

## 新型机会式 NOMA 协作多播方案

陆音<sup>1,2,3</sup>, 陈继荣<sup>2</sup>, 卞皓伟<sup>2</sup>, 朱洪波<sup>2,3</sup>

(1. 南京邮电大学物联网学院, 江苏 南京 210003; 2. 南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室, 江苏 南京 210003;  
3. 南京邮电大学教育部泛在网络健康服务系统工程研究中心, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 将认知无线电技术应用于非正交多址接入 (NOMA) 协作多播系统, 研究了将用户作为中继的可行性, 提出了一种带参数的多播候选集的二级协作传输方案。该方案先由基数  $q$  选出候选集, 再根据主用户和候选次用户之间的信道增益选出最佳的转发节点。仿真结果表明, 通过合理选择构造参数  $q$ , 所提方案在减少次用户分集增益损失的同时, 能够大幅提高主用户的分集增益。在  $N$  个多播用户组成的 NOMA 协作多播场景中, 将主用户的分集增益从 2 提升到  $\min(N-q+2, q+1)$ , 满足主用户可靠性的要求。

**关键词:** 非正交多址接入; 协作多播; 中继选择; 认知无线电

**中图分类号:** TN929.5

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2020239

## Novel opportunistic cooperative multicast scheme for NOMA

LU Yin<sup>1,2,3</sup>, CHEN Jirong<sup>2</sup>, BIAN Haowei<sup>2</sup>, ZHU Hongbo<sup>2,3</sup>

1. School of Internet of Things, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Wireless Communications, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

3. Ministry of Education Ubiquitous Network Health Service System Engineering Research Center,  
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

**Abstract:** The cognitive radio technology was applied to non-orthogonal multiple access (NOMA) cooperative multicast system, the feasibility of using users as relays was studied, and a two-level cooperative transmission scheme with parameterized multicast candidate sets was proposed. Specifically, the scheme first selected the candidate set according to the cardinality  $q$ , and then selected the best forwarding node based on the channel gain between the primary users and the candidate secondary users. Simulation results show that, through the reasonable selection of the cardinality  $q$ , the proposed scheme can greatly reduce the diversity gain of the secondary users while simultaneously increasing the diversity gain of the primary users. In NOMA cooperative multicast scenario composed of  $N$  multicast users, the proposed scheme can increase the diversity gain of the primary users from 2 to  $\min(N-q+2, q+1)$  to meet their reliability requirements.

**Key words:** non-orthogonal multiple access, cooperative multicast, relay selection, cognitive radio

### 1 引言

在万物互联时代, 信息技术与通信技术不断地交叉和融合, 形成了信息和通信技术 (ICT, information and communications technology)。近年来热度颇高的 ABCDEFG, 即人工智能 (AI, artificial

intelligence)、区块链 (blockchain)、云计算 (cloud computing)、大数据 (big data)、生态 (ecology)、人脸识别 (face recognition)、5G 网络等都属于 ICT 范畴。移动通信与计算是 ICT 领域的两大核心技术。为了突破传统移动通信发展的瓶颈, 通信与计算在系统层面的融合成为一个重要的发展方向<sup>[1]</sup>。文献[1]指

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61271236, No.61871446); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目 (No.17KJA510004)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (No.61271236, No.61871446), The Major Project of Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (No.17KJA510004)

出, 在接入网中, 移动通信无线传输的研究一直致力于提升频谱利用率, 逼近香农容量理论极限。任何一种移动传输技术都离不开计算, 并且计算在其中所起的作用越发重要。通信与计算融合能有效降低移动通信网络部署与维护成本, 以及对系统的容量需求, 从而提升系统支撑业务的能力。

为了“面向未来”, 5G 已经成为全球无线通信领域的研究热点。多样化的应用场景以及倍数增长的性能指标导致了无线频谱资源的日益匮乏, 这对 5G 的多址接入技术提出了苛刻的要求<sup>[2-3]</sup>。在现有的多址接入技术中, 非正交多址接入 (NOMA, non-orthogonal multiple access) 技术脱颖而出。研究表明, NOMA 技术以不同功率将多个信息流在时域/频域/码域重叠的信道上传输<sup>[4]</sup>, 在相同无线资源上为多个用户同时提供无线业务, 通过通信与计算的融合, 可显著提高系统频谱效率和用户接入能力, 降低用户调度信令开销, 缩短接入时延, 降低终端能耗<sup>[5-9]</sup>。

认知无线电 (CR, cognitive radio) 被认为是一种提高频谱效率的有效方法, 通过对空闲授权频段的再次利用, 提高了无线频谱的利用率, 成为解决无线频谱资源匮乏问题的重要途径<sup>[10-11]</sup>。在 CR 系统中, 次用户 (SU, secondary user) 必须使用较低的发送功率以保障主用户 (PU, primary user) 的传输质量, 从而限制 SU 的传输速率和通信范围<sup>[12]</sup>。文献[13]指出, NOMA 是 CR 的特例。信道条件差的用户被视为主用户, 而信道条件好的用户被视为次用户。通过将 NOMA 引入 CR 系统(以下称为 CR-NOMA), 可以大大增加 SU 访问授权频谱的机会<sup>[14]</sup>。例如, 如果采用传统的多址接入方式, 即使信道条件较差, 分配给 PU 的正交频谱也不能被 SU 接入, 从而导致 SU 的服务时延较长, 系统吞吐量较低。CR-NOMA 保证了 PU 和 SU 可以同时使用, 而不会导致 PU 的性能下降太多, 有效地提高了频谱利用率。

在万物互联时代, CR-NOMA 与协作通信相结合, 可以提升频谱利用率, 增强网络覆盖范围, 提高通信可靠性, 从而提升网络性能, 这对 CR-NOMA 研究具有重要意义。文献[15]指出, 多播服务如何利用协作传输进一步提高 CR-NOMA 系统性能, 是一个有待解决的问题。协作 CR-NOMA 的核心思想在于, 多个 SU 可以为获得访问 PU 频谱的机会提供补偿<sup>[16-20]</sup>。换言之, 在连续干扰消除 (SIC, successive interference cancellation) 的帮助下, 发送给 PU 的信息可以由 SU 解码。因此, 这些 SU 可以

