

文章编号:1007-5321(2018)03-0001-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2017-204

5G 大连接场景下混合多址随机接入

丁婷婷¹, 刘彦君², 张宁波¹, 康桂霞¹

(1. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876; 2. 后勤信息中心, 北京 100036)

摘要: 为了提高 5G 系统的终端接入数量,提出了一种混合多址随机接入机制,使终端能够根据预测的信噪比和预定义的切换门限选择正交多址或非正交多址的方式进行随机接入. 为了提高干扰消除接收机的性能,在非正交随机接入时采用功率回退的方法保证基站收到不同功率的叠加信号. 此外,理论分析了混合多址随机接入的接入性能,并给出了数值仿真结果和实际系统仿真结果. 仿真结果表明,与单一正交或非正交多址接入机制相比,混合多址接入大大提高了网络的终端接入数.

关键词: 海量连接; 混合多址接入; 随机接入; 功率回退

中图分类号: TN911.22

文献标志码: A

A Hybrid Random Access for Massive Connections in 5G systems

DING Ting-ting¹, LIU Yan-jun², ZHANG Ning-bo¹, KANG Gui-xia¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Logistics Information Center, Beijing 100036, China)

Abstract: In order to increase the number of access in the fifth-generation systems, a hybrid multiple random access (RA) scheme is proposed. The proposed scheme allows user equipments to select the orthogonal multiple access (OMA) RA or the non-orthogonal multiple access (NOMA) RA by a predicted signal noise ratio and predefined thresholds. In order to improve the performance of interference cancelation, a power back-off scheme is applied to guarantee the received powers of overlapped signals are diverse. In addition, the access performance of hybrid RA is theoretically analyzed. In the simulation, both numerical results and simulation results in practical systems are provided. Simulation results show that the proposed RA procedure significantly improves the number of successful access compared with single OMA RA or NOMA RA.

Key words: massive connections; hybrid multiple access; random access; power back-off

非正交多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)允许多个终端同时共享同一资源单元,接收端通常需要配置串行干扰删除(SIC, successive interference cancelation)接收机消除用户间共道干扰,能够显著提高系统吞吐量,已成为第5代(5G, the fifth generation)关键技术之一^[1-3]. Ding和Zhang^[4-5]分别研究了下行链路和上行链路非正交

多址接入(NOMA, non-orthogonal multiple access)相对正交多址接入(OMA, orthogonal multiple access)的吞吐量增益. Wu等^[6]研究了正交随机接入与非正交随机接入共存情况下的资源分配技术. 考虑到NOMA的复用增益,将NOMA技术引入随机接入过程,能够提高网络的终端接入数.

在实际系统中,SIC接收机并不能完全消除

收稿日期:2017-09-26

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助,国家自然科学基金项目(61501056)

作者简介:丁婷婷(1983—),女,博士生,E-mail:tingtingding0611@sina.com;康桂霞(1972—),女,教授,博士生导师.

NOMA 用户间干扰, NOMA 解调的性能通常差于 OMA, 在一些处于小区边缘或信号覆盖较差的区域, NOMA 可能无法满足某些业务的服务质量 (QoS, quality of service). 因此, 在保证 QoS 的情况下如何选择合适的随机接入方式 (正交随机接入和非正交随机接入) 是提高网络接入容量的关键. 针对这一问题, 提出了混合多址接入的随机接入机制.

1 传统随机接入机制

在传统移动通信 LTE/LTE-A (long term evolution/long term evolution-advanced) 系统中, 随机接入分为基于竞争随机接入和非竞争随机接入 2 种模式, 大部分终端初始接入时采用竞争的随机接入机制. 笔者主要研究基于竞争的随机接入机制, 基于竞争的随机接入机制主要包括以下 4 个过程. 图 1 为基于竞争的随机接入机制示意图.

