

下行多用户NOMA系统中基于能效优化的资源分配

胡丽花 宋荣方

(南京邮电大学通信与信息工程学院, 南京, 210003)

摘要: 非正交多址接入技术(Non-orthogonal multiple access, NOMA)提高了通信系统的频谱效率且可支持大量用户接入,因此受到广泛关注。以能量效率(简称能效)最大化为目标的多用户NOMA系统下行链路的资源分配问题,是一个难以求解的非凸问题,为此,将问题分解成用户分组和功率分配2个子问题。首先采用一种基于贪婪算法的用户分组方式降低了穷举法的计算复杂度;其次根据确定的分组方式,得到各个子信道上复用用户的功率分配系数表达式。为了进一步提高系统的能效,研究了子信道间非等功率分配方案,将子信道功率分配问题规划成非线性非凸的比率和问题,并利用Dinkelbach类算法得到次优解。仿真结果显示,文中采用的方案可以达到更好的系统容量和能效。

关键词: 非正交多址接入;能量效率;用户分组;功率分配;Dinkelbach类算法

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A

Energy Efficient Resource Allocation in Multi-user Downlink Non-orthogonal Multiple Access Systems

Hu Lihua, Song Rongfang

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, 210003, China)

Abstract: Non-orthogonal multiple access (NOMA) in communication system has recently received significant attention since it provides a superior spectral efficiency and supports massive connectivity. We study a resource allocation problem in multi-user downlink NOMA systems to achieve the maximum energy efficiency. The original optimization problem is a non-convex problem that is difficult to solve. Therefore, the original optimization problem is decomposed into two sub-problems, i.e., the user assignment and the power allocation. A user grouping method based on greedy algorithm is firstly used to reduce the computational complexity of the exhaustive method. Secondly, for the given user grouping method, the power allocation coefficient expression of the multiplexed user on each sub-channel is obtained. In order to further improve the energy efficiency, a non-equal power allocation scheme is investigated. The problem of power allocation on all sub-channels is formulated as a nonlinear and non-convex problem of the sum of the ratios, and a Dinkelbach-like algorithm is proposed to obtain a suboptimal solution. Simulation results show that the NOMA system equipped with the proposed algorithms perform well in terms of sum rate and energy efficiency.

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20181392)资助项目;南京邮电大学江苏省通信与网络技术工程研究中心开放课题(NY2017030)资助项目。

收稿日期: 2019-02-21; **修订日期:** 2019-05-17

Key words: non-orthogonal multiple access; energy efficiency; user assignment; power allocation; Dinkelbach-like algorithm

引 言

随着移动互联网的发展,越来越多的设备接入到移动网络中,新的服务和应用层出不穷,对移动数据流量的需求出现爆炸式增长,由于受正交资源块数量的限制,现有的一些多址接入技术(如码分多址、时分多址、频分多址)面临着巨大的挑战^[1-3]。为满足用户更高的速率体验要求、海量设备的连接和高流量密度的传输,新一代网络技术必须提升频谱、能源与成本等多方面的效率。为了提供千倍网络容量,5G系统必需支持更高的频谱效率。近些年来,随着移动网络能耗增加,考虑到未来移动通信网络的可持续发展,能效成为继谱效之后移动通信发展关注的重点性能^[4]。作为5G候选技术之一的非正交多址接入技术(Non-orthogonal multiple access, NOMA)通过在发射端使用叠加编码传输使在相同的资源块(如时间、频率、编码)上可以支持多个用户接入,在接收端使用串行干扰消除技术(Successive interference cancellation, SIC)来区分复用的用户,使系统的用户接入数量和频谱效率得到大幅提高^[5-6],从而受到了广泛关注。

