

シングルセルにおけるNOMA通信容量の導出に関する一検討

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	54
号	1
ページ	21-24
発行年	2020-02
URL	http://id.nii.ac.jp/1204/00024156/

シングルセルにおける NOMA 通信容量の導出に関する一検討

Study on Derivation of NOMA Channel Capacity in a Single Cell

石井 洋平* 鈴木 利則* 吉川 英機*
Yohei Ishii Toshinori Suzuki Hideki Yoshikawa

Abstract: Recently, there has been a rapid increase in wireless communication terminals, such as IoT devices and mobile terminals, and it is expected that NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access) will be employed to address this increase, as it can improve the efficiency of frequency utilization in the downlink. In NOMA, it is known that the transmission power allocated to paired users has a significant effect on its characteristics, and in previous studies, the allocation was both variable and fixed. However, the characteristics of these transmission power allocation methods have not been clarified.

In this study, we have elucidated the characteristics of the two types of transmission power allocation methods in NOMA, which have been demonstrated in previous studies, by unifying the environment and using theoretical calculations and simulations to evaluate the average throughput characteristics of users in the cell.

Keywords: NOMA, Power Allocation, Single Cell, Dynamic Allocation

1. はじめに

近年,スマートフォンや IoT(Internet of Things)などの無線通信端末の急激な増加に対処するため,通信容量を増加することが期待できる NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access)[1]-[4]の活用が注目されている. NOMA は複数のユーザを同一リソース上で送信電力の大きさに差を与えることにより多重化し,既存の周波数帯の利用効率を向上させることができる.

先行研究[1][2]では,それぞれ下りリンクで NOMA の送信電力割り当てを固定する場合と可変にする場合で検討を進めている.しかしながら,送信電力割り当て方法の違いによる特性の差は明らかにされていない.そこで本研究では,環境を統一して,先行研究[1][2]で用いられている送信電力割り当て方法の違いによる特性の違いを明らかにする.ここで,通信容量は平均スループットの大きさとして定義して検討を進めていく.まず,セル内の平均スループット特性を理論計算と計算機シミュレーションを用いて比較し,シミュレーション結果の妥当性を確認する.さらに,ユーザ間のスループットのばらつき具合やスループットを確認し,送信電力割り当て方法を比較する.

2. NOMA における信号処理

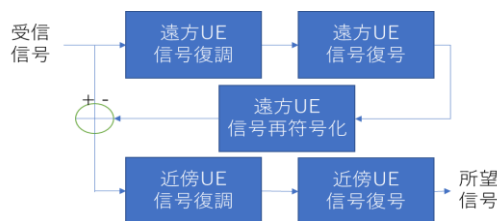


図 1 近傍 UE の受信処理

NOMA は基地局近傍に存在する受信品質の良い UE(User Equipment)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ペアリングし多重化を行う.本研究において,基地局近傍とは基地局から基準となるある範囲より内側の範囲,基地局遠方はその基準より外側からセル半径までの範囲と定義する.大きな電力を割り当てられている基地局遠方の UE は,近傍 UE 宛の信号による干渉を減衰の影響により無視して復調,復号を行うことで自局宛の信号を得ることができる.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,遠方 UE 宛の信号による干渉の影響を受け,そのままでは自局宛の正しい信号を得ることができない.そこで図 1 に示すように,基地局近傍の UE は干渉除去処理

* 東北学院大学大学院

[3]を行う必要がある。まず、基地局近傍の 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する。ここで得られた信号を再度符号化し、遠方 UE 宛の信号のレプリカを作成する。このレプリカを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。近傍 UE はこの干渉除去後の信号を復調、復号することで自局宛ての信号を得ることができる。

3. 平均スループットの導出

3.1 評価モデル

本研究では、図 2 に示すシングルセル環境を用いており、 r_1 は基地局-UE 間最小距離、 r_2 はセル半径、 r_0 は基地局近傍遠方境界距離を示している。ユーザはセル内 ($r_1 \leq r \leq r_2$) に一様に分布しており、 K 個すべてのユーザがチャンネルの割り当てを均等に受けるものとする。ユーザ数 K は十分に大きく、同一の帯域幅を同じ時間割合 ($2/K$) でチャンネルが割り当てられるとする。また、ユーザをパスロス順に並べたときの、 n 番目 ($1 \leq n \leq K/2$) の UE と ($n + K/2$) 番目の UE がペアリングされるものとしており、パスロスは距離減衰のみを想定する。