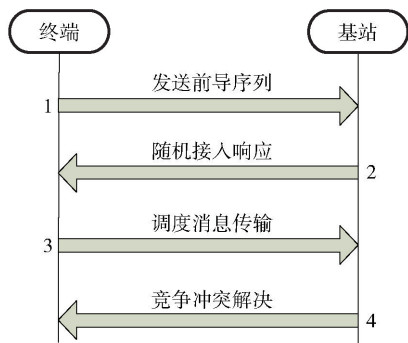


图 1 基于竞争的随机接入机制

1) 传输前导序列

基站将配置的前导序列集合以广播方式告知所有终端, 终端从可用的前导序列集合中随机选择一个, 在物理随机接入信道 (PRACH, physical random access channel) 上发送. 前导序列的发送功率基于路径损耗补偿的开环估计得到.

2) 随机接入响应

当基站检测到随机接入信道中的前导序列后, 在物理下行共享信道 (PDSCH, physical downlink shared channel) 上反馈随机接入响应 (RAR, random access response), 其内容包含随机接入前导标识、定时调整信息、上行链路授权、临时无线网络临时标识以及退避标识等.

3) 调度消息传输

当终端成功接收到与发送的前导序列相匹配的 RAR, 在上行共享信道 (PUSCH, physical uplink shared channel) 上传调度信息, 调度信息可以包括

连接请求信息、终端的临时无线网络临时标识、无线资源控制重新建立连接请求等信息.

4) 冲突解决

基站检测终端是否发生碰撞. 如果基站成功解析第 3) 步的调度信息, 则认为没有发生终端碰撞, 将在 PDSCH 信道上发生竞争解决消息; 否则不发送信息. 如果终端没有收到竞争解决消息, 那么它认为已经发生了碰撞, 将静默一段时间后重新发起随机接入.

传统的随机接入机制要求同一时频码资源内, 只能有一个终端发送调度信息; 否则基站认为终端发生了碰撞. 这就限制了一定时间内终端接入网络的数量. 如果第 3) 步的 PUSCH 资源能被多个终端同时共享, 基站通过 SIC 接收机分别解析他们的调度信息, 将大大提高系统的接入容量. 下面提出一种混合多址的随机接入机制.

2 混合多址随机接入机制

2.1 接入机制选择

图 2 给出了 NOMA 的误块率 (BLER, block error rate) 性能, 接收端采用 SIC 接收机. 仿真中, 每个传输块大小为 100 bit, 采用正交相移键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 调制方式. NOMA 组 A 和 NOMA 组 B 分别表示负载为 200% 和 300% 的情况. 定义 ρ 为同一组 NOMA 终端到达基站的功率差, 例如在 NOMA 组 B 中, 第 2 个终端到达基站的功率比第 1 个终端小 ρ dB, 第 3 个终端到达基站的功率比第 2 个终端小 ρ dB, 以此类推, 仿真中 $\rho = 5$ dB. 仿真信道采用扩展步行者信道 (EPA, extended pedestrian A).

