

非理想连续干扰消除下非正交多址接入上行传输系统性能分析

王夕予*^① 许晓明^② 陈亚军^②

^①(南京大学金陵学院基础部 南京 210019)

^②(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450000)

摘要: 非正交多址接入(NOMA)技术允许多个发送方共用同一个资源块,接收方通过连续干扰消除(SIC)解码出不同发送方的信息。然而,目前针对NOMA系统的研究大多基于理想SIC的假设,而没有考虑非理想SIC对系统性能带来的影响。针对此问题,该文在非理想SIC的假设下,针对单小区上行NOMA系统提出一套性能分析框架。首先,采用二项式点过程(BPP)对上行NOMA系统中基站和用户设备的空间分布进行建模。基于此模型,采用基于大尺度衰落的干扰消除顺序,对干扰消除的误差情况进行分析。进一步,基于随机几何理论和次序统计理论,推导出距基站由近至远次序为 k 的用户设备的覆盖概率,并采用平均覆盖概率衡量整个NOMA传输系统的可靠性。理论和仿真结果分析了远近次序、基站半径和发射功率等系统参数对传输可靠性的影响,并验证了理论推导的准确性。

关键词: 非正交多址接入; 连续干扰消除; 上行传输; 覆盖概率

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)12-2795-07

DOI: 10.11999/JEIT181165

Performances Analysis in Uplink Non-Orthogonal Multiple Access System with Imperfect Successive Interference Cancellation

WANG Xiyu^① Xu Xiaoming^② CHEN Yajun^②

^①(Foundation of Jinling College, Nanjing University, Nanjing 210019, China)

^②(National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) serves multiple transmitters using the same resource block, and the receiver decodes the information from different transmitters through Successive Interference Cancellation (SIC). However, most of the researches on NOMA systems are based on perfect SIC assumption, in which the impact of imperfect SIC on NOMA system is not considered. Focusing on this problem, a framework is provided to analyze the performance of single-cell uplink NOMA system under the assumption of imperfect SIC. Firstly, the Binomial Point Process (BPP) is used to model the spatial distribution of base station and user equipment in uplink NOMA system. Based on this model, the interference cancellation order which is based on large-scale fading is adopted, and then the error of interference cancellation is analyzed. Then, based on stochastic geometry theory and order statistics theory, the expression of coverage probability of user equipment which is at rank k in terms of the distance from the base station is derived, besides, the average coverage probability is adopted to reflect the reliability of NOMA transmission system. The analytical and simulation results show the influence of system parameters such as distance order and base station radius on transmission reliability. Also, the validity of theoretical deduction is verified.

Key words: Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA); Successive Interference Cancellation (SIC); Uplink transmission; Coverage probability

1 引言

目前为止,正交多址技术(Orthogonal Multiple

Access, OMA)广泛应用于无线通信中,如频分多址、时分多址、码分多址、正交频分多址等^[1,2]。在OMA中,同一小区内用户间不会相互干扰,因此接收方能够直接解码出接收的信号。然而,基站(Base Station, BS)能够服务的用户设备(User Equipment, UE)数目也受到有限的正交资源块的限制。作为5G通信系统中的重要多址方式,非正

收稿日期: 2018-12-19; 改回日期: 2019-04-30; 网络出版: 2019-05-07

*通信作者: 王夕予 wxy_nj@aliyun.com

基金项目: 国家自然科学基金(61501516, 61601514)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61501516, 61601514)

交多址技术(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)允许BS使用同一个资源块服务多个UE,但是同小区中使用相同资源块的UE之间会产生干扰。为了最小化用户间干扰的影响,接收方会使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术^[3,4]。NOMA技术一方面能够提高频谱使用效率,另一方面可简化随机接入过程,减少空口时延和信令开销^[5],因此在5G通信系统中将有着举足轻重的地位。

目前,NOMA技术在学术界已经受到了广泛的关注。针对下行NOMA系统,文献^[6]以用户公平性为目标,对功率分配进行设计;文献^[7]在单小区场景中,研究了用户分组策略对系统性能的影响。该文献指出,共用资源块的UE间的信道差异越大,NOMA系统获得的增益也越大。针对上行NOMA系统,文献^[8]对单小区场景NOMA系统性能进行分析。文献^[9]基于2用户NOMA传输提出一种动态功率分配策略,以满足不同的通信服务质量(Quality of Service, QoS)。然而,在现有大多文献^[6-9]中,仅考虑理想SIC的情况,即接收方能够完美消除NOMA传输带来的用户间干扰。

