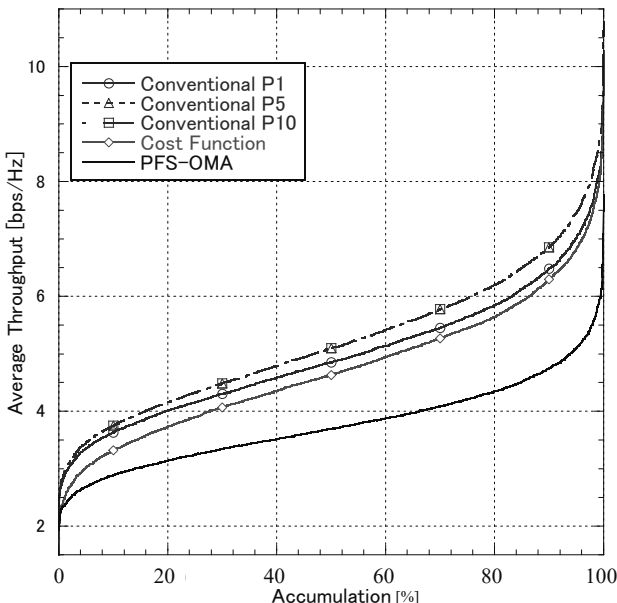


図 6-1. 累積 UE と平均スループット特性(7セル)

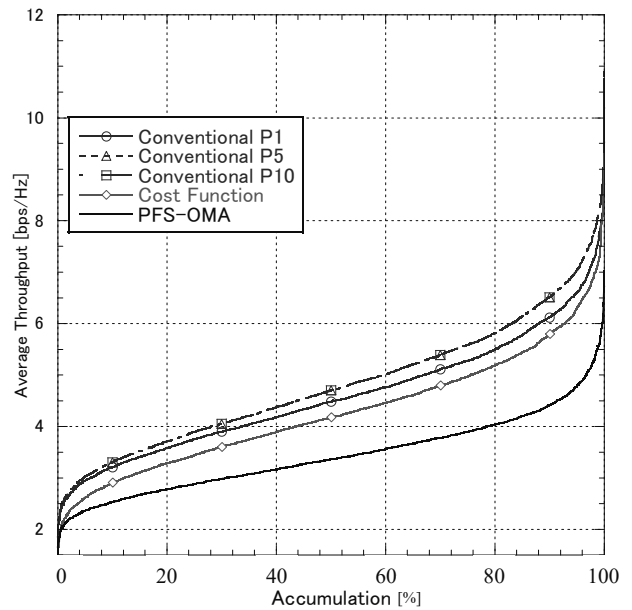


図 6-2. 累積 UE と平均スループット特性
(19セル RF1)

4.2.3. UE 間平均スループットの広がり

UE 間の平均スループットの広がりを確認するために、標準偏差を平均スループットで割った変動係数[10]を用いた。

従来手法、コスト関数法と PFS-OMA を比較した結果を表 5 に示す。従来手法では近傍 UE と遠方 UE に割り当てる電力の大きさを固定している。そのため、電力の大きさが常に変動するコスト関数法よりも UE 間の平均スループットの変動係数が小さくなったと考えることができる。PFS-OMA と比較した時、NOMA の変動係数が大きくなるのは、UE へのリソース割り当て回数が増加し、割り当てられる電力の大きさや組み合わせ方が変化するため、UE 間での平均スループットのばらつきが大きくなったと考えることができる。

表 5. 従来手法とコスト関数法の変動係数

	従来手法			コスト関数法	PFS-OMA
	$ P_s = 1$	$ P_s = 5$	$ P_s = 10$	-	-
7RF1	0.219	0.229	0.229	0.238	0.198
19RF1	0.248	0.259	0.258	0.264	0.219

5. おわりに

本論文では、下りリンク NOMA に用いられる割当アルゴリズムについて述べ、従来手法とコスト関数法の特徴の比較を統一したマルチセル環境下で行い、平均スループット特性とユーザ間でのスループットの変動係数を取得した。その結果、コスト関数法は従来手法に比べて演算量を抑えることはできるが、その代償として平均スループット特性が

10%程度低下してしまうことがわかった。さらに、コスト関数法は従来手法と比較してユーザ間の平均スループットのばらつきが 5~9%程度大きくなることがわかった。

この結果を踏まえ今後は、演算量を従来手法より削減しつつスループット特性は低下させない新たな割り当てアルゴリズムを検討する予定である。

6. 参考文献

- [1] 第5世代移動通信システム(5G)の今と将来展望,総務省総合通信基盤局,Jun.2019.
- [2] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li and K. Higuchi, “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access”, IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Spring), Jun. 2013.
- [3] A. Benjebbour, A. Li, Y. Kishiyama, H. Jiang and T. Nakamura, “System-Level Performance of Downlink NOMA Combined with SU-MIMO for Future LTE Enhancements”, IEEE, GC Workshops, pp.706-710, 2014.
- [4] Andrea S. Marcano and Henrik L. Christiansen, “Impact of NOMA on Network Capacity Dimensioning for 5G HetNets”, IEEE Access vol.6 pp.13587-13603, 2018.
- [5] 3GPP TR 38.901 V16.1.0 (2019-12), “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 16)”, p77[TDL-A]
- [6] NTT DOCOMO,テクニカル・ジャーナル Vol26 No.1,pp.6-15 Apr. 2018.
- [7] 服部,藤岡,インプレス標準教科書シリーズ 5G教科書 LTE/IoT から5G まで,株式会社インプレス,pp.126-127,2018.
- [8] 明山,伊藤他,電波伝搬ハンドブック,リアライズ社,1999.
- [9] 野本,ワイヤレス基礎理論,電子情報通信学会,pp.155-157,2003.
- [10] 皆本,すっきりわかる確率統計-定理の詳しい証明つき-,近代科学社,p.32,2015.
- [11] 神谷,MATLAB によるデジタル無線通信技術,コロナ社,2008.
- [12] Fei L. Marina P. “Performance of Proportional Fair Scheduling for Downlink PD-NOMA Networks”, IEEE, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol.17 Issue 10 pp.7027-7039, Oct. 2018.
- [13] 赤岩,デジタル移動通信技術のすべて,コロナ社,2013.
- [14] David T. Pramod V. “Fundamentals of Wireless Communication”, Cambridge University Press, pp.361-362, pp.429-430, 2005.
- [15] Houman Z. “Understanding LTE with MATLAB - From Mathematical modeling to simulation and prototyping”, WILEY, pp.230-233, 2014.
- [16] Zuhura A. Nor K. Noordin. Aduwati S. Fazirulhisyam H. Mohammed B. “An Efficient Method for Resource Allocation and User Pairing in Downlink Non-orthogonal Multiple Access System”, IEEE ,2019 IEEE 14th MICC,pp.124-129,2019.
- [17] 3GPP TR 36.302 V13.2.0 (2016-06), “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA); Services provided by the physical layer; (Release 13)”
- [18] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#83, R1-157558, Anaheim, USA,15th-22nd Nov.2015.
- [19] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#83, R1-157748, Anaheim, USA,16th-20th Nov.2015.
- [20] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#83, R1-156719, Anaheim, US, 15th-22nd Nov.2015.
- [21] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#83, R1-157541, Anaheim, USA, 15th-22nd Nov.2015.
- [22] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting#83, R1-157352, Anaheim, USA, 15th-22nd Nov.2015.
- [23] 小林岳彦監訳 ; 岩切直彦ほか 訳, ワイヤレス通信工学 : 基礎理論から MIMO, OFDM, アドホックネットワークまで,丸善,p130,2007.