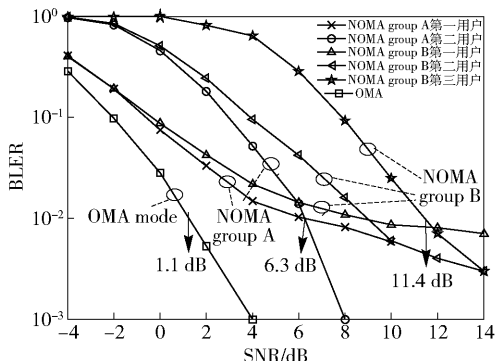


图 2 NOMA 的 BLER 性能

从图 2 可以看出, 在一定的 QoS 要求 (目标 BLER 为 10^{-2}) 下, 正交多址传输和非正交多址传输

存在一个切换门限. 当 SNR 小于 6.3 dB 时, 非正交多址传输的 BLER 高于 10^{-2} , 无法满足目标 BLER 要求; 当 SNR 大于 6.3 dB 时, 非正交多址和正交多址都能满足目标 BLER 的要求, 但非正交多址能够接入更多的终端. 而且, 非正交多址不同负载对应的 SNR 门限也不同. 例如, 当 SNR 介于 6.3 dB 和 11.4 dB 之间时, NOMA 组 B 的第 3 个终端无法满足目标 BLER 的要求, 此时非正交接入只能允许 200% 的负载. 当 SNR 大于 11.4 dB 时, 非正交接入可以达到 300% 的负载. 可以看出, 随着 NOMA 用户数增多, 其 SNR 门限越高. 这主要是因为切换门限是由最差的 NOMA 用户性能决定的, 在解调最差用户前, 接收机需要删除其他用户的干扰. 由于 SIC 接收机无法彻底删除干扰, 会留有一定的残留干扰, 所以仿真中的实际噪声除了热噪声外, 还包含未理想删除的残留干扰.

SIC 接收机干扰删除过程中, ρ 的取值也会影响切换门限. 切换门限越小, 意味着越多的终端可以采用非正交方式接入网络, 网络的终端接入数量也会越多. 较小的 ρ 会增加用户间干扰, 而较大的 ρ 会降低最差用户的性能, 这都不利于降低切换门限. 表 1 给出了不同 ρ 对应的非正交接入负载切换门限. 可以看出, 当 $\rho = 5$ dB 时, 切换门限能够取得较小值.

表 1 非正交接入切换门限

ρ /dB	非正交接入负载/%	切换门限/dB
3	[200, 300, 400]	[11.7, 18.5, 25.6]
5	[200, 300, 400]	[6.3, 11.4, 17.7]
7	[200, 300, 400]	[8.2, 15.7, 22.4]

要提高接入容量, 需要尽可能多的终端采用非正交多址的方式进行随机接入. 在保证 QoS 的前提下, 终端可以根据切换门限选择是否选择非正交多址方式进行接入. 终端发起随机接入前, 先预测到达基站信号的信噪比, 然后将预测的信噪比与切换门限进行比较, 选择高于切换门限的正交多址或非正交多址方式发起随机接入. 在非正交方式中, 还可以根据门限对应的负载值进行终端配对. 当终端选择正交随机接入模式时, 可采用传统的随机接入机制, 当终端选择非正交传输模式时, 将根据非正交随机接入流程接入网络. 图 3 所示为混合多址随机接入机制的流程.

下面介绍终端如何预测到达基站的信噪比. 定

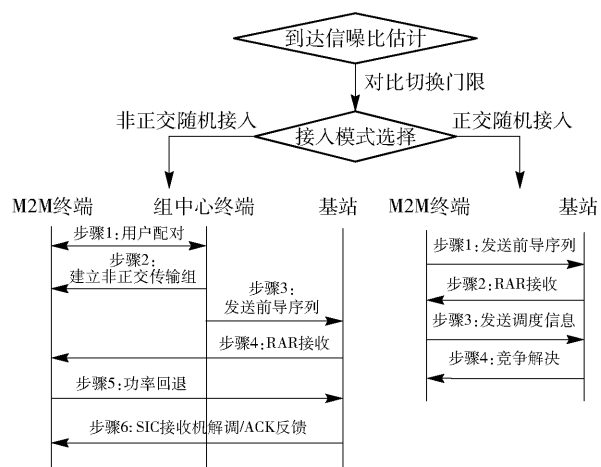


图 3 混合多址随机接入机制流程

义 R_r 为某终端到达基站的接收信噪比

$$R_r = \frac{P_r}{\sigma^2} \quad (1)$$

其中 P_r 和 σ^2 分别表示到达基站的功率和基站的热噪声方差. 基站将目标到达功率和热噪声方差放在系统信息中进行广播, 终端发起随机接入前, 解析系统信息得到目标到达功率和热噪声方差. 终端根据目标到达功率计算初始接入的发送功率为

$$P_{\text{trad}} = \min \{ P_{\max}, P_u + 10 \lg M_u + \omega L \} \quad (2)$$

其中: P_u 为目标到达功率, M_u 为传输的资源块大小, L 为路径损耗, ω 为上下行链路补偿参数. 这些参数由基站通过信令通知终端. 根据式(2), 终端计算的发送功率不仅要满足基站目标到达功率的要求, 还不能超过终端的最大发送功率. 因此, 终端信号到达基站的功率要么等于目标到达功率, 要么等于以最大功率发送后的到达功率, 即

$$P_r = \min \{ P_u, P_{\max} - 10 \lg M_u - \omega L \} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)中, 可以预测终端到达基站的接收信噪比.