在实际NOMA上行通信系统中,BS需要根据接收到的UE信号强度之间的差异进行SIC,从而最小化共用资源块带来的用户间干扰。但是,当接收到不同的UE信号强度的差异较小时,SIC便极可能发送错误,甚至产生误差传播效应^[10],对整个通信系统的性能带来巨大影响。因此,为了准确刻画NOMA上行通信系统的性能,必须要考虑非理想SIC给系统带来的影响。文献^[11]对功率控制策略下上行NOMA传输系统的性能进行分析,并考虑了SIC出现错误的情况。但是,该文献仅考虑2个UE共用一个资源块的情况,关于SIC误差的分析比较简单,无法推广到更加一般的NOMA传输场景,即 M 个UE共有一个资源块的场景。

针对以上问题,本文从实际单小区NOMA上行传输场景出发,提出了一套分析非理想SIC下上行NOMA通信系统性能的理论分析框架。本文主要贡献如下:(1)使用次序统计与随机几何理论,对 M 个UE的上行NOMA传输系统进行建模,并推导出距BS第 k 近的UE的覆盖概率;同时,采用平均覆盖概率刻画整个系统的通信性能。(2)考虑非理想SIC的情况,分析SIC在不同阶段产生错误的可能性,并将其带来的干扰进行建模,以定量刻画非理想SIC对系统带来的影响。(3)通过仿真验证了理论推导的正确性,分析了UE距BS远近次序、小

区半径和发射功率等系统关键参数对NOMA传输性能的影响,并发现在非理想SIC下,当BS半径较大时,NOMA系统相比于OMA系统的性能增益较为明显。

2 系统模型

2.1 网络拓扑与信道模型

在上行NOMA传输系统中,针对一个典型小区展开研究,如图1所示。假设单天线BS b 位于平面内,单天线UE均匀分布在以 b 为圆心、 R 为半径的圆内。UE到BS距离用 r 表示,则 r 的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)可表示为 $f_r(r) = 2r/R^2, r \in (0, R)$ 。UE在上行传输时,会随机对无线资源块进行选择^[5]。不失一般性地,针对一个特定资源块进行分析,并假设有 M 个UE共用此资源块。针对典型资源块,由于UE选择资源块的随机性,该资源块中每个UE位置分布相互独立且仍服从均匀分布,即 M 个UE的位置分布 φ_u 可视为二项式点过程(Binomial Point Process, BPP)^[12]。

对于无线信道,假设信号会受到大尺度衰落和小尺度衰落。其中,大尺度衰落主要由路径损耗造成,假设其仅与传输距离有关,且衰落系数为 α ;对于小尺度衰落,假设其满足瑞利块衰落模型,即在信道相干时间内,小尺度衰落的信道增益服从均值为1的负指数分布,在不同相干时间或者不同信道之间,小尺度衰落相互独立。对于信道中的热噪声 N ,假设其服从均值为0方差为 δ^2 的复高斯分布。

2.2 NOMA上行传输

在上行传输时, M 个UE使用同一个正交资源块向BS发送信号。由于不同UE到BS的距离不同,BS接收到不同UE的信号强度也不同。利用接收信号强度的差异,BS能够使用SIC技术减少用户之间的干扰。具体来说,BS会首先对接收信号强度最大的UE信号进行解码,此时,BS将其他UE的信号

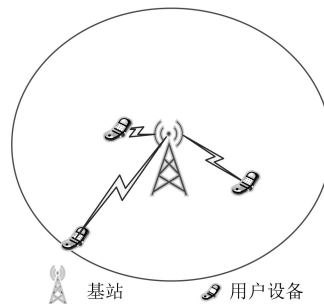


图1 单小区NOMA上行传输示意图

当作干扰。然后，BS将解码出的信息恢复为模拟信号，并从接收到的总体信号中将该部分信号消除。以此类推，在SIC不发生错误的情况下，解码接收信号强度最大的UE信号受到的用户间干扰最大，解码接收信号强度最小的信号时不会受到用户间干扰。但是，如果BS解码某个UE信息发生错误时，则无法将该UE的信号消除，在后续的解码中都会受到此UE信号的干扰，这也被称为SIC中的误差传播^[10]。