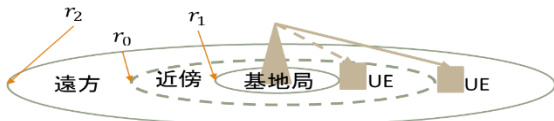


図 2 シングルセルモデル

3.2 理論解析

セル内ユーザの平均スループット理論値はユーザの密度を用いて求めることができ、以下に導出方法を示す。ユーザをパスロスの大きさで並べ、中央のユーザを基準に近傍と遠方に分けて近傍と遠方から 1 台ずつパスロスが小さい順にペアリングされるものとする、次の関係が成り立つ。

$$r'^2 - r_0^2 = r^2 - r_1^2 \quad (1)$$

r_0 は近傍 UE と遠方 UE の存在する面積が等しくなる距離であり、式(2)の関係があり式(3)で求めることができる。

$$r_2^2 - r_0^2 = r_0^2 - r_1^2 \quad (2)$$

$$r_0 = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}} \quad (3)$$

近傍 UE と遠方 UE のパスロスをそれぞれ x_1, x_2 , 割り当てる電力を P_1, P_2 , 雑音電力を N とすると、近傍 UE と遠方 UE の帯域幅 1 Hz 当たりのスループット R_1, R_2 は式(4), (5)で表す。[1][2]

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{P_1}{x_1 N} \right) \quad (4)$$

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P_2}{P_1 + x_2 N} \right) \quad (5)$$

パスロスは Walfisch-池上モデル[5]より距離 r, r' の関数として式(6), (7)で与える。ここで A, α は定数である。

$$x_1 = Ar^\alpha \quad (6)$$

$$x_2 = Ar'^\alpha \quad (7)$$

セルを輪状に広げたとき、微小距離区間 dr を用いて距離 r から $r + dr$ の範囲にいる近傍 UE の数は式(8)で、ペアとなる遠方 UE の数は式(9)で表すことができる。

$$\frac{2Kr}{r_2^2 - r_1^2} dr \quad (8)$$

$$\frac{2Kr'}{r_2^2 - r_1^2} dr' \quad (9)$$

式(1)より式(9)は式(8)に一致する。これよりセル全体で平均した UE1 台当たりのスループット \bar{R} は式(10)で求めることができる。

$$\begin{aligned} \bar{R} &= \frac{1}{K} \left(\int_{r_1}^{r_0} R_1(r) \frac{2Kr}{r_2^2 - r_1^2} dr + \int_{r_0}^{r_2} R_2(r') \frac{2Kr'}{r_2^2 - r_1^2} dr' \right) \\ &= \frac{2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_0} r (R_1(r) + R_2(r)) dr \quad (10) \end{aligned}$$

ここで、今回 NOMA の送信電力 P_1, P_2 の割り当ては先行研究より、

(a) 近傍:遠方の電力の比が 1:4 になるよう割り当てる。[1]

(b) ペアを組んでいる UE のスループットが等しくなるよう割り当てる。[2]

の 2 ケースを想定している。

(a) のケースは式(4), (5)に含まれる送信電力を $P_1 = P/5, P_2 = 4P/5$ に固定することで求めることができる。

(b) のケースでは、近傍 UE と遠方 UE のスループットを等しくするため、式(4), (5)より送信電力 P_1, P_2 を式(11)より求める。

$$\frac{P_1}{ANr^\alpha} = \frac{P_2}{P_1 + ANr'^\alpha} \quad (11)$$

ここで $P_1 + P_2 = P$ とし、式(1), (6)を用いて変形する。

$$\frac{P_1}{ANr^\alpha} = \frac{P - P_1}{P_1 + AN \left(r^2 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right)^{\frac{\alpha}{2}}}$$

$$P_1^\alpha + AN \left\{ \left(r^2 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \right)^{\frac{\alpha}{2}} + r^\alpha \right\} P_1 - ANr^\alpha P = 0 \quad (12)$$

式(12)を P_1 について解くことで、距離 r に位置する近傍 UE とペアリングされた遠方 UE のスループットの値とその和を求めることができる。

$$R_1(r) + R_2(r) = 2 \log_2 \left[1 - \left(1 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r^2} \right)^{\frac{\alpha}{2}} + \sqrt{\left\{ 1 + \left(1 + \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r^2} \right)^{\frac{\alpha}{2}} \right\}^2 + \frac{4P}{ANr^\alpha}} \right] - 2 \quad (13)$$