作为潜在的中继, 协助 SU 源节点的数据传输, 不但增大了无线传输的空间分集增益, 使频谱利用率进一步提高, 而且能够增强 SU 的抗衰落能力, 提高 CR-NOMA 系统的性能<sup>[21-23]</sup>。

文献[24]将 NOMA 应用于底层无线网络, 利用随机几何对其性能进行了分析, 但没有对协作传输方案进行研究。文献[25]着重于节能式两阶段协作多播传输, 在确保实际覆盖率的同时将总传输功率降至最低。在文献[25]的基础上, 文献[26]研究了用户密度对能量效率的影响, 进一步挖掘了两阶段协作多播传输方案的性能。文献[27]提出了正交多址接入 (OMA, orthogonal multiple access) 基于最佳用户转发的协作多播方案, 即 Max-Min 准则。该方案可取得满分集增益, 分集增益阶数等于次用户数目, 克服了最佳中继转发协作多播<sup>[28-32]</sup>的可靠性随用户数目增长而恶化的不足。文献[15]将该方案应用在 CR-NOMA 系统中, 把单播用户设为主用户, 多播用户设为次用户, 根据多播用户之间的信道增益再选择最佳转发节点。文献[15]证明了基于最佳次用户转发的协作多播方案中, 次用户的分级增益等于多播用户数, 协作多播的可靠性也随着次用户数目增加而提高。该方案虽然充分考虑了多播用户的可靠性, 但是单播用户却没有得到保证, 只有两阶的分集增益阶数。

本文在文献[15]的基础上, 提出了一种新型机会式 NOMA 协作多播方案, 并构造多播候选集的二级协作 Max-Min 准则。首先剔除信道增益较差的多播用户, 然后根据候选多播用户集和单播用户之间的信道增益, 从多播用户集中选择最佳转发节点。本文所考虑的场景可以直接应用于当前的蜂窝网络, 其中本地 SU 可能拥有附近接收方的通用数据分组, 例如, 本地销售人员可以向碰巧在附近的人发送相同的广告消息, 而 PU 位于该小区边缘。仿真结果表明, 本文方案在确保多播用户接收可靠性的前提下, 能最大限度地提高单播用户获得的分集增益, 相比于原方案在主用户可靠性上有了提高, 性能得以改善。

## 2 系统模型

下行 CR-NOMA 系统模型如图 1 所示。在该系统中, 基站 (BS, base station) 给一组主用户发送单播信息 (称为单播用户), 给一组次用户发送多播信息 (称为多播用户),  $N$  个多播用户  $\{d_1, \dots, d_N\}$  和  $M$  个单播用户  $\{p_1, \dots, p_M\}$  组成 NOMA 协作多播场

景。通过使用 NOMA 信令，享有高优先级的 PU 消息和低优先级的 SU 消息同时从 BS 传输。假设所有节点都配备一根天线，在半双工模式下工作，系统中所有链路的信道衰落因子彼此独立且服从不同参数的随机概率分布。每个节点的总发射功率为  $P$ ，加性高斯白噪声由一个均值为 0、方差为  $N_0$  的复高斯变量表示。为提高系统频谱效率及多播业务可靠性，系统将单播用户与多播用户在相同无线资源接入，并由多播用户向单播用户转发信息，提高单播用户接收信号质量，获取分集增益。

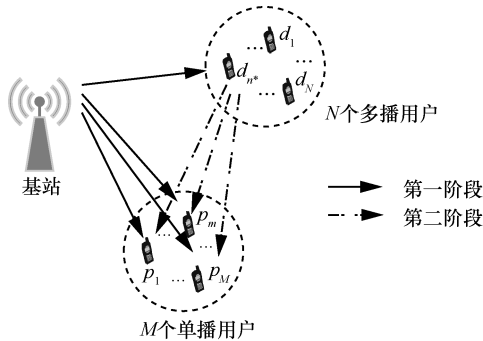


图 1 下行 CR-NOMA 系统模型

假设 BS 与多播用户  $d_n$  之间链路的信道衰落因子为  $h_{b,n}$ ，BS 与单播用户  $p_m$  之间链路的信道衰落因子为  $h_{b,m}$ ，多播用户  $d_n$  与单播用户  $p_m$  之间链路的信道衰落因子为  $h_{n,m}$ ，多播用户  $d_n$  与多播用户  $d_{n'}$  之间链路的信道衰落因子为  $h_{n,n'}$ 。

为确保多播用户接收信号质量，构造一个仅包含信道质量较好多播用户的用户候选集  $\varphi$ 。首先将基站 BS 与各多播用户间信道增益按照升序排列为

$$|h_{b,1}|^2 < |h_{b,2}|^2 < \dots < |h_{b,n}|^2 < \dots < |h_{b,N}|^2 \quad (1)$$

其中， $|h_{b,n}|^2$  表示按照升序排列后第  $n$  个信道的增益值。根据排序结果，将最大的  $q$  个信道增益值对应的多播用户选择为候选多播用户，构造多播用户候选集  $\varphi \triangleq \{d_{(N-q+1)}, d_{(N-q+2)}, \dots, d_{(N)}\}$ ，其中， $q$  为预设的多播用户候选集基数， $d_{(n)}$  对应信道增益为  $|h_{b,n}|^2$  的多播用户。候选用户集中的多播用户到基站的信道条件较好，后续选择最佳转发用户时，能够减小差错。因为剔除了一些信道条件差的用户，所以能够减少节点之间的交互，降低开销。

在 CR-NOMA 系统中，从多播用户候选集  $\varphi$  中最优地选择一个多播用户  $d_{n^*}$  与单播用户同时接入，由多播用户  $d_{n^*}$  转发单播用户信息。由于多播用户采用“解码-转发”机制，即解码成功后对单播用户信息

重新编码调制并转发，单播用户接收到的转发信号不受“基站-多播用户”链路的信道质量影响。当存在至少一个单播用户解码失败时，单播传输中断，故单播传输可靠性受制于接收信号质量最差的多播用户。综合上述两方面原因，本文根据“候选多播用户-单播用户”链路的信道增益，设计了如式 (2) 所示的 Max-Min 最佳多播用户选择准则。

$$d_{n^*} = \arg \max_{d_n \in \varphi} \left[ \min_{m=1, \dots, M} |h_{n,m}|^2 \right] \quad (2)$$