学者们已对非正交多址接入技术的各个方面进行了研究,文献[7]研究了NOMA系统下行链路的系统性能,仿真结果表明,与传统的正交多址系统相比,NOMA具有优越的频谱效率。文献[8]从用户公平性的角度出发,研究了NOMA系统的功率分配技术。文献[9]探讨了NOMA功率分配方案,在子信道上采用均匀分配方案,用户间用分数阶功率分配法(Fractional transmit power allocation, FTPA)来提高系统的总吞吐量,结果表明NOMA的小区总吞吐量、小区边缘用户吞吐量和用户比例公平程度都优于正交频分多址(Orthogonal frequency multiple access, OFDMA)系统。虽然FTPA应用简单,但是并不是子信道上复用用户的最佳功率分配方式。文献[10]研究了以系统和速率最大化为目标的最佳用户分组方式,然后在一般的NOMA系统中得到封闭形式的最优解。文献[11]为NOMA系统提出了一种基于贪婪算法用户分组方案,以及基于凸差分规划的用户和子信道功率分配算法,其用户分组的算法复杂度相比文献[7]中的穷举法降低了许多,其性能也优于文献[12]中采用的随机用户分组方案。以上均是研究以系统容量最大化为目标的资源分配方式。随着技术的发展,资源能效的设计也越来越重要,文献[13]使用Lyapunov优化方法研究了在满足用户最小传输速率和最大传输功率条件下的基于能效优化的资源分配算法。文献[14]讨论了在满足用户服务质量(Quality of service, QoS)的条件下,多用户单发单收(Simple input simple output, SISO)NOMA系统的基于能效优化的功率分配方案。文献[15]发射机处的统计信道状态信息,提出了近似最优功率分配方案以最大化系统能效。结果表明,相比传统的正交多址系统,NOMA在同一时间内支持多用户接入,使能量得到更有效的利用。

本文将研究以能效最大化为目标的多用户NOMA系统中下行链路的资源分配。由于能效最大化的目标函数是非凸且NP-hard^[14],所以将原目标函数分解成为用户分组和功率分配2个子问题。用户分组时,为了减少穷举法用户分组的复杂度,在子信道功率是均匀分配的条件下,考虑一种基于贪婪方式的用户分组的方法对所有用户进行分组,通过对复用用户的功率分配目标函数进行深入研究,得到了用户功率分配的最佳功率分配系数的表达式。在研究子信道非等功率分配方案的过程中,证明了子信道的能效是关于其功率的严格伪凹函数,基于该拟凹特性,可以得到使得各个子信道能效最优的最佳发射功率,显然,若此时子信道的功率满足基站总功率限制,那就已经得到系统的最佳发射功率分配方案。否则将子信道的功率分配问题规划为典型非线性比率和问题,使用Dinkelbach类算法来求解一系列凸优化问题,从而得到原问题的次优解,使系统能效进一步提高。

1 系统模型

在下行 NOMA 网络中,一个基站(Base station, BS)通过 N 个子信道向 M 个用户终端发送信号,并在用户终端的接收机中使用 SIC 进行信号检测。用整数 $m(1 \leq m \leq M)$ 表示第 m 个用户,整数 $n(1 \leq n \leq N)$ 表示第 n 个子信道(SC _{n})。在小区内, M 个用户均匀分布在以 R 为半径的圆内。系统带宽 BW 均匀分配给 N 个子信道分别为 B_{sc} 。 M_n 表示分配到第 n 个子信道上的用户数,用户 m 在 SC _{n} 上分配的功率为 $p_{m,n}$,子信道的功率为 $\sum_{i=1}^{M_n} p_{i,n} = p_n$,基站的总发射功率为 $\sum_{n=1}^N p_n = p_s$ 。在此 NOMA 系统中,假设 BS 知道所有用户的信道状态信息(Channel state information, CSI)。块衰落信道在一个时隙上的信道系数保持一致,但是在不同时隙上的变化是独立的。第 n 个子信道上用户 m 与 BS 之间的信道系数为 $h_{m,n} = g_{m,n} PL^{-1}(d_m)$,其中: $g_{m,n}$ 为瑞利衰落系数, d_m 为用户到基站之间的距离,PL(\cdot) 为路径损耗函数。子信道 SC _{n} 上传输的叠加信号为

$$x_n = \sum_{i=1}^{M_n} \sqrt{p_{i,n}} s_i \quad (1)$$

式中: s_i 为 SC _{n} 上第 i 个用户的调制信号,并且 $E[|s_i|^2] = 1$ 。那么用户 m 在 SC _{n} 上接收到的信号表达式为

$$y_{m,n} = h_{m,n} \sum_{i=1}^{M_n} \sqrt{p_{i,n}} s_i + Z_{m,n} \quad (2)$$

式中: $Z_{m,n} \sim CN(0, \sigma_n^2)$,是均值为 0,方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声。定义用户 m 在子信道 SC _{n} 上的等效信道增益为 $H_{m,n} = |h_{m,n}|^2 / \sigma_n^2$ 。在 NOMA 系统中,出于用户公平性,信道增益小的用户分配的功率应该大于信道增益大的用户,即 $H_{l,n} < H_{k,n}$ 时, $p_{l,n} > p_{k,n}$ 。

