

异构无线网络中基于非正交多址的可伸缩视频多播机制

吉晓祥^{1,2} 沈航^{1,2} 白光伟¹

1 南京工业大学计算机科学与技术学院 南京 211816

2 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093

(201861120039@njtech.edu.cn)

摘要 文中提出了异构无线网络下基于非正交多址的可伸缩视频多播的资源管理框架。该框架综合考虑了不同基站间的频谱切分、切片内多播组之间的频谱分配和多播组内的发射功率分配,目的是最大化多播组所有用户设备的整体视频质量。考虑到每个多播组请求视频的不同、不同的用户设备位置和小基站间的干扰,将联合资源管理问题转化为一个整数线性规划问题,并将该优化问题解耦为多播组内发射功率划分问题和基站间频谱切分与基站内多组频谱资源分配问题。前者通过多重循环求得了叠加编码每一层所需的最优发射功率,后者通过背包算法得到了最优的解。仿真结果表明,所提方案在频谱利用率和用户设备平均视频质量方面优于现有方案。

关键词:非正交多址;可伸缩视频编码;多播;异构无线网络

中图分类号 TP393

Non-orthogonal Multiple Access Enabled Scalable Video Multicast in HetNets

Ji Xiao-xiang^{1,2}, SHEN Hang^{1,2} and BAI Guang-wei¹

1 College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China

2 State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Abstract In this paper, a resource management framework is presented for non-orthogonal multiple access (NOMA)-enhanced scalable video coding (SVC) multicast in heterogeneous networks (HetNets). In this framework, radio spectrum slicing for different base stations, spectrum partition for multiple groups within each spectrum slice, and transmit power division within each multicast group are jointly considered, to maximize the overall video quality experienced by user equipment in multicast groups. For tractability, the joint resource management problem is formulated as an integer linear programming problem, with the consideration of different video requests, varying device locations, and inter-cell interference. The formulated optimization problem is decoupled into an intra-group transmit power division problem and a multi-group spectrum partition and inter-slice spectrum partition problem. The former subproblem obtains the optimal transmitting power for each layer of superposition coding through multiple cycles. The latter subproblem is solved optimally by the knapsack algorithm. Simulation results show that the proposed scheme is superior to the existing scheme in spectral efficiency and average video quality of each user equipment.

Keywords Non-orthogonal multiple access (NOMA), Scalable video coding (SVC), Multicast, Heterogeneous wireless networks

1 引言

视频业务已经成为无线通信的主流业务,日益增长的视频流量加剧了无线频谱资源的紧缺。多播技术是提高频谱利用率的有效技术之一^[1]。很多用户设备(UEs)通常会请求相同的视频内容,因此这些用户设备可以使用相同的频率资

源^[2]。由于多播用户设备都需要正确解码所接收到的视频,因此此时信道条件最差的用户设备成为了制约多播速率提升的瓶颈^[3]。将可伸缩视频编码(Scalable Video Coding, SVC)应用到无线视频多播中,可以缓解网络边缘用户造成的性能瓶颈。

SVC将视频编码为一个基础视频层和若干个增强视频

到稿日期:2020-09-09 返修日期:2021-01-20

基金项目:国家自然科学基金(61502230);江苏省自然科学基金(BK20150960);江苏省“六大人才高峰”高层次人才资助项目(RJFW-020);南京大学计算机软件新技术国家重点实验室资助项目(KFKT2017B21)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (61502230), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20150960), Jiangsu Province “Six Talent Peaks” High-level Talent Project (RJFW-020) and State Key Laboratory of New Technology of Computer Software (Nanjing University) Project (KFKT2017B21).

通信作者:沈航(hshen@njtech.edu.cn)

层。用户设备可以根据信道条件灵活地接收解码视频。信道条件较差的用户设备只解码基视频层,信道条件较好的用户设备解码基视频层和增强视频层。然而,现有的 SVC 视频多播大多基于正交多址(Orthogonal Multiple Access,OMA)^[4-5]。文献[4]对 WiMAX 网络中的多播资源分配问题进行了建模,设计了一种贪心算法来最大化 UEs 吞吐量的效用。针对基于 OMA 的多载波系统,文献[5]提出了一种最优的两步动态规划算法,用于求解最优的资源分配。由于不同的视频层使用正交频率资源进行传输,因此在一定程度上限制了频谱利用率。近年来,非正交多址(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)作为第五代移动通信系统(5G)的核心备选技术之一,可以显著提升网络容量和频谱利用率^[6]。

NOMA 在功率域中实现多址接入,在发送端,信号通过叠加编码(Superposition Coding, SC)发送。主动引入干扰信息,在接收端使用连续干扰消除(Successive Interference Cancellation, SIC)技术解码用户所需要的信号^[7]。将 SVC 连续视频层解码与 NOMA 的 SIC 技术相结合,可以允许不同视频层以不同功率在相同频谱资源上传输,进一步提高了频谱利用率^[8]。