通过该准则选择的最佳多播用户，可最大化多播用户最差转发链路的信道增益，进而最大限度地提高转发链路的最低信噪比 (SNR, signal to noise ratio)。

### 3 转发策略

本文方案包含系统调度、直接传输和协作转发 3 个阶段，其中，系统调度占用  $M+5$  个时长为  $t_0$  的调度子时隙，直接传输和协作转发各占用一个时长为  $T_0$  的传输时隙， $t_0 \ll T_0$ 。本文方案时隙如图 2 所示。

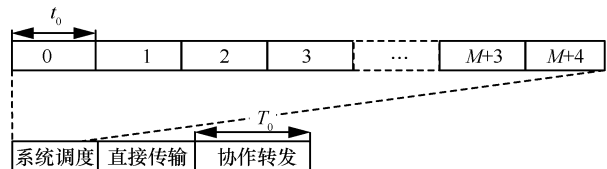


图 2 本文方案时隙

本文方案的流程如图 3 所示，具体步骤如下。

**步骤 1** 在调度子时隙 0，基站广播信道增益获取请求信号，多播用户  $d_n$  通过接收参考信号获取信道增益。

**步骤 2** 在调度子时隙 1，各个多播用户开启一个本地计时器，计时器的初始值为  $T_n = t_0 e^{-\frac{1}{|h_{b,n}|^2}}$ ，设置完成后开始倒计时，当计时器倒计时至 0 时，广播自身 ID。在调度子时隙 1 结束后，基站构造候选集  $\varphi$  的 ID 序列  $O_d^q \triangleq \{ID_{(N-q+1)}, \dots, ID_{(N)}\}$ ，其中  $ID_{(n)}$  表示基站收到的第  $n$  个 ID。

**步骤 3** 在调度子时隙 2，基站广播多播用户候选集  $\varphi$  的 ID 序列  $O_d^q$ 。在收到  $O_d^q$  后，各多播用户自主决定是否成为候选多播用户。若  $O_d^q$  包含多播用户  $d_n$  的 ID，则多播用户  $d_n$  进入候选状态，否则多播用户  $d_n$  进入空闲状态并保持静默。

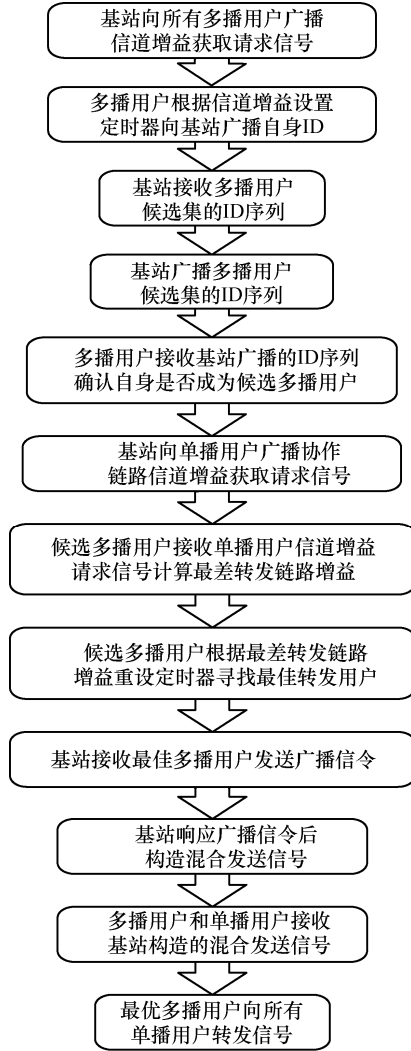


图 3 本文方案的流程

**步骤 4** 在调度子时隙 3, 各单播用户广播协作链路信道增益获取请求信号。在收到该请求后, 各单播用户准备在调度子时隙 4 至调度子时隙  $M+3$  中分别发送参考信号, 各候选多播用户准备接收参考信号。

**步骤 5** 在调度子时隙 4 至调度子时隙  $M+3$ , 单播用户广播信道增益获取请求信号, 候选多播用户  $d_n$  根据收到的参考信号获取信道增益  $|h_{n,m}|^2$ 。当调度子时隙  $M+3$  结束时,  $d_n$  获取了自身与所有单播用户链路间信道增益, 并基于此计算最差转发链路信道增益  $g_n^{WC} \triangleq \min_{m=1, \dots, M} |h_{n,m}|^2$ 。

**步骤 6** 在调度子时隙  $M+4$ , 候选多播用户  $d_n$  重新开启一个本地计时器, 将初始值设为  $T_n = t_0 e^{-g_n^{WC}}$  并开始倒计时。率先倒计时至零的候选多播用户  $d_n$  广播信令“最佳用户”及相应的  $ID_{n^*}$ , 其他候选多播用户收到该信令后取消计时器, 进入

空闲状态并保持静默, 基站收到该信令后准备开始传输。

**步骤 7** 在传输时隙 0, 基站根据收到的  $ID_{n^*}$  构造混合发送信号  $S_{BC}(t)$  并发送。首先, BS 分别对单播用户和多播用户  $d_{(N-q+1)}, d_{(N-q+2)}, \dots, d_{(N)}$  需要的原始信息进行编码调制, 构造相应的单位功率信号  $S_0(t)$  和  $S_1(t)$ 。接着, BS 根据预设功率分配比例, 将可用发送功率  $P_{BS}$  在信号  $S_0(t)$  和  $S_1(t)$  之间分配。基站为信号  $S_0(t)$  分配的发送功率为  $a_0 P_{BS}$ , 为信号  $S_1(t)$  分配的发送功率为  $a_1 P_{BS}$ , 其中,  $a_0$  和  $a_1$  为功率分配因子, 满足  $a_0 + a_1 = 1$ 。最后, 基站将经功率分配后的 2 个信号叠加, 生成发送信号, 如式(3)所示。

$$S_{BC}(t) = \sqrt{a_0 P_{BS}} S_0(t) + \sqrt{a_1 P_{BS}} S_1(t) \quad (3)$$

BS 向单播用户和所有多播用户广播发送信号  $S_{BC}(t)$ 。经无线信道传输后, 多播用户  $d_{n^*}$  的接收信号为

$$y_{n^*}^d = h_{b,n^*} S_{BC}(t) + z_{n^*}^d = \sqrt{a_0 P_{BS}} h_{b,n^*} S_0(t) + \sqrt{a_1 P_{BS}} h_{b,n^*} S_1(t) + z_{n^*}^d \quad (4)$$