2.3 网络性能指标

为了对NOMA上行传输系统的性能进行刻画，采用覆盖概率对传输链路的可靠性进行刻画。对于覆盖概率，其定义为UE与BS间信道信道容量大于该UE目标传输速率的概率^[13]。数学上，对于UE u_i 的覆盖概率可表示为

$$p_i = P(\log_2(1 + \text{SINR}_i) > R_b) \quad (1)$$

其中， SINR_i 表示BS处 u_i 信号的信干噪比(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)， R_b 表示目标传输速率。

在已知每个UE覆盖概率的基础上，可以求出一个资源块内所有UE的平均覆盖概率，以此进一步衡量整个NOMA传输系统的通信性能。数学上，平均覆盖概率可表示为

$$p_c = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M p_i \quad (2)$$

3 干扰消除分析

3.1 干扰消除顺序

传统关于NOMA传输系统的研究中，一般根据接收端对不同UE接收信号强度的估计值大小确定SIC的干扰消除顺序，并仅考虑理想的SIC场景，如文献^[8,13]。然而，在实际通信系统中，接收端估计接收信号强度需要对信道的大尺度衰落和小尺度衰落进行探测，其中，对小尺度衰落的探测会带来巨大的信令开销。考虑到信道路径损耗对接收信号强度带来的影响远大于信道小尺度衰落带来的影响，本文考虑使用UE到服务基站 b 的距离远近作为SIC先后顺序的依据^[14]。具体来说，假设UE到 b 从近到远分别为 u_1, u_2, \dots, u_M ，到 b 的距离分别用 d_1, d_2, \dots, d_M 表示。 b 会首先解调 u_1 的信号，最后解调 u_M 的信号。需要指出的是，此SIC策略忽略了小尺度衰落对接收信号的影响，虽然可能会增加SIC的误差，但大大减少了信令开销，更加符合实际的NOMA传输系统。

3.2 非理想SIC与消除概率

在对 $u_k, 1 \leq k \leq M$ 信号进行解调时，需要先消除来自 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 的信号，并将来自 $u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_M$ 的信号作为干扰。在理想SIC下， u_k 仅会受到来自 $u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_M$ 的干扰。用 $h_{n_1 n_2}$ 表示 n_1 和 n_2 间的信道小尺度衰落， I_k 表示理想情况下 u_k 的用户间干扰，假设所有UE发射功率都是 P_u ，则 I_k 可表示为

$$I_k = \sum_{i=k+1}^M P_u h_{u_i b} d_i^{-\alpha} \quad (3)$$

然而，由于实际中BS侧SIC能力的限制， b 对于 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 信号的消除也可能存在误差。因此，在非理想SIC的条件下，BS不仅会受到 I_k 的影响，还会受到来自 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 信号的干扰。为了对非理想SIC条件下的用户间干扰进行刻画，定义消除概率 $p_{(i)}$ 为SIC时成功消除 u_i 信号的概率。对于某个UE，假设其SINR大于某阈值时，BS在SIC时可以成功消除该UE的信息。首先，考虑 u_1, u_2, u_3 信号的消除概率。然后，再推导至一般的情况，求出 u_k 信号的消除概率。 $p_{(i)}, i = 1, 2, 3$ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} p_{(1)} &= P\left(\frac{y_1}{I_1 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ p_{(2)} &= p_{(1)}P\left(\frac{y_2}{I_2 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ &\quad + \bar{p}_{(1)}P\left(\frac{y_2}{y_1 + I_2 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ p_{(3)} &= p_{(1)}p_{(2)}P\left(\frac{y_3}{I_3 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ &\quad + \bar{p}_{(1)}p_{(2)}P\left(\frac{y_3}{y_1 + I_3 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ &\quad + p_{(1)}\bar{p}_{(2)}P\left(\frac{y_3}{y_2 + I_3 + \delta^2} \geq \theta\right) \\ &\quad + \bar{p}_{(1)}\bar{p}_{(2)}P\left(\frac{y_3}{y_1 + y_2 + I_3 + \delta^2} \geq \theta\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中， $P(\cdot)$ 表示事件发生的概率， $y_i = P_u h_{u_i b} d_i^{-\alpha}$ 表示 b 接收到来自 u_i 的信号， θ 表示干扰消除门限。由式(4)可得， u_k 信号的消除概率需要考虑 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 信号是否被成功消除，共有 2^{k-1} 种可能性。用 $c(i), i = 1, 2, \dots, k-1$ 表示 u_i 的信号是否被成功消除，若 u_i 的信号被成功消除，则 $c(i) = 1$ ；否则 $c(i) = 0$ 。根据上述分析， u_k 的消除概率 $p_{(k)}$ 可表示为