2.2 非正交多址随机接入

NOMA 解调过程中, SIC 接收机依靠接收信号不同的功率来区分叠加信号. 为了保证 NOMA 终端到达基站的功率不同, 提出了功率回退的方法. 非正交多址随机接入共分为以下 6 步, 流程详见图 3.

1) 终端配对

终端搜索可以配对的终端. 在每隔 T 个时隙内, 基站分配一个配对资源和配对周期. 在一个配对周期内, 终端在指定的配对资源上随机选择一个时隙 t 发送信标或特定信息(终端身份标识码和路径损耗). 在时隙 t 到达前, 该终端在其他时隙上检

测是否有用户发送了信标。如果成功检测到信标,这表示着有一个终端正在寻求配对,该终端将在时隙 t 上发送它的特定信息。如果在时隙 t 到达前没有检测到信标,该终端在时隙 t 上发送信标。在这个过程中,只有具有最小 t 值的终端获得传输信标的机会,这个终端也被默认为配对组组长。组长终端在发送完信标后,就开始接收从其他用户设备发来的特定信息。如果组长终端在一个配对周期内没有收到任何反馈信息,那认为配对失败,将在下个配对周期再次进行配对搜索。

2) NOMA 组建立

假设配对组长终端在第 1 步接收了 n 个终端的反馈。组长终端为 n 个终端随机分配功率回退参数,然后在配对周期的最后一个时隙内广播发送前导序列编号、功率回退指数和相对应的终端身份标识号。非组长终端收到这些信息后,检查用户设备自己的身份信息是否包含在终端身份标识列表中。如果包含的话,那么就可以直接跳到第 4) 步等待接收 RAR; 若不包含,就要在下一个随机接入循环中再次尝试。

3) 发送前导序列

组长终端代表整个 NOMA 组群在 PRACH 上发送前导序列。前导序列的选择和发送与传统随机接入机制中的传输前导序列步骤相同。

4) 接收 RAR

这一步中的接收 RAR 同传统随机接入机制中的 RAR 反馈机制类似。由于 NOMA 组使用同一个前导序列,且所有终端都知道该前导序列信息,所以会收到相同的 RAR。

5) 功率回退的调度消息发送

当第 i 个终端成功接收到 RAR,它首先检查该 RAR 信息是否与组长终端发送的前导序列匹配。如果匹配,该终端会根据功率回退指数来调整自己的发射功率,用户设备 i 的发射功率为

$$P_i = P_1 - \lambda_i p, i > 1 \quad (4)$$

其中: P_1 为组长终端的发射功率,组长终端的发射功率根据式(2)确定; λ_i 为用户 i 对应的功率回退指数。功率调整完毕后,终端 i 在 RAR 指定的 PUSCH 上发送调度消息。NOMA 用户发送调度信息使用的 DMRS 序列采用叠加正交码来实现。

6) SIC 接收和确认

经过功率回退后,终端到达基站的信号功率不同,基站采用串行干扰删除分别解析 NOMA 终端的

调度信息,然后通过控制信道发送确认信息和相应的终端身份标识号。

与正交多址随机接入相比,非正交多址随机接入增加了终端、建立 NOMA 组以及功率回退等机制,目的就是在有限的接入资源内尽可能地接入更多终端。

2.3 接入容量分析

下面分析混合多址随机接入成功接入网络的终端数量。假设 q 为发起接入的终端数, $p(r, \theta)$ 为发起接入终端的 2 维概率密度, N_p 为可用的前导序列个数,则一个前导序列不发生碰撞的概率为

$$P_s = P(B = 1) = \text{binom}(q, 1) \left(\frac{1}{N_p} \right) \left(1 - \frac{1}{N_p} \right)^{q-1} \quad (5)$$