单播用户  $p_m$  的接收信号为

$$y_m^p = h_{b,m} S_{BC}(t) + z_m^p = \sqrt{a_0 P_{BS}} h_{b,m} S_0(t) + \sqrt{a_1 P_{BS}} h_{b,m} S_1(t) + z_m^p \quad (5)$$

其中,  $z_{n^*}^d$  和  $z_m^p$  分别表示多播用户  $d_{n^*}$  和单播用户  $p_m$  处的白噪声, 服从复高斯分布  $CN(0, \sigma_0^2)$ 。

多播用户  $d_{n^*}$  接收到混合信号后, 先解码单播用户信号, 相应的解码信干噪比 (SINR, signal-to-interference-plus-noise ratio) 为

$$\gamma_{n^*,0}^d = \frac{|h_{b,n^*}|^2 a_0}{|h_{b,n^*}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} \quad (6)$$

通过 SIC 移除单播用户信号后, 多播用户  $d_{n^*}$  解码自身期望信号, 相应的解码 SNR 为

$$\gamma_{n^*,1}^d = \frac{P_{BS} a_1 |h_{b,n^*}|^2}{\sigma_0^2} \quad (7)$$

此时隙结束时, 多播用户  $d_{n^*}$  利用 SIC 先解码单播用户信号, 再解码期望信号。

**步骤 8** 在传输时隙 1, 多播用户  $d_{n^*}$  将获取的单播用户信息重新编码调制并转发。若多播用户  $d_{n^*}$  解码成功, 则对获取的单播用户信息重新编码调制, 得到包含单播用户信息的单位功率信号  $S_0(t)$ , 并以功率  $P_d$  向所有单播用户转发该信号。单播用户

$p_m$  接收到转发信号后, 将该信号与直接传输阶段的接收信号合并后进行解码, 合并后的 SINR 为

$$\gamma_{m,0}^p = G \left( \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}}, \frac{P_d |h_{n^*,m}|^2}{\sigma_0^2} \right) \quad (8)$$

其中,  $G(x_1, x_2, \dots)$  表示合并器输入-输出 SNR 函数, 该表达式取决于单播用户合并信号方式。以最大比合并和选择式合并为例,  $G(x_1, x_2, \dots)$  可表示为如式(9)所示形式。

$$G(x_1, x_2, \dots) = \begin{cases} x_1 + x_2 + \dots, & \text{最大比合并} \\ \max(x_1, x_2, \dots), & \text{选择式合并} \end{cases} \quad (9)$$

若多播用户  $d_{n^*}$  解码失败, 则不转发信息, 单播用户  $p_m$  解码直接传输阶段的接收信号, 其 SINR 为

$$\gamma_{m,0}^p = \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} \quad (10)$$

此时隙结束时, 单播用户  $p_m$  将该信号与来自基站的接收信号合并后解码。

## 4 性能分析

### 4.1 开销分析

本文方案的开销分析如下。

通信开销。步骤 1 中基站发送参考信号一次, 步骤 2 中各多播用户广播 ID 信息共  $N$  次, 步骤 3 中基站广播多播用户候选集 ID 序列一次, 步骤 4 中基站广播信令一次, 步骤 5 中各单播用户发送参考信号共  $M$  次, 步骤 6 中多播用户广播 ID 信息一次。因此, 本文方案的通信开销为  $N+M+4$ 。

计算开销。步骤 2 中各多播用户设置本地计时器初始值的开销为  $N$ , 基站构造多播用户候选集 ID 序列的开销为  $N$ , 步骤 5 中各候选多播用户计算最差转发链路信道增益的开销共为  $qM$ , 步骤 6 中各候选多播用户设置本地计时器初始值的开销共为  $q$ 。因此, 本文方案的计算开销为  $qM+2N+q$ 。

信号处理开销。本文方案中仅有多播用户  $d_{n^*}$  使用 SIC 解码 2 次。

综上, 本文方案总开销至多为  $O(MN)$ , 其中, 基站开销为  $O(N)$ , 各单播用户开销至多为  $O(M)$ , 各多播用户开销为  $O(1)$ 。

### 4.2 多播可靠性分析

假设多播用户  $d_{n^*}$  和单播用户  $\{p_1, \dots, p_M\}$  的目标速率分别为  $R_d$  和  $R_p$ 。

本文方案中多播用户  $d_{n^*}$  需要从混合信号中先解码单播用户信号, 再解码期望信号, 这两次解码中的任意一次解码失败均可导致多播用户解码失败。因此, 多播用户  $d_{n^*}$  的中断概率可表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^d &= \left( \gamma_{n^*,0}^d < \tau_p \triangleq 2^{R_p} - 1 \cup \gamma_{n^*,1}^d < \tau_d \triangleq 2^{R_d} - 1 \mid d_{n^*} \in \varphi \right) = \\ &= 1 - \Pr \left( \gamma_{n^*,0}^d \geq \tau_p, \gamma_{n^*,1}^d \geq \tau_d \mid d_{n^*} \in \varphi \right) = \\ &= 1 - \Pr \left( \frac{|h_{b,n^*}|^2 a_0}{|h_{b,n^*}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} \geq \tau_p, \frac{P_{BS} a_1 |h_{b,n^*}|^2}{\sigma_0^2} \geq \tau_d \mid d_{n^*} \in \varphi \right) \stackrel{(a)}{=} \\ &= 1 - \Pr \left( |h_{b,n^*}|^2 \geq \max \left[ \frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_{BS} (a_0 - a_1 \tau_d)}, \frac{\sigma_0^2 \tau_d}{a_1 P_{BS}} \right] \mid d_{n^*} \in \varphi \right) = \\ &= \Pr \left( |h_{b,n^*}|^2 < \vartheta \mid d_{n^*} \in \varphi \right) \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $\vartheta$  定义为  $\max \left[ \frac{\tau_p}{a_0 - a_1 \tau_d}, \frac{\tau_d}{a_1} \right]$ ,  $\lambda_{b,n^*}$  定义为  $|h_{b,n^*}|^2$  的均值。定义发送 SNR 为  $\rho \triangleq \frac{P_{BS}}{\sigma_0^2} =$