$$p(k) = \sum_{c \in \mathcal{B}} \left(\sum_{i=1}^{k-1} \bar{p}^{(i)} (1-c^{(i)}) p^{(i)} c^{(i)} \right) \cdot \mathcal{P} \left(\frac{y_k}{\sum_{i=1}^{k-1} (1-c^{(i)}) y_i + I_k + \delta^2} \geq \theta \right) \quad (5)$$

其中, \mathcal{B} 表示 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 信号解调成功与否所有可能情况的集合, 共有 2^{k-1} 个元素。

对于某个 u_1, u_2, \dots, u_{k-1} 的解调情况 $c^* \in \mathcal{B}$, 用 $I_k^{c^*}$ 表示 u_k 由于SIC误差带来的干扰, 则

$$I_k^{c^*} = \sum_{i=1}^{k-1} (1-c^*(i)) y_i \quad (6)$$

综合考虑理想SIC情况下的干扰 I_k 以及非理想SIC带来的干扰 $I_k^{c^*}$, u_k 的SINR可表示为

$$\text{SINR}_k^{c^*} = \frac{y_k}{I_k^{c^*} + I_k + \delta^2} \quad (7)$$

4 系统性能分析

为了定量分析NOMA上行传输系统的通信性能, 对不同UE的覆盖概率进行研究。同时, 分析中也考虑了非理想SIC带来的影响。对于 u_k , 其主要受到以下两种干扰: NOMA传输确定会带来的用户间干扰 I_k 和非理想SIC带来的干扰 $I_k^{c^*}$ 。这些干扰会对信息的传输带来巨大的影响。为了定量刻画这些干扰带来的影响, 得出覆盖概率的表达式, 需要首先对这些干扰的拉普拉斯变换进行推导^[15]。

命题1 在给定 $d_k = r$ 的条件下, 干扰 I_k 的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_k}(s)$ 可表示为

$$\mathcal{L}_{I_k}(s) = \left(\frac{F(R) - F(r)}{sP_u \left(\frac{\alpha}{2} + 1 \right) (R^2 - r^2)} \right)^{M-k} \quad (8)$$

其中

$$F(r) = r^{2+\alpha} {}_2F_1 \left[1, 1 + \frac{2}{\alpha}, 2 + \frac{2}{\alpha}, -\frac{r^\alpha}{sP_u} \right] \quad (9)$$

命题1中, ${}_2F_1(\bullet)$ 表示高斯超几何函数。

证明 $\mathcal{L}_I(s) = \mathbb{E}_I(e^{-sI})$ 表示随机变量 I 关于 s 的拉普拉斯变换, 将式(3)代入该定义式中, $\mathcal{L}_I(s)$ 可进一步表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_k}(s) &= \mathbb{E}_{h_{u_i b}, d_i | r} \left[\exp \left(-s \sum_{i=k+1}^M P_u h_{u_i b} d_i \right) \right] \\ &\stackrel{(a)}{=} \prod_{i=k+1}^M \mathbb{E}_{d_i | r} \left[\frac{1}{1 + sP_u d_i^{-\alpha}} \right] \\ &\stackrel{(b)}{=} \left(\int_r^R \frac{1}{1 + sP_u r^{(j)-\alpha}} \frac{2r_j}{R^2 - r^2} dr^{(j)} \right)^{M-k} \quad (10) \end{aligned}$$

其中, 步骤(a)由于不同信道小尺度衰落相互独立且服从均值为1的指数分布, 步骤(b)由 $d_k = r$ 的条件下 $d_i (k < i \leq M)$ 的概率密度函数可得。将式(10)进行积分, 便可得命题1中 $\mathcal{L}_I(s)$ 得闭式表达式。