其中:事件 B 表示选择相同前导序列的终端数, q 可以根据负载预测算法^[7]进行预测。由于每个前导序列是否被多个用户选择是相互独立的,不发生碰撞的前导序列个数服从参数为 $\text{binom}(N_p, P_s)$ 的二项分布。在 PUSCH 资源充足的情况下,正交随机过程接入的终端个数期望值表示为

$$E(B_{\text{succ}}^{\text{oma}}) = N_p P_s = q (1 - 1/N_p)^{q-1} \quad (6)$$

对于非正交随机接入,负载为 n 的非正交随机接入终端个数期望为

$$E(B_{\text{succ}}^{\text{noma}}) = q (1 - 1/N_p)^{\frac{q}{n}-1} (1 - P_f) \quad (7)$$

其中 P_f 表示非正交随机接入机制第 1 步中用户配对的失败概率。

在混合多址随机接入机制中,终端可能选择正交多址或非正交多址随机接入,接入终端个数的期望值为

$$E(B_{\text{succ}}^{\text{hy}}) = \sum_{i=1}^{n_{\max}} q_i \left(1 - \frac{1}{N_{p_i}} \right)^{\frac{q_i}{i}-1} (1 - P_{f_i}) \quad (8)$$

式(8)成立的前提为

$$\sum_{i=1}^{n_{\max}} N_{p_i} = N_p, \sum_{i=1}^{n_{\max}} q_i = q \quad (9)$$

其中: i 表示在 PUSCH 上复用同一资源上的复用负载,即复用的用户数,取值范围是 $[1, n_{\max}]$; n_{\max} 为非正交接入复用负载的最大值,由 SIC 接收机性能决定。 $i=1$ 时表示正交多址随机接入, $i>1$ 时表示非正交多址随机接入。当 $i=1$ 时,由于没有用户配对,所以 $P_{f,1} = 0$; q_1 表示采用正交接入时发送前导序列的终端数量, N_{p_1} 为正交接入分配的前导序列数量。当 $i>1$ 时,由于可能存在配对失败,所以 $P_{f_i} >$

0; q_i 表示复用负载为 i 时发送前导序列的终端数量, N_{p_i} 表示复用负载为 i 分配的前导序列数量. 在分配前导序列过程中, 应考虑复用负载 i 时发送前导序列终端数量, 否则就会出现某种接入负载碰撞概率过高的情况. 为此, 假设分配给复用负载为 i 的随机接入前导序列占总前导序列的比例等于其发送前导序列终端占有所有发送前导终端的比例, 即

$$\frac{N_{p_i}}{N_p} = \frac{q_i}{q} = \alpha_i \quad (10)$$

α_i 即为上文提到的比例, 若要求得混合多址接入终端个数, 只需要得到 α_i 即可.

通过式(1)和式(2)知, 基站的接收信噪比与路径损耗相关, 而路径损耗通常取决于基站与终端之间的距离. 因此, 对于一个预定义的切换门限一定存在一个对应的距离门限. 根据式(1)和式(2), 得到

$$\omega L = P_{\max} - 10 \lg M_u - R_{th} \sigma^2 \quad (11)$$

其中的 R_{th} 表示一个预定义的 SNR 门限值. 路径损耗采用如下模型^[8]:

$$L = 20 \lg(d_{th}) + 20 \lg(f) + 32.4 \quad (12)$$

其中 f 为载波频率, d_{th} 为 R_{th} 对应的距离门限. 将式(12)代入式(11), 得

$$d_{th} = 10^{\frac{P_{\max} - 10 \lg M_u - a}{20\omega}} \quad (13)$$

其中: $a = R_{th} \sigma^2 + 20 \omega \lg(f) + 32.4 \omega$. 根据距离门限 d_{th} 可以求出 α_i :

$$\alpha_i = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{d_{th,i}} p(r, \theta) dr d\theta - \int_0^{2\pi} \int_0^{d_{th,i+1}} p(r, \theta) dr d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{d_{th,i+1}} p(r, \theta) dr d\theta} \quad (14)$$

将式(14)代入式(10), 得到 q_i 和 N_{p_i} 后, 再代入式(8)即可得到混合多址随机接入终端个数的期望值.