$\frac{\mu P_d}{\sigma_0^2}$  ( $\mu > 0$ ), 可得多播用户  $d_{n^*}$  的中断概率表达式为

$$P_{\text{out}}^d = \prod_{n^* \in \{N-q+1, \dots, N\}} \left( 1 - e^{-\frac{\vartheta}{\rho \lambda_{b,n^*}}} \right) \quad (12)$$

式(11)中等式(a)成立的条件是  $(a_0 - a_1 \tau_d) > 0$ , 该条件由基站的信号间功率分配和传输速率的设置来保证。由于  $d_{n^*} \in \varphi$ , 则有  $|h_{b,n^*}|^2 \geq |h_{b,N-q+1}|^2$ , 将该不等式代入式(11), 得到  $P_{\text{out}}^d$  的上界为

$$P_{\text{out}}^d \leq \Pr(|h_{b,N-q+1}|^2 < \vartheta) \quad (13)$$

根据排序统计理论和概率统计理论, 式(13)的中断概率上界可在瑞利衰落下进一步表示为

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^d &\leq \sum_{i=N-q+1}^N \sum_{\substack{\theta_i \subseteq \{1, \dots, N\} \\ \text{card}\{\theta_i\}=i}} \prod_{n \in \theta_i} \Pr \left( |h_{b,n}|^2 < \frac{\vartheta}{P_{BS}} \right) \\ &= \prod_{n^* \in \{1, \dots, N\} \setminus \theta_i} \Pr \left( |h_{b,n^*}|^2 < \frac{\vartheta}{P_{BS}} \right) = \end{aligned}$$

$$\sum_{i=N-q+1}^N \sum_{\substack{\theta_i \subseteq \{1, \dots, N\} \\ \text{card}\{\theta_i\}=i}} \prod_{n \in \theta_i} \left[ 1 - e^{-\frac{\rho}{P_{BS} \lambda_{b,n}}} \right] \prod_{n' \in \{1, \dots, N\} \setminus \theta_i} e^{-\frac{\rho}{P_{BS} \lambda_{b,n'}}} \quad (14)$$

其中,  $\text{card}(X)$ 表示集合  $X$  的基数,  $n'$ 表示  $\theta_i$  在集合  $\{1, \dots, N\}$  中的补集。根据发送 SNR 定义, 由式(14)可进一步得到  $P_{\text{out}}^d$  的渐进上界为

$$P_{\text{out}}^d \stackrel{\rho \rightarrow \infty}{<} \sum_{\substack{\theta_{N-q+1} \subseteq \{1, \dots, N\} \\ \text{card}\{\theta_{N-q+1}\}=N-q+1}} \sum_{n \in \theta_i} \frac{\rho}{\rho \lambda_{b,n}} \propto \left( \frac{1}{\rho} \right)^{N-q+1} \quad (15)$$

由式(15)可知, 多播用户  $d_n^*$  可取得的分集增益至少为  $G_D^d = N - q + 1$ 。

文献[15]的方案也分为 2 个传播阶段。第一阶段, 基站发送叠加信号给多播用户和单播用户, 将能够同时解码叠加信号的多播用户的集合称为成功解码集合, 记为  $D$ 。第二阶段, 从  $D$  中选出最佳多播用户, 记为  $s$ 。但不同于本文方案根据候选多播用户与单播用户之间最差链路信道增益最大化的考虑, 文献[15]方案考虑的是成功解码集合  $D$  和失败解码集合  $\bar{D}$  之间最差链路信道增益最大化。当  $\rho \rightarrow \infty$  时, 中断概率表达式为

$$P_{\text{out}}^s \stackrel{\rho \rightarrow \infty}{\propto} \left( \frac{1}{\rho} \right)^N \quad (16)$$

由式(16)可知, 多播用户  $s$  取得满分集增益。

由式(15)和式(16)可知, 因为剔除了一定数目信道条件差的多播用户, 本文方案多播用户分集增益略少于文献[15]方案的多播用户分集增益, 保障了多播业务的传输可靠性。

### 4.3 单播可靠性分析

当至少有一个单播用户未解码成功时, 单播传输中断, 中断概率可表示为

$$P_{\text{out}}^p = \Pr \left( \min_{m=1, \dots, M} \gamma_{m,0}^p < \tau_p \triangleq 2^{R_p} - 1 \right) = P_{\text{out}}^d \Pr \left( \min_{m=1, \dots, M} \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} < \tau_p \right) + (1 + P_{\text{out}}^d) \Pr \left( G \left( \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}}, \frac{P_d |h_{n^*,m}|^2}{\sigma_0^2} \right) < \tau_p \right) \quad (17)$$

本文采用选择式合并,  $G(x,y)=\max(x,y)$ 。由文献[15]的定理 2 可推导出单播用户中断概率的表达式为

$$P_{\text{out}}^p = P_{\text{out}}^d \left( 1 - \Pr \left( \min_{m=1, \dots, M} \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} > \tau_p \right) \right) + (1 - P_{\text{out}}^d) \Pr \left( \max \left( \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}}, \frac{P_d |h_{n^*,m}|^2}{\sigma_0^2} \right) < \tau_p \right) = P_{\text{out}}^d \left( 1 - \Pr \left( \min_{m=1, \dots, M} (|h_{b,m}|^2) > \frac{\rho}{\rho} \right) \right) + (1 - P_{\text{out}}^d) \left( \Pr \left( |h_{b,m}|^2 < \frac{\varpi}{\rho} \right) \Pr \left( |h_{b,m}|^2 < \frac{\zeta}{\rho} \right) \sum_{n \in \{N-q+1, \dots, N\}} \Pr(n^* = n) \right) = P_{\text{out}}^d \left( 1 - e^{-\sum_{m \in \{1, \dots, M\}} \frac{\rho}{\rho \lambda_{b,m}}} \right) + (1 - P_{\text{out}}^d) \left( \left( 1 - e^{-\frac{\varpi}{\rho \lambda_{b,m}}} \right) \left( 1 - e^{-\frac{\zeta}{\rho \lambda_{b,m}}} \right) \sum_{n \in \{N-q+1, \dots, N\}} \Pr(n^* = n) \right) \quad (18)$$