证毕

命题2 在给定 $d_k = r$ 的条件下, 干扰 $I_k^{c^*}$ 的拉普拉斯变换 $\mathcal{L}_{I_k^{c^*}}(s)$ 可表示为

$$\mathcal{L}_{I_k^{c^*}}(s) = \prod_{i=1}^{k-1} \left(\sum_{j=0}^{k-i-1} K(j) \frac{s^{\frac{2+2j}{\alpha}} B \left(-\frac{r^\alpha}{s}, 1 + \frac{2j+2}{\alpha}, 0 \right)}{r^{2(i+j)}} \right)^{1-c^*(i)} \quad (11)$$

其中

$$K(j) = \frac{2\Gamma(k) (-1)^{j-\frac{2+2j}{\alpha}-1}}{\Gamma(i) \Gamma(j+1) \Gamma(m-i-j) \alpha} \quad (12)$$

证明 将式(6)代入拉普拉斯定义式, $\mathcal{L}_{I_k^{c^*}}(s)$ 可进一步表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_k^{c^*}}(s) &= \mathbb{E}_{h_{u_i b}, d_i | r} \left[\exp \left(-s \sum_{i=1}^{k-1} (1-c^*(i)) P_u h_{u_i b} d_i^{-\alpha} \right) \right] \\ &\stackrel{(a)}{=} \prod_{i=1}^{k-1} \mathbb{E}_{d_i | r} \left[\frac{1}{1 + sP_u d_i^{-\alpha}} \right]^{(1-c^*(i))} \\ &\stackrel{(b)}{=} \prod_{i=1}^{k-1} \left(\int_0^r \frac{1}{1 + sP_u r^{(i)-\alpha}} f_{d_i}(r^{(i)} | d_k = r) dr^{(i)} \right)^{(1-c^*(i))} \quad (13) \end{aligned}$$

其中, 步骤(a)由于不同信道小尺度衰落相互独立且服从均值为1的指数分布, 步骤(b)中 $f_{d_i}(r^{(i)} | d_k = r)$ 表示在 $d_k = r$ 的基础上, 距BS更近的UE $u_i (1 \leq i < k)$ 到BS距离 d_i 的PDF。根据次序统计量的理论^[16], 该PDF可表示为

$$f_{d_i}(r^{(i)} | d_k = r) = \frac{2\Gamma(k) (r^2 - r^{(i)2})^{k-i-1} (r^{(i)})^{2i-1}}{\Gamma(k-i) \Gamma(i) r^{2k-2}} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13)中, 根据文献[10]中的式子并进行二项式展开, 便可得到命题2中的结论。证毕

已知干扰 I_k 与 $I_k^{c^*}$ 的拉普拉斯变换后, 可以进一步求出覆盖概率的表达式, 如命题3所示。

命题3 对于 u_k , 非理想SIC下其覆盖概率可由式(15)表示

$$p_{c^*,k}^I = \int_0^R \exp\left(-\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha\delta^2}{P_u}\right) \cdot \mathcal{L}_{I_k}\left(\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha}{P_u}\right) \mathcal{L}_{I_{im}^k}\left(\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha}{P_u}\right) \cdot f_{d_k}(r) dr \quad (15)$$

其中

$$f_{d_k}(r) = \frac{2}{R} \frac{\Gamma\left(k + \frac{1}{2}\right) \Gamma(N+1)}{\Gamma(k) \Gamma\left(N + \frac{3}{2}\right)} \cdot \beta\left(\frac{r^2}{R^2}; k + \frac{1}{2}; N - k + 1\right) \quad (16)$$

$\mathcal{L}_{I_k}(\cdot)$ 与 $\mathcal{L}_{I_k^c}(\cdot)$ 由命题1与命题2可得。

证明 将式(7)代入式(1)中,覆盖概率 $p_{c^*,k}^I$ 可表示为

$$p_{c^*,k}^I = P\left(\frac{P_u h_{u_k b} d_k^{-\alpha}}{I_k^c + I_k + \delta^2} > 2^{R_b} - 1\right) = \int_0^R P\left(h_{u_k b} > \underbrace{\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha}{P_u} (I_k^c + I_k + \delta^2)}_A\right) \cdot f_{d_k}(r) dr \quad (17)$$