在用户终端上使用 SIC 技术来减少来自同一子信道上其他用户的信号干扰,根据最佳 SIC 解码顺序,用户 m 解码时要先解调出信道增益比用户 m 小的全部用户的信号并从叠加信号中去除,然后把信道增益比用户 m 大的用户的信号当作噪声从而解调出自身的信号。因此,用户 m 接收机端的信号与干扰加噪声比(Signal to interference plus noise ratio, SINR)为

$$\text{SINR}_{m,n} = \frac{|h_{m,n}|^2 p_{m,n}}{\sigma_n^2 + |h_{m,n}|^2 \sum_{i=1, H_{i,n} < H_{l,n}}^{M_n} p_{i,n}} = \frac{H_{m,n} p_{m,n}}{1 + H_{m,n} \sum_{i=1, H_{i,n} < H_{l,n}}^{M_n} p_{i,n}} \quad (3)$$

那么用户 m 在子信道 SC _{n} 上的信息速率为

$$R_{m,n} = B_{sc} \log_2(1 + \text{SINR}_{m,n}) \quad (4)$$

因此,子信道 SC _{n} 上的和速率为

$$R_n = B_{sc} \sum_{i=1}^{M_n} \log_2(1 + \text{SINR}_{i,n}) \quad (5)$$

子信道 SC _{n} 的能效定义为

$$\eta_n = \frac{R_n}{p_n + p_c} \quad (6)$$

式中 p_c 为固定电路消耗。则可定义 NOMA 系统的能效为

$$\eta = \sum_{n=1}^N \eta_n \quad (7)$$

将 NOMA 系统的能效优化问题规划为

$$\max_{p_n > 0, \alpha_n} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\beta_{m,n} R_n}{p_n + p_c} \quad (8a)$$

$$\text{s.t. } R_{m,n} \geq R_{\min} \quad \forall n, m \quad (8b)$$

$$\sum_{n=1}^N p_n \leq p_s \quad \forall n \quad (8c)$$

$$\beta_{m,n} \in \{0, 1\} \quad \forall n, m \quad (8d)$$

$$\sum_{m=1}^M \beta_{m,n} = M_n \quad \forall n, m \quad (8e)$$

式中 R_{\min} 是由 QoS 决定的最小用户传输速率。式(8b)表示满足用户最小传输速率的条件,式(8c)表示满足基站最大传输功率的条件。式(8d)表示用户的分组情况, $\beta_{m,n} = 1$ 表示用户 m 在子信道 SC_n 上, 否则 $\beta_{m,n} = 0$ 。因为优化问题(8)是用户分组与功率分配相结合的复杂优化问题,是非凸且 NP-hard, 很难找到全局最优解。为有效解决该问题, 本文将原优化问题分解成用户分组和功率分配 2 个子问题来求出次优解。

2 NOMA 系统用户分组与功率分配

2.1 NOMA 系统用户分组

正如前文所提到, NOMA 系统会在相同的子信道上叠加多个用户的信号进行传输, 所以用户的分组方式会对系统的性能产生重大影响。考虑到利用穷举法得到的最佳用户分组方案的算法复杂度很高, 并不适合实际应用。本文采用一种复杂度低的动态用户分组方案, 并根据具体的用户分组确定复用用户的功率分配系数 α_n 。为了降低接收机的复杂度与解码时延, 在进行用户分组的过程中, 假设每个子信道在同一时间内匹配 2 个用户, 即, 对于一个基站, 子信道数目 N 与用户数 M 的关系为 $M=2N$ 。为了便于分组方案的实施, 设定各个子信道的初始功率采用等功率分配, 即 $p_n = p_s/N$ 。