其中,  $\varpi$  定义为  $\frac{\tau_p}{a_0 - a_1 \tau_d}$ ,  $\zeta$  定义为  $\mu \tau_p \left( \mu = \frac{P_d}{P_{BS}} \right)$ ,  $\lambda_{b,m}$  定义为  $|h_{b,m}|^2$  的均值。根据文献[15]附录 B, 将本文  $\Pr(n^*=n)$  定义为

$$\Pr(n^* = n) = 1 + \sum_{r=1}^{q-1} \sum_{\substack{\xi_r \subseteq \{N-q+1, \dots, N\} - n \\ |\xi_r|=q-1}} (-1)^r \cdot \left[ \frac{\sum_{m \in \{1, \dots, M\}} \frac{1}{\lambda_{b,m}}}{\sum_{m \in \{1, \dots, M\}} \frac{1}{\lambda_{n,m}} + \sum_{i \in \xi_r} \sum_{m' \in \{1, \dots, M\}} \frac{1}{\lambda_{r,m'}}} \right] \quad (19)$$

由式(9)可知,  $G(x,y)=\max(x,y)$ , 代入式(17)可得  $P_{\text{out}}^p$  的上界为

$$P_{\text{out}}^p = P_{\text{out}}^d \Pr \left( \min_{m=1, \dots, M} \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{BS}}} < \tau_p \right) +$$

$$(1 + P_{\text{out}}^d) \Pr \left[ G \left( \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{\text{BS}}}}, \frac{P_d |h_{n^*,m}^*|^2}{\sigma_0^2} \right) < \tau_p \right] \quad (20)$$

$\omega_2$

当  $a_0 - a_1 \tau_d > 0$  时,  $\omega_1$  在瑞利衰落下的解析表达式和高信噪比渐进表达式为

$$\omega_1 = \left( 1 - e^{-\frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_{\text{BS}}(a_0 - a_1 \tau_d)} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{b,m}}} \right)^{\rho \rightarrow \infty} \simeq \frac{\tau_p}{\rho(a_0 - a_1 \tau_d)} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{b,m}} \quad (21)$$

$\omega_2$  在瑞利衰落下的上界及渐进上界为

$$\omega_2 \leq \Pr \left[ \min_{m=1, \dots, M} \frac{|h_{b,m}|^2 a_0}{|h_{b,m}|^2 a_1 + \frac{\sigma_0^2}{P_{\text{BS}}}} < \tau_p, \frac{P_d \min_{m=1, \dots, M} |h_{n^*,m}^*|^2}{\sigma_0^2} < \tau_p \right] =$$

$$\left[ \left( 1 - e^{-\frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_{\text{BS}}(a_0 - a_1 \tau_d)} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{b,m}}} \right) \prod_{d_n \in \varphi} \left( 1 - e^{-\frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_d} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{n,m}}} \right) \right]^{\rho \rightarrow \infty} \simeq$$

$$\frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_{\text{BS}}(a_0 - a_1 \tau_d)} \left( \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{b,m}} \right) \prod_{d_n \in \varphi} \left( \frac{\sigma_0^2 \tau_p}{P_d} \sum_{m=1}^M \frac{1}{\lambda_{n,m}} \right) \quad (22)$$

其中,  $\lambda_{n,m}$  定义为  $|h_{n,m}|^2$  的均值。联立式(15)及式(20)~式(22), 可得

$$P_{\text{out}}^p \propto \left( \frac{1}{\rho} \right)^{\min(N-q+2, q+1)} \quad (23)$$

在文献[15]方案中, 单播用户  $P'$  的中断概率为

$$P_{\text{out}}^{p'} \xrightarrow{\rho \rightarrow \infty} \propto \left( \frac{1}{\rho} \right)^2 \quad (24)$$

由式(23)可知, 本文方案中单播用户可获得  $G_D^p = \min(N - q + 2, q + 1)$  的分集增益。

由式(24)可知, 文献[15]方案的单播用户分集增益只有 2, 但是通过本文设计的最佳多播用户转发机制, 单播用户至少可取得  $q+1$  阶分集增益。只要进行了候选集的挑选 ( $q \geq 1$ ), 即可获得不少于文献[15]方案的分集增益, 有效地改善了单播业务的传输可靠性。

## 5 仿真分析

在瑞利衰落信道下, 对本文方案和文献[15]中没有选择基数的 CR-NOMA 方案进行了仿真对比。

为了不失普遍性, 基站和主用户 PU 分别位于坐标(0,0)和(1,1), 次用户均匀地分布在第一象限  $1 \times 1$  大小(归一化处理)的正方形区域内。平均信道增益设置为  $\lambda_{i,j} = d_{i,j}^{-\eta}$ ,  $d_{i,j}$  为节点  $i$  和  $j$  之间的归一化距离,  $\eta$  为路径损耗系数。对应于城市蜂窝网络环境,  $\eta$  设置为 3。对于瑞利衰落场景, 设置  $R_p = 1 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ ,  $R_d = 1.5 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$ 。与文献[15]设置的功率分配系数相同, 在 NOMA 系统中, 为了保证分配给主用户的功率系数大于分配给次用户的, 本文将第一阶段和第二阶段中的主用户和次用户功率分配系数分别设置为 0.8 和 0.2, 这样保证了较理想的仿真环境, 能更好地比较 2 种方案的性能。根据  $\vartheta$  的定义, 功率分配系数对  $\vartheta$  的影响是几何级, 并不影响多播用户和单播用户的中断概率。