文献[9]研究了下行 NOMA 系统的功率分配问题,在总功率约束和满足用户的最低服务质量条件下最大化吞吐量。为了使多载波全双工 NOMA 系统的加权和系统吞吐量最大,文献[10]利用单调优化方法设计了一种最优的资源分配算法。文献[11]提出了一种用于蜂窝网络下基于 NOMA 的 SVC 视频多播方案。现有的基于 NOMA 的 SVC 视频多播大都使用单层网络架构。多层异构网络架构有很大潜力提升 SVC 视频多播性能^[12]。文献[13]研究了异构网络中的协同视频缓存问题,提出了一种贪心算法,显著地降低了总传输延迟。异构网络下,频谱切片(spectrum slicing)、片内频谱分配和多播组从属都会影响多播组的整体视频质量。因此,如何优化异构网络下基于 NOMA 的 SVC 视频多播中的频谱和功率资源管理,提升多播用户的服务质量值得进一步探讨。

本文提出了异构无线网络中基于 NOMA 的 SVC 视频多播机制,该机制将联合资源管理问题转化为混合整数非线性规划问题。为了便于求解,将该问题解耦为多播组内发射功率划分问题和基站间频谱切片与基站内多组频谱资源分配问题。为了解决多播组内功率分配子问题,对所有可能的功率分配方案进行求解,整体视频质量最高的一组即为最优解。在此基础上,将基站间频谱资源切片与多播组间资源分配问题建模为背包问题进行求解。仿真结果表明,相比现有的基准方案,本文提出的方案可以较大程度地提升用户接收视频的质量,提高资源利用率。对于不同数量的子信道和多播组,对比两种基准方案,系统效用平均增加了 5%~10%,用户获得的平均 PSNR 值增加了 1~2 dB。

本文第 2 节描述了系统模型;第 3 节描述了本文提出的异构无线网络场景下基于 NOMA 的 SVC 视频多播机制并提出了联合资源管理问题;第 4 节将问题解耦为两个子问题,并设计了循环算法和动态规划算法,用于解决上述两个问题;第

5 节对本文方案进行了仿真和评估;最后总结全文并展望未来工作。

2 系统模型

2.1 资源管理框架

如图 1 所示,构建一个由 1 个宏基站和若干个小基站组成的双层异构无线网络。宏基站和小基站各自服务覆盖范围内的多播组。控制器(controller)掌握所有用户信息,管理资源。控制器将总可用频谱资源 B 分为 B_m 和 B_s 两部分。其中, B_m 被分配给宏基站使用; B_s 被分配给各个小基站使用。

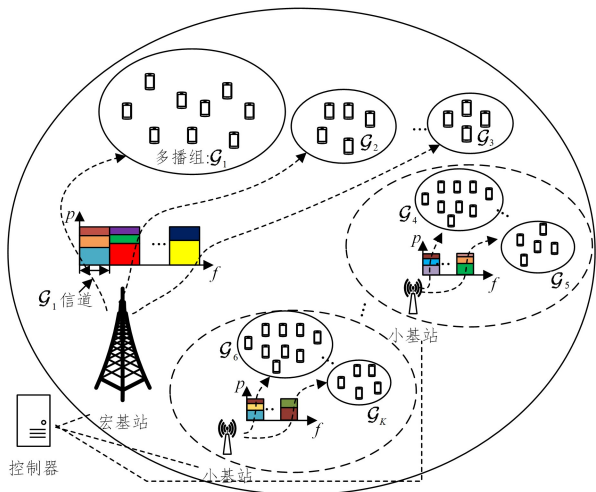


图 1 网络架构

Fig. 1 Network architecture

将第 k 组的用户集合表示为 \mathcal{G}_k , 则 K 个多播组集合可以表示为 $\mathcal{G} = \{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_K\}$ 。多播组被分为两种类型:若 $a_{j,k} = 1$, 则第 k 个多播组由第 j 个小基站提供服务;若 $1 - \sum_{j \in J} a_{j,k} = 1$, 则第 k 个多播组由宏基站提供服务。

2.2 SVC 视频流

每个多播组请求一个 SVC 视频流。一个 SVC 视频可以编码为一个基础视频层(BL)和若干个可以增强视频质量的增强视频层(ELs)^[14]。对于第 k 个 SVC 视频,视频总层数记为 L_k , 这些视频层从基础视频层到最高增强视频层依次排列。即基本视频层被称为第一视频层,第一增强视频层被称为第二视频层,依次类推。第 k 个 SVC 视频中第 l 个视频层的比特率表示为 $\lambda_{l,k}$ 。