在用户分组算法的初始化过程中, 用户 m 的选择优先表用 $PR_UT(m)$ 表示, $PR_UT(m)$ 是根据用户 m 在不同子信道上的等效信道增益对子信道进行排序得到的。具体地, 对于用户 m 来说, 若等效信道增益 $H_{m,i} > H_{m,j}$, 那么在用户 m 的选择优先表 $PR_UT(m)$ 中, 子信道 SC_i 的优先级高于 SC_j 。在用户分组过程中, 用户 m 根据选择优先表, 向其优先级最高的子信道 SC_n 发送分组请求, 若该子信道分配的用户数目小于 2, 则接受用户 m 的分组请求; 若此时子信道分配的用户数目等于 2, 该子信道会选择使其信道能效最大的 2 个用户留下。如此往复, 直到所有用户都被分到对应的子信道上。低复杂度的用户分组的具体算法流程如下所示:

(1) 初始化。

(a) 设置子信道集合 $SC = \{SC_1, SC_2, SC_3, \dots, SC_N\}$, 未被分组的用户集合 $UT = \{UT_1, UT_2, UT_3, \dots, UT_M\}$, 以及子信道 SC_n 上复用的用户集合 $SC_n_Match = \emptyset, \forall n \in \{1, 2, \dots, N\}$ 。

(b) 根据用户的等效信道增益, 列出每个用户的选择优先表 $PR_UT(m), \forall m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 。

(2) 若 UT 为非空集合, 则遍历未被分组的用户集合 UT , 向用户 m 的选择优先表 $PR_UT(m)$ 中优先级最高的子信道 SC_n 发送分组请求。

(a) 若 $|SC_n_Match| < 2$, 则把用户 m 加入集合 SC_n_Match 中, 并把用户从集合 UT 中移除。

(b) 若 $|SC_n_Match| = 2$, 则:

(i) 把集合 SC_n _Match 中的用户和正在申请加入的用户 m 两两组合,按 2.2.1 节提到的复用用户功率分配方案,分别算出用户功率分配系数 α_n ,并计算能效 η_n 。

(ii) 选择使得子信道能效最大的 2 个用户作为复用组放入 SC_n _Match 中,并将被选择的用户从 UT 中移除。

(iii) 被子信道拒绝的用户则放回 UT 中,并在该用户的优先表中删除子信道 SC_n 。

(3) 结束算法。

2.2 NOMA 系统的功率分配

2.2.1 子信道上的复用用户功率分配

在 2.1 节用户分组算法中,要想得到用户复用组在子信道上的最大能效,必须先算出用户最佳功率分配系数。本文通过分析目标函数与功率分配系数的函数关系,在保证用户公平性的条件下,得出了用户功率分配系数表达式。在计算用户功率分配系数时,先把基站传输总功率均匀分配给每个子信道,即 $p_n = p_s/N$ 。假设在子信道 SC_n 上复用的两个用户分别为用户 1,2,两者间的信道增益满足 $H_{1,n} < H_{2,n}$,根据 SIC 解码顺序的原则,用户 2 解码时可以直接消除用户 1 的信号干扰,而用户 1 解码时不能消除用户 2 的干扰而是把其当作噪声来处理。那么子信道 SC_n 上的和速率为

$$R_n = B_{sc} \left(\log_2(1 + H_{2,n} p_{2,n}) + \log_2 \left(1 + \frac{H_{1,n} p_{1,n}}{1 + H_{1,n} p_{2,n}} \right) \right) \quad (9)$$

设 $\alpha_n, 0 < \alpha_n < \frac{1}{k+1} (k > 1)$ 为子信道 SC_n 上 2 个用户之间的功率分配系数, $p_{1,n} = (1 - \alpha_n) p_n$, $p_{2,n} = \alpha_n p_n$ 。则式(9)可以转换为

$$R_n = B_{sc} \left(\log_2(1 + \alpha_n H_{2,n} p_n) + \log_2 \left(\frac{1 + H_{1,n} p_n}{1 + \alpha_n H_{1,n} p_n} \right) \right) \quad (10)$$