根据 4.2 节和 4.3 节中的 2 个等式  $G_D^d = N - q + 1$  和  $G_D^p = \min(N - q + 2, q + 1)$  可知, 当次用户候选集基数  $q$  增大时, 一方面, 次用户的分集增益  $G_D^d$  将随之降低; 另一方面, 若  $N - q + 2 > q + 1$ , 主用户的分集增益  $G_D^p$  将随之提高, 若  $N - q + 2 \leq q + 1$ , 主用户的分集增益  $G_D^p$  将随之降低。将 2 个等式联立消去基数  $q$  后, 单播用户和多播用户的分集增益折中关系可表示为  $G_D^p = \min(N + 2 - G_D^d, G_D^d + 1)$ , 相应的折中曲线如图 4 所示。具体来说, 次用户数  $N=5$ , 候选集基数  $q=2$ ,  $G_D^d = 4$ ,  $G_D^p = 3$ ; 候选集基数  $q=3$ ,  $G_D^d = 3$ ,  $G_D^p = 4$ ; 候选集基数  $q$  取 4,  $G_D^d = 2$ ,  $G_D^p = 3$ 。可见, 随着基数  $q$  的增加, 次用户的分集增益  $G_D^d$  从 4 减少到 2, 主用户的分集增益  $G_D^p$  先增后减并在  $q=3$  时达到最大值。这一点也可从图 4 中看出, 当次用户的分集增益  $G_D^d$  为 3 时, 主用户的分集增益  $G_D^p$  有最大值 3。同样, 当次用户数  $N$  为 10 时, 候选集基数  $q=5$ , 次用户  $G_D^d$  与主用户  $G_D^p$  都是 6; 候选集基数  $q=6$ , 次用户  $G_D^d$  与主用户  $G_D^p$  分别为 5 和 6。在这 2 种情况下, 次用户的分集阶数降低, 但是主用户的分集阶数得到很大的提高且有最大值。对于次用户数目更多的情形, 此结果仍然适用。由以上分析可知, 随着基数  $q$  的增加, 次用户的分集增益将会降低, 主用户的分集增益却会先升后降, 并且在  $q$  取合适值时达到最大值, 大于文献[15]方案中的固定分集数 2。

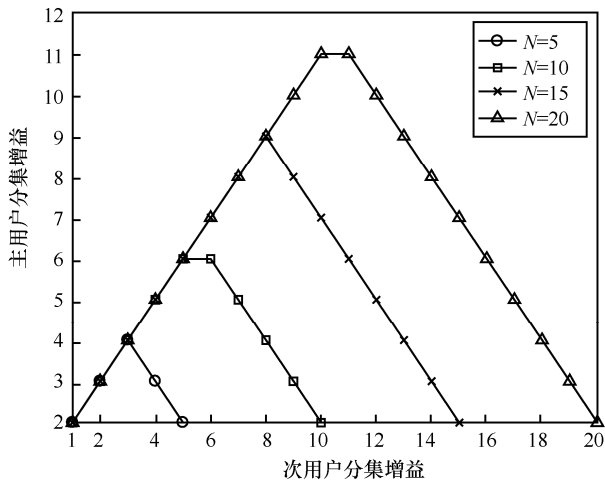


图 4 主用户分集增益  $G_m^*$  与次用户分集增益  $G_s^*$  折中关系

图 5 显示了 2 种方案下主用户中断概率随 SNR 的变化情况。可以看出，未选择基数的 CR-NOMA 单播用户的中断概率最高，候选集基数为 2 时相较于未选择基数的 CR-NOMA 方案中断概率降低，这是因为在构造候选集时剔除了信道条件很差的节点，减少了节点转发之间额外的信道损耗和开销。基数为 3 时用户的中断概率相较于基数为 2 时进一步降低，原因是候选集不仅剔除了信道差的用户，也考虑了更多信道条件较好的用户，能够根据主用户和次用户之间的信道增益选择更优的转发节点，而不是像文献[15]中仅仅考虑次用户之间的信道增益，故减小了系统中断概率。此外，分析结果也和模拟值相符合，渐近线在高信噪比区域给出了严格的边界。

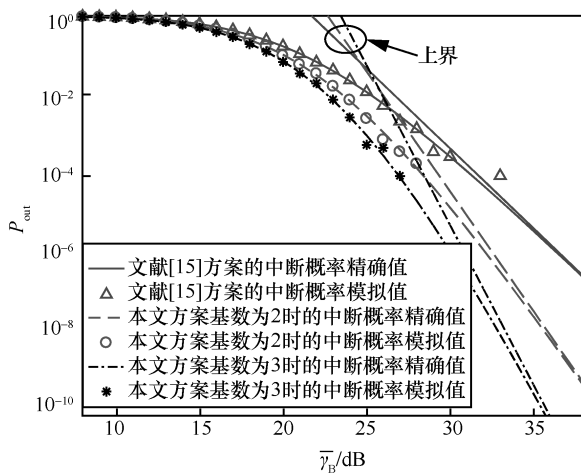


图 5 主用户中断概率随 SNR 变化情况

图 6 显示了 2 种方案下次用户中断概率随 SNR 的变化情况。未选择基数的 CR-NOMA 单播

用户的中断概率和候选集基数分别为 2 和 3 时用户的中断概率依次上升。文献[15]中的方案计算次用户中断概率时将所有  $N$  个次用户发生中断概率的情形考虑进去，该方案的分集增益为  $N$ ，即中断概率上界为  $\frac{1}{\rho^N}$ ；本文方案考虑  $N$  个用户中  $q$  个信道条件较好节点的中断概率，根据 4.2 节的可靠性分析可知，本文方案的分集增益为  $q-1$ ，即中断概率上界为  $\frac{1}{\rho^{q-1}}$ 。在同等条件下， $q-1 < N$ ，随着基数的上升，次用户的中断概率也会上升。对比图 5 和图 6 可以发现，次用户中断概率的上升并不明显，主用户中断概率下降的幅度很大。由此可以得出，本文方案在减少次用户损失的前提下，能更好地提高主用户的性能。