接收端可以利用部分视频层重建视频。SVC 视频解码需要有连续的视频层,即当且仅当所有较低的视频层都已经成功解码后,较高的视频层才能被正确解码。对于第 k 个多播组的 UE, 接收解码的总视频层数可以表示为 $l_{i,k}$ 。这意味着 UE _{i} 接收 $l_{i,k}$ 个从基层开始的连续视频层,那么 UE _{i} 接收到的 SVC 视频速率可以被表示为:

$$R_{i,k} = \sum_{l=1}^{l_{i,k}} \lambda_{l,k} \quad (1)$$

UE _{i} 接收到的视频速率为 $R_{i,k}$, 使用 $u_{i,k}(R_{i,k})$ 表示 UE _{i} 获得的效用^[5]。使用对数函数作为效用函数,即 $u_{i,k}(R_{i,k}) = \log_2(R_{i,k})$, $u_{i,k}(R_{i,k})$ 随着视频速率 $R_{i,k}$ 的增加呈现上升的趋势。

2.3 NOMA 层

K 个多播组共有 B 个正交子信道可以使用, 每个子信道的带宽为 W , 宏基站的发射功率为 P_m , 小基站的发射功率为 P_j , 噪声功率密度为 N_0 。在功率域上实现 NOMA 的多址接入, 将 NOMA 叠加编码方案中的视频传输层称为 NOMA 层。假设每个视频传输的最大层数为 N 。对于第 k 个多播组, 宏基站(小基站 j) 上第 n 个 NOMA 层传输的视频信号为 $x_{m,n,k}(x_{j,n,k})$, 则信道增益不低于 $h_{m,n,k}(h_{j,n,k})$ 的设备可以解码该信号。NOMA 层是按照所涉及的用户设备的信道增益升序排序的, 即 $h_{m,1,k} < h_{m,2,k} < \dots < h_{m,N,k}(h_{j,1,k} < h_{j,2,k} < \dots < h_{j,N,k})$ 。

根据 NOMA 发射端叠加编码的原则, 宏基站(小基站 j) 分配给第 k 个视频的第 n 个 NOMA 层的功率为 $P_m \alpha_{m,n,k}$ ($P_j \alpha_{j,n,k}$)。其中, $\alpha_{m,n,k}$ ($\alpha_{j,n,k}$) 表示功率分配比例。假设 UE_i 与第 n 个 NOMA 层是关联的, 那么宏基站和小基站 j 在 UE_i 处的解码信号为 $x_{m,t,k}(x_{j,t,k})$, ($t < n$) 时可以达到的视频速率分别为:

$$r_{m,n,k}^{(t)} = b_{m,k} W \log(1 + \text{SINR}_{m,n,k}^{(t)}) \quad (2a)$$

$$r_{j,n,k}^{(t)} = b_{j,k} W \log(1 + \text{SINR}_{j,n,k}^{(t)}) \quad (2b)$$

其中:

$$\text{SINR}_{m,n,k}^{(t)} = \frac{P_m h_{m,n,k} \alpha_{m,t,k}}{P_m h_{m,n,k} \sum_{n'=t+1}^N \alpha_{m,n',k} + WN_0} \quad (2c)$$

$$\text{SINR}_{j,n,k}^{(t)} = \frac{P_j h_{j,n,k} \alpha_{j,t,k}}{P_j h_{j,n,k} \sum_{n'=t+1}^N \alpha_{j,n',k} + \sum_{j' \in J \setminus \{j\}} P_{j'} h_{j',n,k} + WN_0} \quad (2d)$$

由于 $h_{m,t,k} < h_{m,n,k}(h_{j,t,k} < h_{j,n,k})$, ($t < n$), $r_{m,t,k}^{(t)} < r_{m,n,k}^{(t)}$ ($r_{j,t,k}^{(t)} < r_{j,n,k}^{(t)}$)。若与第 m 个 NOMA 层关联的用户设备能解码信号 $x_{m,n,k}(x_{j,n,k})$, 那么与第 n 个 NOMA 层关联的用户设备一定能解码信号 $x_{m,n,k}(x_{j,n,k})$ 。若 UE_i 可以解码信号 $x_{m,n,k}(x_{j,n,k})$, 在解码更高层视频时, UE_i 可以删除信号 $x_{m,n,k}(x_{j,n,k})$ 的干扰。因此, 宏基站和小基站 j 第 n 个 NOMA 层的可达传输速率分别为:

$$r_{m,n,k}^{(n)} = b_{m,k} W \log(1 + \text{SINR}_{m,n,k}^{(n)}) \quad (3a)$$

$$r_{j,n,k}^{(n)} = b_{j,k} W \log(1 + \text{SINR}_{j,n,k}^{(n)}) \quad (3b)$$

其中:

$$\text{SINR}_{m,n,k}^{(n)} = \begin{cases} \frac{P_m h_{m,n,k} \alpha_{m,n,k}}{P_m h_{m,n,k} \sum_{n'=n+1}^N \alpha_{m,n',k} + WN_0}, & \text{if } n < N \\ \frac{P_m h_{m,n,k} \alpha_{m,n,k}}{WN_0}, & \text{if } n = N \end{cases} \quad (3c)$$

$$\text{SINR}_{j,n,k}^{(n)} = \begin{cases} \frac{P_j h_{j,n,k} \alpha_{j,n,k}}{P_j h_{j,n,k} \sum_{n'=n+1}^N \alpha_{j,n',k} + \sum_{j' \in J \setminus \{j\}} P_{j'} h_{j',n,k} + WN_0}, & \text{if } n < N \\ \frac{P_j h_{j,n,k} \alpha_{j,n,k}}{\sum_{j' \in J \setminus \{j\}} P_{j'} h_{j',n,k} + WN_0}, & \text{if } n = N \end{cases} \quad (3d)$$

当 $n < N$ 时, $n+1$ 至最高 NOMA 层的信号被当作干扰; 当 $n = N$ 时, 没有其他 NOMA 层的干扰。小基站集合用 J 表

示, 式(2d)和式(3d)的分母部分均考虑了频谱复用带来的小基站间的干扰。多播组只能从属于一个基站, 第 n 个 NOMA 层的用户设备的可达视频速率被表示为:

$$r_{n,k} = (1 - \sum_{j \in J} a_{j,k}) r_{m,n,k}^{(n)} + \sum_{j \in J} a_{j,k} r_{j,n,k}^{(n)} \quad (4)$$

3 联合资源管理问题

异构网络下基于非正交多址的 SVC 视频多播中的联合资源管理涉及无线频谱分配和发射功率划分。

3.1 无线频谱分配

系统可用的总频谱资源为 B 个子信道。控制器将 B 分为 B_m 和 B_s 两部分, 分别供宏基站和小基站使用, 即:

$$B_m + B_s \leq B \quad (5a)$$

频谱资源被切分后, 每个基站的可用频谱资源被分配给关联的多播组。基站通过为每个多播组分配适当的频谱资源, 在满足所有用户设备的服务质量需求的基础上最大化所有用户的效用。

宏基站将 B_m 个子信道分配给关联的多播组。所有与宏基站关联的多播组被分配到的子信道数之和不能超过宏基站的可用子信道数, 即:

$$\sum_{k=1}^K b_{m,k} (1 - \sum_{j \in J} a_{j,k}) \leq B_m \quad (5b)$$

$$b_{m,k} \in \{1, 2, \dots, B_m\}, \forall k$$

每个小基站分配给关联的多播组的子信道数为 B_s 。所有与小基站关联的多播组被分配到的子信道数之和不能超过该小基站的可用子信道数, 即:

$$\max_{j \in J} \left\{ \sum_{k=1}^K b_{j,k} \cdot a_{j,k} \right\} \leq B_s \quad (5c)$$

$$b_{j,k} \in \{1, 2, \dots, B_s\}, \forall k$$

3.2 发射功率划分

基于 NOMA 的 SVC 视频多播方案实质为 SVC 视频层叠加编码和基站发射功率的划分问题, 包括:

(1) 子分组。多播组内所有用户均按信道增益升序排列, 最多可分为 N 个子组, 子组的索引范围为 $1 \sim N$ 。第 1 个子组的用户只能接收解码基础视频层, 第 n 个子组与第 n 个 NOMA 层相匹配, 即第 n 个子组的用户中的最差信道增益为第 n 个 NOMA 层的信道增益。(n, k) 表示第 k 个多播组中的第 n 个子组或者 NOMA 层, 定义 (n_i, k) 为包含 UE_i 的子组。

(2) 功率分配。对于第 k 个多播组请求的视频, 每个 NOMA 层都被分配一定的功率用于传输信息。对于 NOMA 层 (n, k), 如果分配给它的功率比例为 $\alpha_{n,k}$, 则根据式(4), 该功率下的可达传输速率为 $r_{n,k}$ 。相应的功率分配的约束可以表示为:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_{n,k} \leq 1, 0 \leq \alpha_{n,k} \leq 1, \forall k, \forall n \quad (6)$$

式(6)确保每个多播组的所有 NOMA 层的传输功率总和不超过基站的总发射功率。

(3) 信息传输。在子分组和功率分配之后, 基站通过相应的 NOMA 层对不同的视频层进行多播。若 $\epsilon_{l,n,k} = 1$, 则第 l 个视频层在视频传输层 (n, k) 中传输, 否则 $\epsilon_{l,n,k} = 0$ 。据此, 信