其中, $f_{d_k}(r)$ 表示 u_k 到 b 距离的概率密度函数。根据BPP的性质,可以获得 $f_{d_k}(r)$ 的闭式表达式。具体来说,对于一个圆内随机分布的 M 个节点,到圆心第 k 远的点,其到圆心距离的概率密度函数服从beta分布,具体表达式如式(16)所示^[17]。考虑到瑞利小尺度衰落 $h_{u_k b}$ 信道增益服从均值为1的负指数分布, A 可进一步表示为^[11,12]

$$A = \exp(-c_0 \delta^2) \mathcal{L}_{I_k}(c_0) \mathcal{L}_{I_{im}^k}(c_0) \quad (18)$$

其中, $c_0 = P_u^{-1} (2^{R_b} - 1) r^\alpha$ 。将式(18)代入式(17)中,便可得命题3中覆盖概率的表达式。证毕

说明1 需要指出的是,命题3中覆盖概率的表达式指的是在某种干扰消除情况 $c^* \in \mathcal{B}$ 下的覆盖概率。对于非理想SIC下整体覆盖概率的平均值,可由式(19)表示

$$p_k^I = \sum_{c \in \mathcal{B}} \left(\prod_{i=1}^{k-1} \bar{p}_{(i)}^{(1-c(i))} p_{(i)}^{c(i)} \right) p_{c,k}^I \quad (19)$$

为了与理想SIC下NOMA系统和OMA系统的覆盖性能进行对比,在命题3的基础上,我们可以得到以下推论。

推论1 在理想SIC的条件下,解调 u_k 信号时仅

会受到距BS更远的UE的干扰 I_k 。此时可将 I_k^c 的值视为0。因此,理想SIC下覆盖概率可表示为

$$p_k^P = \int_0^R \exp\left(-\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha\delta^2}{P_u}\right) \cdot \mathcal{L}_{I_k}\left(\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha}{P_u}\right) f_{d_k}(r) dr \quad (20)$$

推论2 在正交多址系统中,由于不同用户使用的资源块相互正交,数据传输中不会产生用户间干扰,只会受到热噪声的影响。因此,覆盖概率可表示为

$$p_k^{\text{oma}} = \int_0^R \exp\left(-\frac{(2^{R_b}-1)r^\alpha\delta^2}{P_u}\right) f_r(r) dr \quad (21)$$

在已知各个UE覆盖概率的基础上,将其代入式(2),便可得到平均覆盖概率。对于OMA系统,由1个资源块内仅有1个UE,因此其覆盖概率即为其平均覆盖概率。

5 数值仿真

本节对NOMA上行传输系统性能进行数值仿真,分析关键网络参数对通信性能带来的影响。本文中,用干扰消除门限代表基站的SIC能力,假设干扰消除解码门限 θ 为0dB^[10]。仿真中系统预设参数如下:路径损耗参数 $\alpha=4$,热噪声功率密度 $\delta^2=10^{-14}$ W/Hz,UE发射功率 $P_u=2$ W,目标传输速率 $R_b=1$ bit/s,复用一个资源块的UE数 $M=6$ ^[10]。

首先,针对用户序号 k 对覆盖概率的影响进行分析。其中,用户序号 k 用于标识UE距BS由近至远的排列顺序。如图2所示,随着用户序号 k 的增大,理想SIC下的覆盖概率先减小后增大,距BS最远的UE(用户序号 $k=6$)通信可靠性最强。其原因

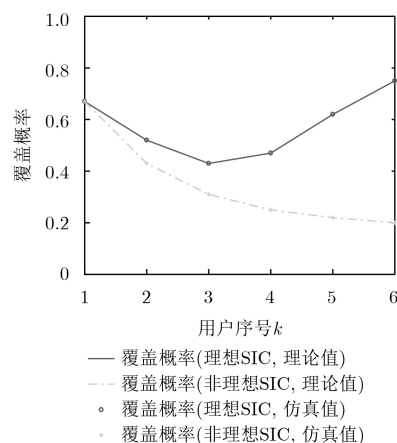


图2 覆盖概率随用户序号 k 的变化

是该UE为距BS最远的UE时,理想条件下可以通过SIC消除同一资源块内其他UE的干扰。因此,即使经历的路径损耗最大,仍能够获得可靠的通信性能。然而,在非理想SIC条件下,覆盖概率随着用户序号 k 的增大而减小。其原因是UE距BS越远,信号经历的路径损耗便越大;同时,BS解码其信号的顺序也越靠后,BS对其之前UE信号的解码结果也会对其信号的解码产生影响。通过图2可以发现,在实际NOMA通信系统中,UE距BS越近,其通信的可靠性越强。该结论指出了基于理想SIC下分析产生的误差,并为实际NOMA系统的设计提供更加准确的理论基础。