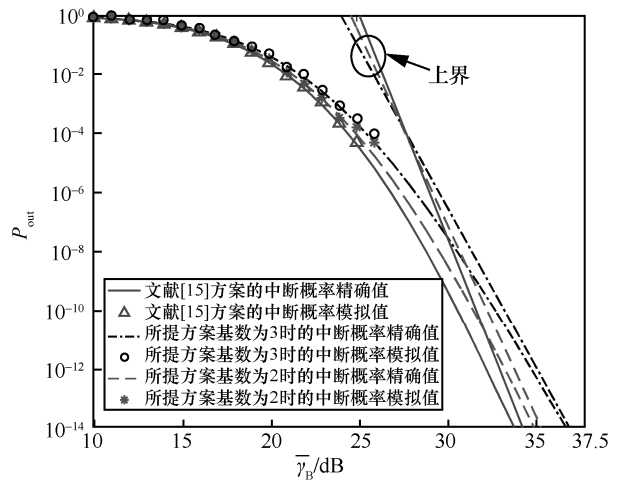


图 6 次用户中断概率随 SNR 变化情况

## 6 结束语

本文首先建立了基于认知无线电的 NOMA 下行链路传输模型，研究了通信系统在用户之间选择中继的优化问题。在已有方案的基础上提出一种能同时满足系统主用户可靠性和次用户可靠性的折中方案。改进后的方案能在减少次用户性能损失的同时提升主用户的性能。本文提出的新型机会式 NOMA 协作多播方案将多播用户按照信道增益优劣进行排序，构造出由若干信道条件较优的用户组成的候选集，并根据主次用户的信道条件选出最佳节点给主用户转发信息，从而减少了节点之间的不必要损耗和系统开销。仿真结果表明，本文方案保证了次用户较高的分集增益，实现了主用户分集增

益的提升, 合理选择候选集基数能够折中次用户和主用户可靠性, 获得系统的最佳性能。

### 参考文献:

- [1] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合[J]. 电信科学, 2018, 34(3): 1-7.  
ZHOU Y Q, LI G J. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(3): 1-7.
- [2] ANDREWS J G, BUZZI S, CHOI W, et al. What will 5G be?[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [3] Federal Communications Commission. Mobile broadband: the benefits of additional spectrum[R]. OBI Technical Paper Series, 2010.
- [4] 陆音, 包宽鑫, 谢浩然. 一种基于能量效率和用户公平的 NOMA 下行链路功率分配方案[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2019, 39(4): 9-15.  
LU Y, BAO K X, XIE H R. Power allocation scheme for downlink NOMA based on energy efficiency and user fairness[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2019, 39(4): 9-15.
- [5] TIMOTHEOU S, KRIKIDIS I. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(10): 1647-1651.
- [6] HE X, WANG K, HUANG H, et al. Green resource allocation based on deep reinforcement learning in content-centric IoT[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2020, 8(3): 781-796.
- [7] LU Y, QU Y H, YANG C Y, et al. A user matching and power allocation scheme for downlink MIMO-NOMA communication system[J]. Physical Communication, 2020, 42: 1-8.
- [8] BENJEBBOUR A, SAITO Y, KISHIYAMA Y. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access[C]//2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [9] XIONG X, XIANG W, ZHENG K. An open source SDR-based NOMA system for 5G networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(6): 24-32.
- [10] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2): 201-220.
- [11] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.
- [12] LARSSON E G, SKOGLUND M. Cognitive radio in a frequency-planned environment: some basic limits[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 7(12): 4800-4806.
- [13] DING Z, FAN P, POOR H. Impact of user pairing on 5G non-orthogonal multiple access down-link transmissions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 65(8): 6010-6023.
- [14] POLITANSKYI R, KLYMASH M. Application of artificial intelligence in cognitive radio for planning distribution of frequency channels[C]//2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies. Piscataway: IEEE Press, 2019: 390-394.
- [15] LV L, CHEN J, NI Q. Cooperative non-orthogonal multiple access in cognitive radio[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 2059-2062.
- [16] DING Z G, DAI H Y, POOR H V. Relay selection for cooperative NOMA[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2016, 5(4): 416-419.
- [17] NIU B, JIANG H, ZHAO H V. A cooperative multicast strategy in wireless networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(6): 3136-3143.
- [18] ZHOU Y Q, WANG J Z, SAWAHASHI M, et al. Downlink transmission of broadband OFCDM systems-part I: hybrid detection[J]. IEEE Transactions on Communications, 2005, 53(4): 718-729.
- [19] HU B, ZHAO H V, JIANG H. Wireless multicast using relays: incentive mechanism and analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, (5): 2204-2219.
- [20] LIN X, RATASUK R, GHOSH A. Modeling, analysis and optimization of multicast device-to-device transmissions[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(8): 4346-4359.
- [21] WANG L, STUBER G L. Pairing for resource sharing in cellular device-to-device underlays[J]. IEEE Network, 2016, 30(2): 122-128.
- [22] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [23] WANG L, WU H, DING Y. Hypergraph-based wireless distributed storage optimization for cellular D2D underlays[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(10): 2650-2666.
- [24] LIU Y, DING Z, ELKASHLAN M. Non-orthogonal multiple access in large-scale underlay cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(12): 10152-10157.
- [25] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Two-stage cooperative multicast transmission with optimized power consumption and guaranteed coverage[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(2): 274-284.
- [26] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Energy-efficient two-stage cooperative multicast: effect of user density[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7297-7307.
- [27] YANG L, CHEN J, ZHANG H. Cooperative wireless multicast: performance analysis and time allocation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(7): 5810-5819.
- [28] LEE I H, LEE H, CHOI H H. Exact outage probability of relay selection in decode-and-forward based cooperative multicast systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(3): 483-486.

[29] YANG P, ZHANG Q, QIN J. Exact outage probability of  $N^{\text{th}}$ -best multicast relay networks with co-channel interference[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2013, 2(6): 595-598.

[30] YANG L, CHEN J, KUO Y, et al. Outage performance of DF-based cooperative multicast in spectrum-sharing cognitive relay networks[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(7): 1250-1253.

[31] ZHOU J, WANG X, LI M, et al. Outage analysis of opportunistic cooperative multi-antenna multicast based on space-time coding[C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference. Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-5.

[32] ZHOU Y Q, LIU H, PAN Z G, et al. Cooperative multicast with location aware distributed mobile relay selection: performance analysis and optimized design [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(9): 8291-8302.



陈继荣（1996- ），男，江苏南通人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线通信。



卞皓伟（1998- ），男，江苏南京人，南京邮电大学硕士生，主要研究方向为无线通信。

[作者简介]



陆音（1970- ），男，北京人，博士，南京邮电大学副研究员、硕士生导师，主要研究方向为无线通信、物联网技术与应用等。



朱洪波（1956- ），男，江苏扬州人，博士，南京邮电大学教授、博士生导师、博士后合作导师，主要研究方向为无线通信、物联网与下一代网络技术等。