求解使子信道 SC_n 能效最大的功率分配系数 α_n 的优化问题如下

$$\max_{\alpha_n} \eta_n = \frac{B_{sc} \left(\log_2(1 + \alpha_n H_{2,n} p_n) + \log_2 \left(\frac{1 + H_{1,n} p_n}{1 + \alpha_n H_{1,n} p_n} \right) \right)}{p_n + p_c} \quad (11a)$$

$$\text{s.t. } R_{1,n} \geq R_{\min} \quad (11b)$$

$$R_{2,n} \geq R_{\min} \quad (11c)$$

$$0 < \alpha_n \leq \frac{1}{k+1}, k > 1 \quad (11d)$$

从式(11a)中可以得到对于给定的传输功率 p_n 和复用的用户, $\frac{d(\eta_n)}{d\alpha_n} > 0$ 。因此,想使子信道上能效最大,就要找到用户功率分配系数 α_n 的上界,由约束条件式(11b, 11c)可以得到 α_n 的取值范围是 $\frac{A}{H_{2,n} p_n} \leq \alpha_n \leq \frac{H_{1,n} p_n - A}{H_{1,n} p_n (A + 1)}$,其中 $A = 2^{\frac{R_{\min}}{B_{sc}}} - 1$ 。根据 NOMA 功率分配规则,结合式(11d),可得到

最佳用户功率分配系数表达式 $\alpha_n^* = \min \left(\frac{1}{k+1}, \frac{H_{1,n} p_n - A}{H_{1,n} p_n (A + 1)} \right)$ 。

2.2.2 子信道间的信道功率分配

由于在前文中通过把基站总功率均匀地分给子信道,从而得到了用户分组方式和复用用户功率分配系数,这种功率分配方法虽然简单,但不能使系统的能效达到最优,为了进一步提高系统能效,本文将采用一种性能更好的非等功率分配方案来替换等功率分配。

在研究功率分配算法之前,由式(11b,11c)可得到在子信道 SC_n 上满足用户 QoS 的最小传输功率为 $p_{n,\min} = \frac{A(A+1)}{H_{2,n}} + \frac{A}{H_{1,n}}$ 。此外,根据能效表达式可以得到:对于每个子信道,在 $p_n \geq p_{n,\min}$ 的条件下,子信道的能效表达式是严格伪凹函数,证明如下:

根据伪凸函数的定义, $g(x)$ 是凸集上的可微函数,若取凸集上任意不相等两点 x_1, x_2 满足 $\nabla g(x_1)(x_2 - x_1) \geq 0$, 都有 $g(x_2) > g(x_1)$, 则 $g(x)$ 是严格伪凸函数。

可以假设在集合 $x \in (0, +\infty)$ 中, $f(x)$ 是凸函数, $F(x) = \frac{f(x)}{x+c}$, c 为大于 0 的常数, 取集合上任意两点 x_1, x_2 使 $\nabla F(x_1)(x_2 - x_1) \geq 0$ 。又因为对于严格凸函数 $f(x)$, 集合上任意两点 x_1, x_2 , 都有 $f(x_2) - f(x_1) > \nabla f(x_1)(x_2 - x_1)$, 则有

$$0 \leq \nabla F(x_1)(x_2 - x_1) = \nabla \left(\frac{f(x_1)}{x_1+c} \right) (x_2 - x_1) < \frac{(x_1+c)[f(x_2)-f(x_1)] - f(x_1)[(x_2+c)-(x_1+c)]}{(x_1+c)^2} = \frac{(x_1+c)f(x_2) - (x_2+c)f(x_1)}{(x_1+c)^2}$$

因为 $(x_1+c)^2 > 0$, 所以 $(x_1+c)f(x_2) - (x_2+c)f(x_1) > 0$, 可得 $\frac{f(x_2)}{x_2+c} > \frac{f(x_1)}{x_1+c}$, 即 $F(x_2) >$

$F(x_1)$, 所以 $F(x) = \frac{f(x)}{x+c}$ 是严格伪凸函数。令 $f(p_n) = -B_{sc} \left(\log_2(1 + \alpha_n H_{2,n} p_n) + \log_2 \left(\frac{1 + H_{1,n} p_n}{1 + \alpha_n H_{1,n} p_n} \right) \right)$, 因为 $\nabla^2 f(p_n) > 0$, 所以 $f(p_n)$ 是严格凸函数, 那么 $F(p_n) = \frac{f(p_n)}{p_n + p_c}$ 是严格伪凸函数。因此, $\eta_n = -F(p_n)$ 是严格伪凹函数, 得证。