3 仿真结果

下面给出了正交多址随机接入、非正交多址随机接入和混合多址随机接入在一个接入周期内接入终端数的仿真结果. 假定 1 000 个终端均匀分布在一个小区内, 混合多址接入的切换门限参照表 1. 仿真中每个 PRACH 上前导序列中的 50% 用于非正交传输. 小区半径为 0.5 km, 带宽为 20 MHz, 小尺度衰落模型为 EPA, 基站采用 SIC 接收机. $P_f = 0$ 表示 NOMA 理想建组的情况. 在每个时隙内, 分配 1 个

PRB 用于终端配对.

图 4 ~ 图 6 给出了不同多址方式的单个随机接入周期内终端离基站不同距离下接入终端累计数量的仿真结果. 纵轴表示在这个距离范围内成功接入网络的累积终端数量, 如 0.25 km 处纵轴的值表示 [0 ~ 0.25 km] 范围内接入终端数, 0.5 km 处纵轴的值表示 [0 ~ 0.5 km] 范围内接入终端数, 即整个小区在一个随机接入周期内接入的终端数.

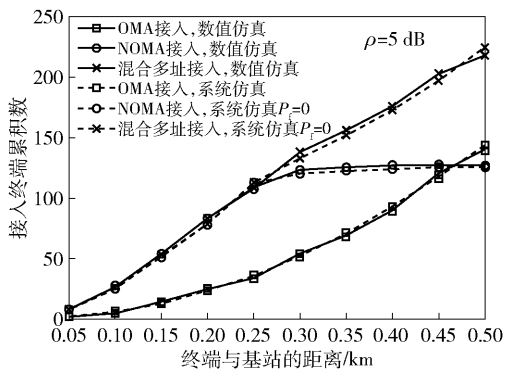


图4 不同接入方式的接入终端数仿真

图 4 所示为 3 种接入方式 (正交随机接入、非正交随机接入、混合随机接入) 的数值仿真结果和实际场景下的仿真结果. 可以看出, 在小区中心区域, 如 0.27 km 范围内, 非正交多址随机接入的成功接入用户数与混合多址接入的成功接入用户数大致相同, 且都远高于正交多址随机接入的成功接入用户数, 这说明在这个区域内的用户多采用非正交多址方式接入基站. 当用户远离基站时, 非正交多址随机接入的成功接入用户数并没有随距离的增加而增长; 与之相反, 正交多址随机接入的成功接入用户数和混合多址接入的成功接入用户数随距离的增加继续增长, 且增长曲线基本平行, 这说明在这个区域内, 大多数用户采用正交多址方式接入基站. 从整体上看, 混合多址随机接入集成了非正交多址的频谱效率和正交多址的解调性能的优势, 比单一多址随机接入方式更能提高接入终端数. 此外, 实际仿真的结果与理论分析的数值仿真结果相匹配, 也证明了接入容量理论分析的正确性.

图 5 所示为混合多址接入第 2 步 NOMA 建组对接入终端数的影响. 可以看出, 理想情况下 ($P_{f,i} = 0$) 与实际场景下的仿真曲线几乎重合. 这主要是因为终端发现概率高达 99%, NOMA 建组失败对成功接入用户数的影响非常小.