式(13)を式(10)に代入し積分を行うことで、送信電力を可変にしたときの平均スループットの理論値を求めることができる。

4. 評価

4.1 評価パラメータ

ここでは、パスロスを与える係数 A と α は中小都市における 2GHz 帯の特性を想定して $A = 10^{13.85336}$, $\alpha = 3.8$ に設定する。基地局-UE 最小距離 r_1 は 25m, セル半径 r_2 は 50m 刻みで 50m から 500m まで広げて検討を行った。また、シミュレーションにおいては、スループットの十分な平均をとるためにサンプル端末を 1 万とした。全てのユーザがペアを組めると仮定し、近傍 UE と遠方 UE それぞれのスループットは式(4), (5)から求めることができる。ここで、雑音電力 N は -100 [dBm] [6], ペアに与える送信電力の和 P は 1[W]とした。これらのパラメータを式(11), (13)に代入することによってスループットの理論値を求めることができ、式(4), (5)に代入し平均をとることでスループットのシミュレーション値を求めることができる。

4.2 評価結果

4.2.1 平均スループット

セル半径と平均スループットの関係を図3に示す。結果より、理論値とシミュレーション値が一致していることが分かる。また、セル半径を広げたとき、送信電力の比を 1:4 に固定して割り当てた場合の方が高い平均スループットを記録していることが分かる。ペアのスループットを等しくする割り当てと比較したとき、最大セル半径 500m でおよそ 20%高い値をとることが分かった。

4.2.2 ユーザ間のスループットの散らばり

ユーザのスループットのばらつき具合は平均値に対するデータのばらつきを測る変動係数を用いて比較し、シミュレーション結果を図4に示す。変動係数は標準偏差を平均値で除算することで算出した[7]。結果より、送信電力の比を 1:4 に固定して割り当てた場合、変動係数が高い値をとっており、ユーザへの公平性が保

てていないことが分かる。また同図より、セル半径が 250m のときに変動係数が最小となることが分かった。一方、ペアのスループットを等しくする割り当ての場合は、セル半径が広がるにつれて単調増加を示していることが分かる。これはセル半径が広がるほど、基地局近傍のユーザと境界周辺のユーザ、および遠方ユーザのスループットの差が開いていくためと考えることができる。

4.2.3 スループットの分布

セル半径を 100m, 250m, 500m に変更した場合のそれぞれの電力割り当てにおけるユーザのスループット分布のシミュレーション結果を図5, 6に示す。どちらの割り当ても、基地局近傍と遠方の境界でグラフの形が変化していることが分かる。ここで、図5のシミュレーション結果について送信電力の比を固定したとき、セル半径が 100m と 250m のとき、近傍 UE の分布はセル半径 500m の近傍 UE の分布と重なっている。送信電力の比を 1:4 に固定して割り当てたときは図5に示すようにセル半径が広がるに連れて、境界付近にいるユーザのスループットの差が小さくなっている。この差が小さくなっていく過程で変動係数が最小になる点が存在する。また、セル半径を 500m まで広げたとき、近傍 UE よりも一部の遠方 UE の方が高いスループットを記録していることが分かる。これは、パスロスによって、小さい電力が割り当てられている近傍 UE のスループットが低下しており、大きな電力が割り当てられている遠方 UE が受ける近傍 UE からの干渉が小さくなったためと考えることができる。

ペアになっているユーザ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た場合は図6に示すように、送信電力の比を 1:4 で固定した場合と比べて高いスループットを記録しているユーザが少ないことが分かる。これはペアリングされているユーザのスループットを等しくするため、遠方 UE に割り当てる送信電力が大きくなり、近傍 UE に十分な送信電力が割り当てられていないためと考えられる。

5. おわりに

本研究では、先行研究[1][2]で用いられている送信電力割り当て方法の違いによる性能の差について、環境をシングルセルに統一し、平均スループット特性を理論計算と計算機シミュレーションを用いて比較した。また、シミュレーション結果の妥当性を示すためにユーザ間のスループットのばらつき具合やスループット

分布を確認することで,どちらの方法が優れるか検討を行った。

平均スループット特性を比較したとき,送信電力の比を 1:4 に固定した場合の方が,ペアのスループットが等しくなるように電力を割り当てた場合よりも最大で 20%程度高い値を示すことが分かった.ペアになっているユーザーのスループットが等しくなるように電力を割り当てたとき,送信電力の比を 1:4 に固定したときと比較して変動係数が総じて低い値を示しており,分布からもスループットの高いユーザーと低いユーザーの差は小さく,ユーザーへの公平性が高いということがわかる.また,送信電力の比を 1:4 に固定し割り当てたとき,セル半径を広げるほど境界付近に存在するユーザーのスループットの差が小さくなり,やがて逆転するということが分かった。