基于函数的拟凹特性,在不考虑子信道的最大传输功率限制的情况下,能效 $\eta_n = F(p_n)$ 的曲线变化随着 $p_n, p_n \geq P_{n,\min}$ 的变化可能会出现两种情况,分别是:

- (1) 随着 p_n 的增加, η_n 减小。
- (2) 随着 p_n 的增加, η_n 先增加后减小。使得能效 η_n 达到最大的最佳传输功率是 p_n^* 。

由于本文的目标是使得系统的能效最大, 所以对于第 1 类子信道 N_1 , 可以直接给其分配满足用户 QoS 的最小传输功率 $P_{n,\min}$, 此时令 $p_n^* = P_{n,\min}$ 。第 2 类子信道 N_2 的最佳传输功率 p_n^* 可以通过解方程 $\frac{d\eta_n}{dp_n} = 0$ 得到。对于所有的子信道最佳传输功率, 如果 $\sum_{n=1}^N p_n^* \leq p_s$, 那么直接设置子信道传输功率为 p_n^* 。否则, 对第 2 类子信道的能效优化问题描述为

$$\max_p \left[\frac{B_{sc} \log_2(1 + \alpha_n H_{2,n} p_n) + B_{sc} \log_2 \left(\frac{1 + H_{1,n} p_n}{1 + \alpha_n H_{1,n} p_n} \right)}{p_n + p_c} \right] \quad (12a)$$

$$\text{s.t. } p_n \geq P_{n,\min} \quad (12b)$$

$$\sum_{SC_n \in N_2} p_n \leq p_s - \sum_{SC_n \in N_1} p_n^* \quad (12c)$$

式中 $P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_2}]^T$, N_2 为第 2 类子信道的数目。式(12b)表示子信道功率满足用户 QoS 的最小传输速率, 式(12a)是典型比率和问题, 可以利用 Dinkelbach 类算法求解出原问题的次优解。子信道功

率分配算法(Dinkelbach类算法)如下,其中S表示约束集合,原来非凸的优化问题被转换为一系列凸优化问题。

(1)初始化。

(a)设置一个控制误差 $\epsilon > 0$,初始迭代次数 $t=0$;

(b)初始能效值 $\eta_{n,t} = 0, n \in \{1, 2, 3, \dots, N_2\}$ 。

(2)若 $|F(\eta_{n,t})| > \epsilon$,则:

$$(a) P^* = \arg \max_{P \in S} \sum_{n=1}^{N_2} \{R_n - \eta_{n,t}(p_n + p_c)\};$$

$$(b) F(\eta_{n,t}) = \max_{P \in S} \sum_{n=1}^{N_2} \{R_n - \eta_{n,t}(p_n + p_c)\};$$

$$(c) \eta_{n,t+1} = \frac{R_n}{(p_n^* + p_c)} \quad n \in \{1, 2, 3, \dots, N_2\};$$

(d) $t = t + 1$ 。

(3)结束算法。

3 仿真结果和性能分析

3.1 复杂度分析

最佳的用户分组方式就是用穷举法搜索所有用户的分组组合,然后选出使得系统能效最大的用户分组方式,若按照本文中一个子信道分配2个用户的规则,则一共需要搜索 $\frac{(2N)!}{2^N}$ 种组合方式,所以穷举法的算法复杂度为 $O\left(\frac{(2N)!}{2^N}\right)$,对数级复杂度为 $O(N \ln N)$ 。本文使用的用户分组方法的复杂性来自算法的2个步骤,分别是优先列表的排序阶段,复杂度为 $O(N^3)$,还有就是分组阶段,复杂度为 $O(N^2)$,所以整个算法的对数级复杂度为 $O(\ln N)$ 。相比穷举法,本文采用的基于贪婪算法的用户分组方法的复杂度要小很多。

3.2 仿真结果与分析

利用 MATLAB 的仿真结果来评估本文中所提到的资源分配方案在 NOMA 下行链路中的性能。在仿真中,假设用户设备均匀地分布在以基站为圆心,半径为 500 m 的圆形小区范围内,用户离基站的最小距离为 50 m。其余的参数设置如表 1 所示。