息传输约束可以表示为:

$$\sum_{n=1}^N \epsilon_{l,n,k} \leq 1, \forall l, \forall k \quad (7a)$$

和

$$\sum_{l=1}^{L_k} (\lambda_{l,k} \cdot \epsilon_{l,n,k}) \leq r_{n,k}, \forall n, \forall k \quad (7b)$$

其中,式(7a)限定任何视频层在所有 NOMA 层中最多传输 1 次,式(7b)限定每个 NOMA 层中传输的信息比特率不得大于 NOMA 层的用户的可达传输速率,这确保了用户可以实时接收到视频层以顺利重建视频。

接收端通过 SIC 对接收到的信号进行解码。第 k 个多播组的 UE_i 可以解码不高于 (n_i, k) 的 NOMA 层。第 k 个多播组的 UE_i 可以接收到的有效视频层数被表示为:

$$l_{i,k} = \max\{l \mid \forall l' \leq l, \sum_{n'=1}^{n_i} \epsilon_{l',n',k} \geq 1\} \quad (8)$$

图 2 给出了 SVC 视频叠加编码和解码的过程。基站在发射信号时,SVC 视频层 $l_{1,k}$ 通过 $x_{1,k}$ 传输,SVC 视频层 $l_{2,k}$ 和 $l_{3,k}$ 通过 $x_{2,k}$ 传输,SVC 视频层 $l_{4,k}$ 通过 $x_{3,k}$ 传输,信号 $\{x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k}\}$ 被分配的功率比例分别为 $\{\alpha_{1,k}, \alpha_{2,k}, \alpha_{3,k}\}$ 。这些信号通过叠加编码同时传输,在接收端使用 SIC 解码。子组 $S_{1,k}$ 中的用户信道增益较差,只能解码 SVC 视频层 $l_{1,k}$,用户信道增益较好的子组 $S_{2,k}$ 中的用户可以解码 SVC 视频层 $l_{1,k}$, $l_{2,k}$ 和 $l_{3,k}$,而信道增益最好的子组 $S_{3,k}$ 中的用户可以解码 SVC 视频层 $l_{1,k}, l_{2,k}, l_{3,k}$ 和 $l_{4,k}$ 。

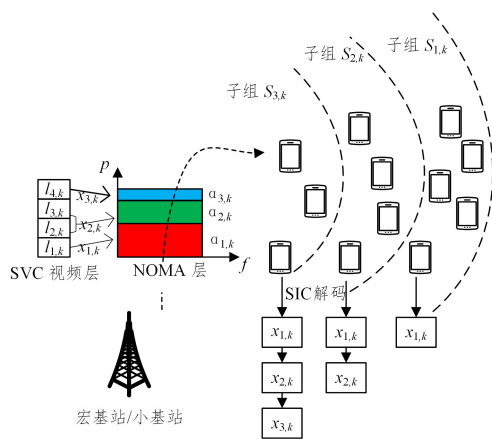


图 2 可伸缩视频多播

Fig. 2 Scalable video multicast

3.3 问题建模

本文在异构网络下基于 NOMA 进行 SVC 视频多播,提出了联合资源管理问题,在满足所有用户服务质量需求的基础上最大化整体视频质量。在系统总可用子信道数量和基站功率的约束下,联合资源管理问题可以表示为:

$$P_0: U = \text{Maximize} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{G}_k} u_{i,k}(R_{i,k}) \quad (9)$$

s. t. (5)(6)(7)

4 算法设计

为了便于处理,将优化问题 P_0 解耦为 P_1 和 P_2 两个子问题,并设计算法进行求解。

4.1 问题分解

小基站覆盖的区域为用户设备聚集的热点区域。当请求某一视频的多播组均被某个小基站覆盖时,则该多播组从属于这个小基站。当有超过 2 个小基站有多播组从属时,就存在频谱复用的机会。通过频谱切分,从属于小基站的多播组可以复用频谱,从而进一步提高频谱效率。假设小基站的覆盖范围均为 R , 则从属关系为:

$$a_{k,j} = \begin{cases} 1, & \forall i \in \mathcal{G}_k, d_{i,j} < R, \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

若给定多播组的频谱资源即 b_k , 就可以求得该多播组的最优功率分配,从而得到该多播组的最大系统效用。在此基础上进一步设计算法求解 B_m, B_i 以及所有 b_k 的值。将 P_0 分为 P_1 和 P_2 两个子问题来求解。

给定 b_k , 则组内可伸缩视频功率分配问题 P_1 可以描述为:

$$P_1: U_k(b_k) = \text{Maximize} \sum_{i \in \mathcal{G}_k} u_{i,k}(R_{i,k}) \quad (11)$$

s. t. (6)(7)