本研究の条件の下で,ユーザーへのスループットを優先する場合は,送信電力の比を固定して割り当てることで達成でき,ユーザーの公平性を優先する場合は,ペアリングされているユーザー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ることで達成できる。

今後の課題として,実際のマルチセル環境に近づけた場合,隣接セルからの干渉の影響を抑えてスループットの低下を小さくすることができるか,ペアリング方法や送信電力の割り当て方法について検討していく必要がある。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Andrea S. Marciano and Henrik L. Christiansen, "Impact of NOMA on Network Capacity Dimensioning for 5G HetNets", IEEE Access vol.6 pp.13587-13603,2018.
- [3] NTT DOCOMO,テクニカル・ジャーナル Vol26 No.1,pp.6-15 Apr. 2018.
- [4] 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.
- [5] 明山,伊藤他,電波伝搬ハンドブック,リアライズ社,1999.
- [6] 野本,ワイヤレス基礎理論,電子情報通信学会,pp.155-157,2003.
- [7] 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.

[8] 神谷,MATLAB によるデジタル無線通信技術,コロナ社,2008.

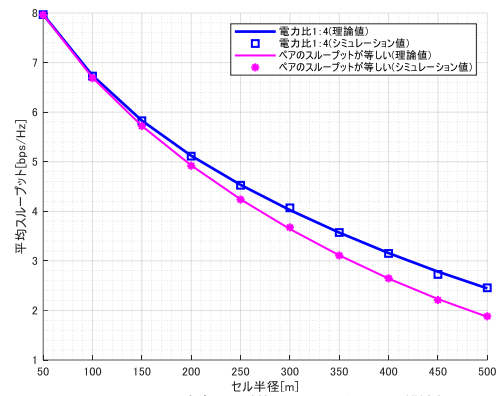


図 3 セル半径と平均スループットの関係

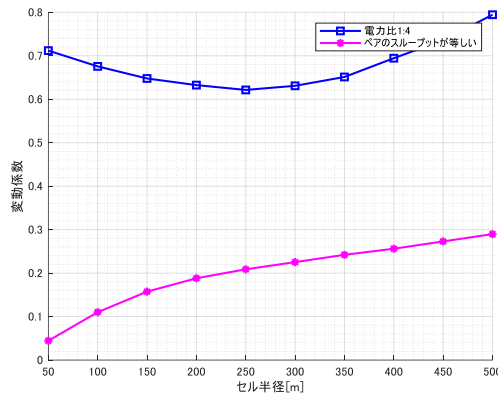


図 4 セル半径とユーザースループットのばらつき具合の関係

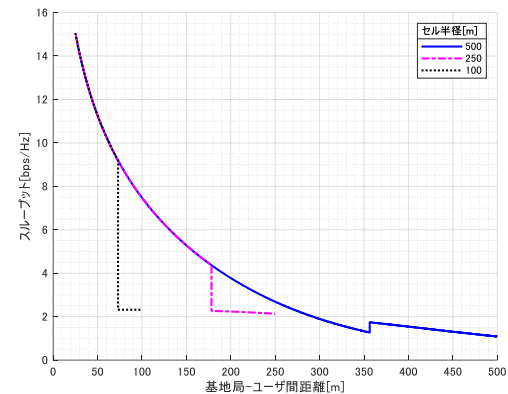


図 5 ユーザの位置とスループットの関係(電力比 1:4)

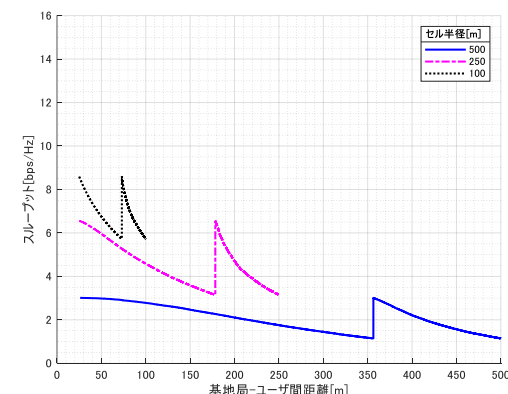


図 6 ユーザの位置とスループットの関係 (ペアのスループットが等しい)