图 1 显示了系统能效与用户数量的关系,其中,UPA 表示子信道采用本文提出的非等功率分配方案(Unequal power allocation);EPA 则表示子信道采用等功率分配方案(Equal power allocation);文献[9]的算法中子信道上的复用用户功率采用 FTPA 方案,子信道采用 EPA 方案。随着用户数量的增多,系统的容量逐渐接近极值,而系统

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 System simulation parameters

参数	数值
小区半径/m	500
基站最大发射功率 P_s /dBm	41
噪声功率谱密度 N_0 /(dBm·Hz ⁻¹)	-174
固定电路功耗 P_c /W	1
总传输带宽 BW/MHz	5
k	2
FTPA 功率分配因子	0.4
路径损耗因子	3
最小传输速率 R_{\min} /(Mb·s ⁻¹)	1

的最大发射功率不变,这使系统能效随用户数量增多而增加的趋势在变缓。由于NOMA相比传统OFDMA可实现更高的分集增益和频谱效益^[15],本文采用的资源分配方案比传统OFDMA的系统性能更优越。而且相比子信道间等功率分配方案,非等功率分配方案能更有效地利用系统能量,从而达到更高能效。此外,本文的复用用户的功率分配方案确定了复用用户间功率分配系数的表达式,相比文献[9]的算法能达到更高的系统能效。具体地,当用户数为20时,本文算法-UPA达到的系统能效约比OFDMA提高了35%,比本文算法-EPA提高了25%,比文献[9]算法提高了27%。

图2显示了系统的吞吐量与用户数量的关系。由图2可知,在NOMA系统中采用本文所提的资源分配方案可达到的吞吐量明显高于传统OFDMA系统,这是由于OFDMA系统中,一个子信道仅能分配一个用户,所以基站的频谱效率不高,然而对于NOMA系统,一个子信道可以分配多个用户,大大地提高了频谱效率,系统的吞吐量也随之提高。此外,子信道间非等功率分配的系统吞吐量高于子信道等功率分配方案。比如,当用户数为30时,本文算法-UPA达到的系统吞吐量比OFDMA提高了12%,比本文算法-EPA提高了0.7%。结合图1,2,由于UPA方案给信道条件好的用户分配了更多的发射功率,系统的功率得到更有效的分配,使系统在能效和谱效两方面都得到了提高。

图3显示了系统能效与满足用户QoS的最小速率 R_{\min} 之间的关系。从图中可以观察到,在用户数量一定的条件下,若用户所需最小速率大于某一阈值时,系统的能效会急速下降。这是因为当 R_{\min} 增加时,基站需要分配更多的发射功率给用户以满足其QoS,尤其对于信道条件差的用户,会消耗很大的额外功率在信号传输的衰落和路径损耗上。当 R_{\min} 大于某一阈值时,总发射功率的增长速度大于用户速率增长的速度,导致系统能效急速下降,不利于能量的有效利用。从图3还能看出用户数量与系统能效急速下降的阈值成反比。因此,合理地控制用户数量和 R_{\min} 可得到更高的系统能效。

4 结束语

本文研究了下行多用户NOMA系统的资源分配问题,将原始能效最大化问题分成2个子问题分别求解,在用户分组中采用一种基于贪婪算法的方案,这种分组方式大大降低了穷举法用户分组方案的复杂度,基于该用户分组方案,可以得到复用用户的功率分配系数的表达式,为了进一步提高系统的能效,子信道功率分配采用非等功率分配的方案。最后研究结果表明,文中采用的功率分配算法达到的系统能效高于文献[9]中采用的算法,同时NOMA系统的总吞吐量和能效均