将从属关系即式(10)代入式(11),则对于宏基站有:

$$U_{k,m}(b_{k,m}) = \text{Maximize} \sum_{i \in \mathcal{G}_k} (1 - \sum_{j \neq i} a_{j,k}) R_{i,k} \quad (12)$$

对于小基站 j 有:

$$U_{k,j}(b_{k,j}) = \text{Maximize} \sum_{i \in \mathcal{G}_k} a_{j,k} R_{i,k} \quad (13)$$

在 P_1 的基础上,基站间频谱切分与基站内多组频谱资源分配问题 P_2 可以描述为:

$$P_2: U = \text{Maximize} \sum_{k \in \mathcal{K}} U_k(b_k) \quad (14)$$

s. t. (5)

4.2 组内功率分配算法

对于 P_1 , 给定第 k 个多播组的频谱资源 b_k , 基站对一组用户 $\mathcal{G}_k = \{1, 2, \dots, I\}$ 多播 SVC 视频流, \mathcal{G}_k 是按照用户信道增益升序排列的, I 表示这个多播组的用户数量。 P_1 需要求解两组变量: 1) 每个 NOMA 层传输的 SVC 视频层; 2) 每个 NOMA 层的功率分配系数。

首先确定每个 NOMA 层内传输的 SVC 视频层, 假设 SVC 视频被编码为 4 层并通过 3 个 NOMA 层传输。基视频层记为 BL, 增强视频层依次记为 EL_1, EL_2 和 EL_3 , 4 种方案如表 1 所列。

表 1 $N=3, L_k=4$ 时的信息传输

Table 1 Information transmission when $N=3, L_k=4$

序号	1	2	3	4
$x_{1,k}$	BL	BL	BL+EL ₁	BL
$x_{2,k}$	EL ₁	EL ₁ +EL ₂	EL ₂	EL ₁
$x_{3,k}$	EL ₂ +EL ₃	EL ₃	EL ₃	EL ₂

然后,确定每个 NOMA 层的功率分配系数。给定信息传输方案后,将 \mathcal{G}_k 按照信道增益升序排列,按照先高 NOMA 层后低 NOMA 层的顺序求解功率分配系数。首先从 1 到 $I+1$ 进行循环计算 $\alpha_{3,k}$, 从 1 到 I 表示 \mathcal{G}_k 中的 I 个用户, 当循环到 $I+1$ 时表示用户均无法接收到 NOMA 层 $(3, k)$, 即 $\alpha_{3,k} = 0$; 同理可循环计算 $\alpha_{2,k}$ 。基于用户最低服务质量需求, 所有用户设备均可接收解码 NOMA 层 $(1, k)$, 根据 \mathcal{G}_k 中信道增益最差的用户对应可求得 $\alpha_{1,k}$ 。对每一组符合约束(6)的功

率分配系数 $\{\alpha_{1,k}, \alpha_{2,k}, \alpha_{3,k}\}$,以计算多播组的和效用。

计算所有信息传输方案的效用可以得到一个最大的效用,即为给定频谱资源下该多播组的最大效用。相比文献[11]中的方法,循环求解的复杂度较高,但是基站功率不会被全部使用,因此该方案具有更高的能量效率。

4.3 频谱管理算法

P_2 分为两步求解:1)给定 B_m 和 B_s ,可以计算宏基站和每个小基站效用最大时对应的多播组间的子信道分配;2)求基站间的频谱切分,以最大化系统效用。

首先,假设前 k 个多播组一共有 b 个子信道可用,使用函数 $S(k,b)$ 表示前 k 个多播组的最大和效用。根据动态规划思想可以将 $S(k,b)$ 表示为一个递归式,即:

$$S(k,b) = \max_{0 \leq b' \leq b} S(k-1,b-1) + U_k(b') \quad (15)$$

$U_k(b')$ 可以通过式(11)得到, $S(k,b)$ 通过多项选择背包算法求解。把 K 个多播组当作 K 类物品,装入一个容量为 B 的背包中。每类有 B 个项目,第 k 类的第 b_k 个项目有利润 $U_k(b_k)$ 和重量 b_k 。那么 $S(k,b)$ 的实质是从每个类别中选择一部分,不超出背包总容量,并使利润总和最大。

算法1使用动态规划方法,当所有项的权值为非负整数时,求出背包问题的最优解,即 $S(k,b)$ 的最优解^[15]。首先,初始化 $S(0,b)=0, k=0$ 表示没有多播组存在。然后,循环计算所有 $U_k(b)$ 的值。接下来,从 $k=1$ 开始递归地计算 $S(k,b)$,在递归的每次迭代中,使用递归式(15)计算 $S(k,b)$,其中 $S(k-1,b-b')$ 在前一次递归迭代中已经计算过, $U_k(b')$ 在递归过程之前也已经计算过。在 $K * B$ 次迭代之后,可以获得所有 $S(k,b)$ 的值。最后,返回 $S(K,B)$ 作为最优的系统效用,并使用 b_k 作为分配给第 k 个多播组的子信道数量。