图 6 所示为 NOMA 终端到达基站的功率差 ρ

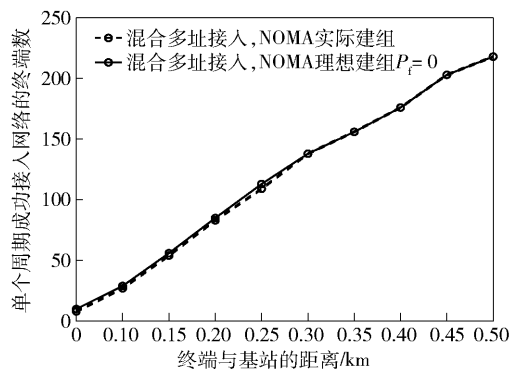
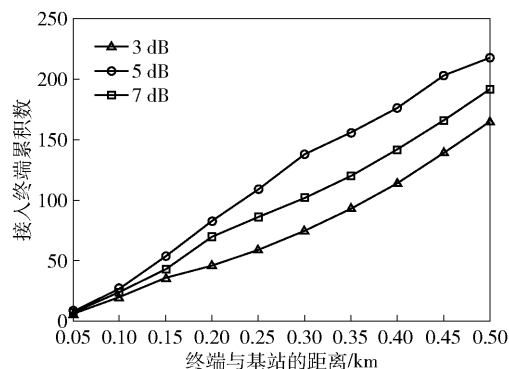


图5 混合多址成功接入终端数仿真

对接入容量的影响. 不同 ρ 对应的SNR切换门限见表1. 从图中可以看出,与 ρ 等于3 dB和7 dB相比, ρ 等于5 dB时可获得最大的接入用户数. 这主要是因为5 dB功率差的多址切换门限最低,这样更多的用户可以选用非正交方式接入基站.

图6 不同 ρ 成功接入终端数仿真

在实际系统中,多址接入方式或负载率的选择除了受接收机性能影响外,还取决于其他因素,如估计误差、信道变化、瞬时误块率(BLER, block error ratio)变化以及硬件器件性能变化等. 因此,在某一时刻多址接入方式和负载率的选择可能与实际信道质量出现偏差. 为了减小这种偏差,可以设定一个调整因子,根据BLER的统计用闭环反馈的方式对初始的负载率进行动态调整. 当某一时间BLER较高时,调低负载率,甚至多址接入方式;反之增加负载率. 可以认为,根据切换门限确定的多址接入方式和负载率是粗选,闭环反馈调整是细调.

4 结束语

混合多址随机接入机制能够使终端根据到达基站的信噪比自适应地选择正交多址随机接入或非正交多址随机接入. 在非正交随机接入机制中,采用功率回退的方法,保证基站收到不同到达功率的多用户叠加信号. 仿真结果证明,在相同接入资源的情况下,混合多址随机接入机制的接入数量高于单一多址方式的随机接入机制.

参考文献:

- [1] Ming Zeng, Animesh Yadav, Octavia A Dobre, et al. Capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA with multiple users in a cluster [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(10): 2413-2424.
- [2] Zhang Di, Liu Yuanwei, Ding Zhiguo, et al. Performance analysis of non-regenerative massive-MIMO-NOMA relay systems for 5G [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 1(99): 1-10.
- [3] Zhao Jingjing, Liu Yuanwei, Kok Keong Chai, et al. NOMA-based D2D communications: towards 5G [C] // 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBE-COM). Washington: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [4] 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, 12(21): 1501-1504.
- [5] Zhang Ningbo, Wang Jing, Kang Guixia, et al. Uplink nonorthogonal multiple access in 5G Systems [J]. IEEE Communication Letters, 2016, 20(3): 458-461.
- [6] Wu Yali, Kang Guixia, Zhang Ningbo. Random access and resource allocation for the coexistence of NOMA-Based and OMA-Based M2M [J]. China Communications, 2017, 14(6): 43-53.
- [7] Dimas T W, Kae Won Choi. Hybrid random access and data transmission protocol for machine-to-machine communications in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(1): 33-46.
- [8] Molisch A. Wireless communications [M]. [S.l.]: Wiley IEEE Press, 2011.