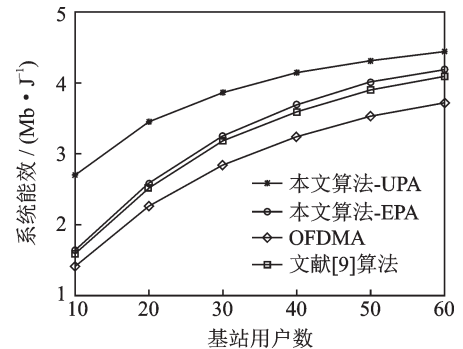


图1 系统能效与用户数量的关系

Fig.1 Energy efficiency of system versus different number of users

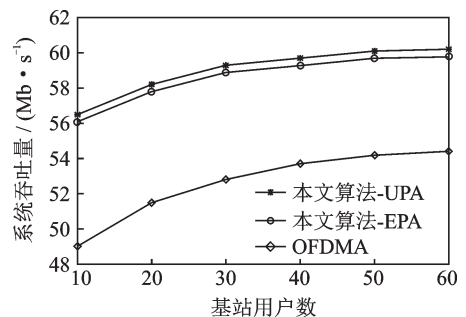


图2 系统吞吐量与基站用户数量的关系

Fig.2 Sum rate of system versus different number of users

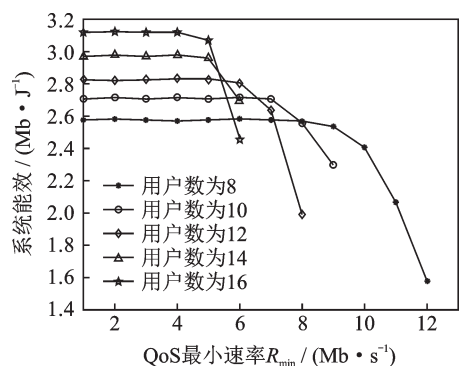


图3 系统能效与用户QoS最小速率的关系图

Fig.3 Energy efficiency of system versus the minimum data rate R_{\min} of QoS

高于 OFDMA 系统。

参考文献:

- [1] Wang C L, Chen J Y, Chen Y J. Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(5): 532-535.
- [2] Yang Zhaohui, Xu Wei, Pan Cunhua, et al. On the optimality of power allocation for NOMA downlinks with individual QoS constraints[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(7): 1649-1652.
- [3] Liang Wei, Ding Zhiguo, Li Yonghui, et al. User pairing for downlink non-orthogonal multiple access networks using matching algorithm[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(12): 5319-5332.
- [4] 周一青, 潘振岗, 翟国伟, 等. 第五代移动通信系统 5G 标准化展望与关键技术研究[J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 714-724.
Zhou Yiqing, Pan Zhengang, Zhai Guowei, et al. Research on the standardization outlook and key technology of 5G mobile communication system[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2015, 30(4): 714-724.
- [5] Ding Zhiguo, Fan Pingzhi, Poor H V. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple-access downlink transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(8): 6010-6023.
- [6] Ding Zhiguo, Liu Yuanwei, Choi J, et al. Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 185-191.
- [7] Benjebbovu A, Li A, Saito Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements[C]//2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Atlanta, USA: IEEE, 2013: 66-70.
- [8] Timotheou S, Krikidis I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647-1651.
- [9] Saito Y, Benjebbour A, Kishiyama Y, et al. System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) [C]//2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC). London, UK: IEEE, 2013: 611-615.
- [10] Zhu Lipeng, Zhang Jun, Xiao Zhenyu, et al. Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(2): 328-331.
- [11] Parida P, Das S S. Power allocation in OFDM based NOMA systems: A DC programming approach[C]//2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Austin, USA: IEEE, 2014: 1026-1031.
- [12] Eddo Z, Hojeij M R, Nour C A, et al. Evaluation of intra-subband power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) system[C]//2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Washington, USA: IEEE, 2016: 1-7.
- [13] Zhang Haijun, Wang Baobao, Jiang Chunxiao, et al. Energy efficient dynamic resource allocation in NOMA networks[C]// GLOBECOM 2017—2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] Zhang Yi, Wang H M, Zheng T X, et al. Energy-efficient transmission design in non-orthogonal multiple access[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 2852-2857.
- [15] Sun Qin, Han Shuangfeng, Chin-Lin I, et al. Energy efficiency optimization for fading MIMO non-orthogonal multiple access systems[C]//2015 IEEE International Conference on Communications (ICC). London, UK: IEEE, 2015: 2668-2673.

作者简介:



胡丽花(1995-),女,硕士研究生,研究方向:移动通信与无线技术, E-mail: 1060403021@qq.com。



宋荣方(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向:宽带无线通信, E-mail: son-grf@njupt.edu.cn。

(编辑:张彤)