然后,对NOMA系统与OMA系统的平均覆盖概率进行分析。图3对平均覆盖概率随BS半径的变化进行分析。当BS半径较小时,OMA传输的平均覆盖概率优于NOMA传输,这是因为BS半径较小时,复用资源块带来的用户间干扰会对NOMA传输系统带来较大的影响,而OMA系统不会受到用户间干扰的影响。当BS半径增加时,由于路径损耗的增加,OMA系统性能下降明显;然而,对于NOMA系统,其性能下降缓慢,这是因为路径损耗增加的影响和用户间干扰减小的影响相互抵消。因此,当BS半径大于一定值时,NOMA系统增益将变得十分明显。

图4对平均覆盖概率随着UE发射功率的变化进行分析。随着UE发射功率的变大,OMA传输系统的平均覆盖概率会增大。而对于NOMA传输系统,增加UE发射功率一方面使BS接收信号强度变大,另一方面也使NOMA传输带来的用户间干扰更加严重。由于以上两方面的影响,平均覆盖概率呈现出先增大后减小的趋势。同时,理想SIC假设下的最优发射功率会大于非理想假设下的最优发射

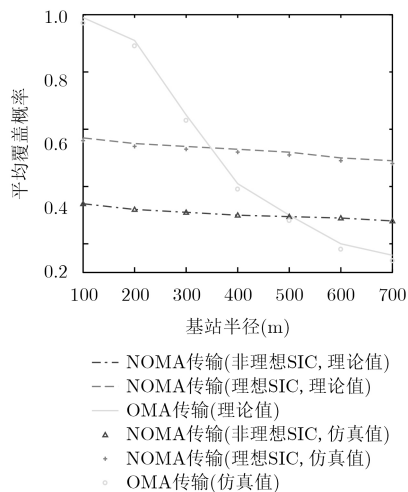


图3 平均覆盖概率随基站半径的变化

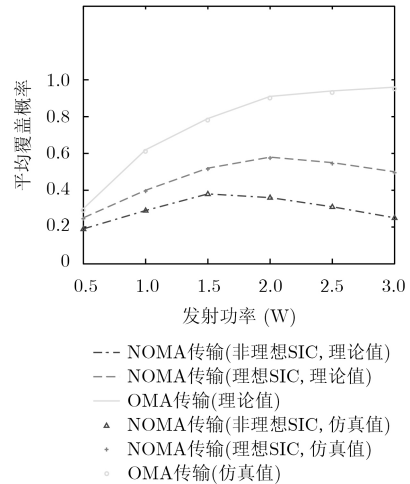


图4 平均覆盖概率随发射功率的变化

功率。本结论再次体现了理想SIC假设会给NOMA系统设计带来的巨大误差。

6 结束语

本文针对单小区NOMA上行通信场景,考虑非理想SIC带来的误差,提出一套 M 用户NOMA传输的理论分析框架。首先,采用BPP模型对BS和UE的空间分布进行建模。在此模型基础上,采用基于大尺度衰落的干扰消除方案,并对SIC误差进行分析。然后,根据随机几何理论和次序统计理论,对非理想SIC下NOMA传输带来的干扰进行分析,并求出其拉普拉斯变换表达式。在此基础上,进一步推导出距BS第 k 近的UE的覆盖概率;同时,采用平均覆盖概率刻画整个系统的通信性能。最后,通过蒙特卡洛仿真验证了推导的正确性,并发现在较大BS半径下,NOMA系统性能明显优于OMA系统。需要指出的是,本文仅针对单小区场景进行研究,没有考虑小区间干扰对系统性能带来的影响,多小区NOMA上行通信场景的性能分析将作为未来的工作。

参考文献

- [1] ZHANG Zekun, SUN Haijian, and HU R Q. Downlink and uplink non-orthogonal multiple access in a dense wireless network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(12): 2771–2784. doi: [10.1109/JSAC.2017.2724646](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2724646).
 - [2] 李钊, 戴晓琴, 陈柯宇, 等. 非正交多址接入下行链路用户匹配与功率优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).
- LI Zhao, DAI Xiaoqin, CHEN Keyu, et al. User matching and power optimization algorithm for downlink NOMA[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1804–1811. doi: [10.11999/JEIT161197](https://doi.org/10.11999/JEIT161197).