算法1 基站内多播组间的频谱分配算法

Input: $N, K, B, \mathcal{G} = \{\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_k\}$

Output: $b_k, S(K, B)$

1. function $S(K, B)$
2. Initialize $S(0, b) = 0, (1 \leq b \leq N)$;
3. for $k = 1 \rightarrow K$ do
4. for $b = 1 \rightarrow B$ do
5. $U_k(b) = \max\{\sum_{i \in \mathcal{G}} \log_2(R_{i,k})\}$;
6. for $k = 1 \rightarrow K$ do
7. for $b = 1 \rightarrow B$ do
8. $S(k, b) \leftarrow S(k-1, b)$;
9. $b_k \leftarrow 0$;
10. for $b' = 1 \rightarrow b$ do
11. $U_{temp} \leftarrow S(k-1, b-b') + U_k(b')$;
12. if $U_{temp} > S(k, b)$ then
13. $S(k, b) \leftarrow U_{temp}$;
14. $b_k \leftarrow b'$;
15. return $b_k, S(K, B)$
16. end function

给定基站的频谱资源,可以通过算法1得到基站内的频谱分配,下一步计算基站间的频谱切分。宏基站包含 $K_m = K - \sum_{j \in \mathcal{J}} K_j$ 个多播组,小基站 j 包含 $K_j = \sum_{k \in \mathcal{K}} a_{k,j}$ 个多播组。通过算法1分别计算宏基站和小基站 j 的最大和效用,可以得

到系统最大和效用为:

$$U = \text{Maximize}(S(K_m, B_m) + \sum_{j \in \mathcal{J}} S(K_j, B_s)) \quad (16)$$

B_m 和 B_s 的值可以通过算法2求得。

算法2 宏基站和小基站的频谱切分算法

Input: $B, K_m, K_j (1 \leq j \leq 4)$

Output: U, B_m, B_s

1. function $U(K, B)$
2. Initialize $U(K, B) = 0$;
3. for $B_s = 0 \rightarrow B$ do
4. $B_t \leftarrow B - B_s$;
5. $U_{temp} \leftarrow S(K_m, B_t) + \sum_{j \in \mathcal{J}} S(K_j, B_s)$;
6. if $U_{temp} > U(K, B)$ then
7. result $\leftarrow U_{temp}$;
8. $\{B_m, B_s\} \leftarrow \{B_t, B_s\}$;
9. return $U(K, B), B_m, B_s$
10. end function

5 实验设计与结果分析

利用仿真方法验证本文方案的有效性。考虑1个宏基站覆盖范围内有4个小基站的异构无线网络,宏基站位于坐标系的原点,4个小基站分别位于 $(\pm 250\sqrt{2} \text{ m}, \pm 250\sqrt{2} \text{ m})$ 处,宏基站和每个小基站之间的距离为500m。宏基站的下行发射功率为40dBm,通信覆盖半径为800m,而每个小基站具有相同的发射功率为33dBm,覆盖半径为300m^[16]。对于信道传输模型,分别使用 $L_m(z) = -30 - 35 \log_{10}(z)$ 和 $L_s(z) = -30 - 35 \log_{10}(z)$ 来描述宏基站和每个小基站的下行信道增益^[17],其中 z 为基站与用户设备之间的距离。其他参数如表2所列。使用文献[18]中被编码为SVC视频流的10个标准视频测试序列,并使用平均比特率和PSNR值作为评价指标。

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

仿真参数	数值
子信道带宽/kHz	180
子信道数量	10~30
噪声功率/(dBm/Hz)	-174
多播组数量	4~10
用户数/(个/组)	10~15

首先,评估本文提出的异构无线网络下基于NOMA的SVC视频多播方案。在该方案中有10个多播组请求不同的SVC视频流,其中4个小基站下各覆盖1个多播组,每个多播组的用户设备均为15个。图3给出了NOMA层数对本文方案性能的影响。

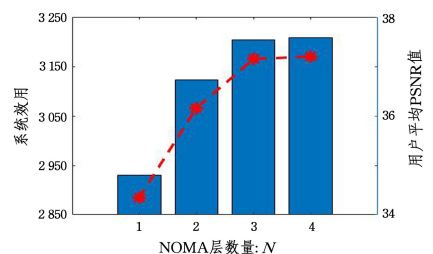


图3 NOMA层数的影响

Fig. 3 Influence of number of NOMA layers

从图3可以看出,系统效用和用户平均PSNR值随着NOMA层数的增加而增加。而当NOMA层数从3增加到4时,性能并没有显著的提高。这是因为基站的功率是有限的,当NOMA层数增加时,分给每层的功率就会减少。为了降低计算复杂度,以下仿真NOMA层数均设置为3,频率资源分配方法均采用背包算法求解。