- [3] 宋康, 韦磊, 冀保峰, 等. 基于干扰消除的异构蜂窝网络中断分析[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 255–261. doi: [10.11999/JEIT150532](https://doi.org/10.11999/JEIT150532).
SONG Kang, WEI Lei, JI Baofeng, *et al.* Outage performance for heterogeneous cellular networks with interference cancellation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(2): 255–261. doi: [10.11999/JEIT150532](https://doi.org/10.11999/JEIT150532).
- [4] YANG Chenchen, WANG Xiaodong, XIA Bin, *et al.* Joint interference cancellation in cache- and SIC-enabled networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(9): 4155–4169. doi: [10.1109/TCOMM.2018.2821125](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2821125).
- [5] SHIRVANIMOGHADDAM M, DOHLER M, and JOHNSON S J. Massive non-orthogonal multiple access for cellular IoT: Potentials and limitations[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(9): 55–61. doi: [10.1109/MCOM.2017.1600618](https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600618).
- [6] TIMOTHEOU S and KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(10): 1647–1651. doi: [10.1109/LSP.2015.2417119](https://doi.org/10.1109/LSP.2015.2417119).
- [7] DING Zhiguo, FAN Pingzhi, and POOR H V. Impact of user pairing on 5G nonorthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(8): 6010–6023. doi: [10.1109/TVT.2015.2480766](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2480766).
- [8] ZHANG Ningbo, WANG Jing, KANG Guixia, *et al.* Uplink nonorthogonal multiple access in 5G systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(3): 458–461. doi: [10.1109/LCOMM.2016.2521374](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2521374).
- [9] YANG Zheng, DING Zhiguo, FAN Pingzhi, *et al.* A general power allocation scheme to guarantee quality of service in downlink and uplink NOMA systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(11): 7244–7257. doi: [10.1109/TWC.2016.2599521](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2599521).
- [10] TABASSUM H, HOSSAIN E, and HOSSAIN J. Modeling and analysis of uplink non-orthogonal multiple access in large-scale cellular networks using Poisson cluster processes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(8): 3555–3570. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2699180](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2699180).
- [11] ZHANG Zekun and HU R Q. Uplink non-orthogonal multiple access with fractional power control[C]. 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), San Francisco, USA, 2017: 1–6. doi: [10.1109/WCNC.2017.7925935](https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925935).
- [12] DING Zhiguo, YANG Zheng, FAN Pingzhi, *et al.* On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2014, 21(12): 1501–1505. doi: [10.1109/LSP.2014.2343971](https://doi.org/10.1109/LSP.2014.2343971).
- [13] HE Biao, LIU An, YANG Nan, *et al.* On the design of secure non-orthogonal multiple access systems[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(10): 2196–2206. doi: [10.1109/JSAC.2017.2725698](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2725698).
- [14] ZHANG Shuai, XU Xiaoming, WANG Huiming, *et al.* Enhancing the physical layer security of uplink non-orthogonal multiple access in cellular internet of things[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 58405–58417. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2875118](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2875118).
- [15] GANTI R K and HAENGGI M. Interference and outage in clustered wireless Ad hoc networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, 55(9): 4067–4086. doi: [10.1109/TIT.2009.2025543](https://doi.org/10.1109/TIT.2009.2025543).
- [16] RACHED N B, BOTEV Z, KAMMOUN A, *et al.* On the sum of order statistics and applications to wireless communication systems performances[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(11): 7801–7813. doi: [10.1109/TWC.2018.2871201](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2871201).
- [17] DAVID H A and NAGARAJA H N. Order Statistics[M], Hoboken: Wiley, 2003.

王夕予：女，1984年生，讲师，研究方向为新一代移动通信。

许晓明：男，1988年生，讲师，研究方向为无线通信及网络信息安全。

陈亚军：男，1989年生，助理研究员，研究方向为无线通信，物理层安全。