为了客观地评估性能,实现了两种基准方案用于对比。

(1)基于OMA的可伸缩视频多播(OMA)^[6]。在正交多址中,不同的视频层以不同传输速率传输,这对于信道增益不同的用户是可以接受的。在该方案中,SVC视频层通过正交信道资源传输。

(2)功率固定的可伸缩视频多播(F-NOMA)^[19]。每个NOMA层的功率比例是预先确定的。将固定功率分配扩展到可伸缩视频多播中作为另一种基准方案。

5.1 系统子信道数的影响

给定多播组的数量为10,每个多播组内的用户设备数为15,系统子信道数量为10~30。图4给出了系统效用和用户平均PSNR值随着子信道数增加的变化趋势。

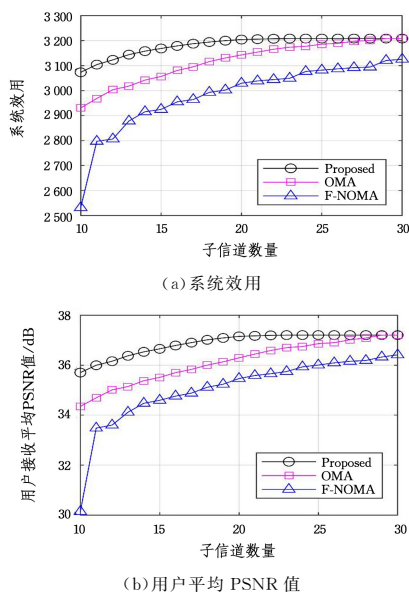


图4 子信道数的影响

Fig. 4 Influence of number of subchannels

如图4所示,随着子信道数量的增加,3种方案的系统效用和平均PSNR值都有所提高。当子信道数量足够大时,系统效用和平均PSNR值都趋于不变。这是因为更多的子信道意味着更大的系统容量,从而可以传输更多的视频信息。但是,系统效用和平均PSNR值也不会随着子信道数量的增长而无限增长,因为当子信道数量足够大时,最终所有的SVC视频层可以被所有用户接收并解码。此外,本文方案对于所有的子信道个数具有最大的系统效用和平均PSNR值,其次是OMA和F-NOMA。原因是当多播组频率资源已经确定时,本文方案中功率分配方案的性能最优。

5.2 多播组数的影响

给定子信道数量为10,每个多播组内的用户设备数为15,多播组的数量为4~10。图5分别给出了系统效用和用户平均PSNR值随着多播组数增加的变化趋势。

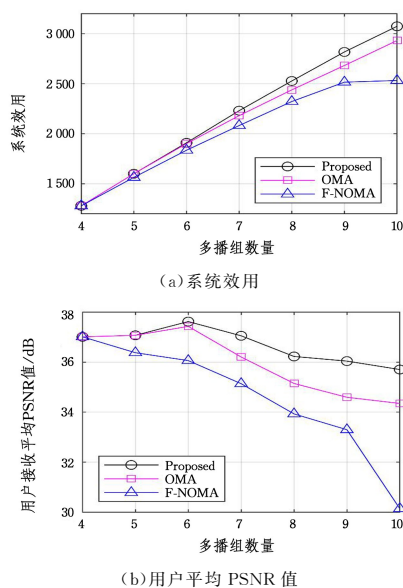


图5 多播组数的影响

Fig. 5 Influence of numbers of multicast groups

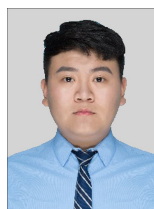
从图5(a)可以看出,当多播组的数量从4增加到10时,系统效用呈上升趋势。由于可用的子信道个数有限,系统效用不会无限增加。在图5(b)中,当多播组个数从4增加到6时,得益于小基站间的频谱重用,本文方案和OMA方案中分配给每一组的子信道不会减少,因此用户平均PSNR值呈现增长的趋势。当多播组数量超过6时,随着多播组数量的增长,分配给每一组的子信道数量逐渐减少,因此每个用户设备的平均PSNR值也在减少。当多播组数量较少时,本文方案的性能与OMA相差不大。随着多播组数量的增加,本文方案的系统效用和用户平均PSNR值都维持在最高位。

结束语 本文提出了异构无线网络中基于NOMA的SVC视频多播机制。在异构网络中,将NOMA与SVC视频多播相结合,研究了多播资源管理问题和组内功率分配问题,最大限度地提高了多播组的整体视频质量。仿真结果表明,本文提出的基于NOMA的SVC视频多播方案的系统效用和用户设备的平均PSNR值优于其他两种方案。下一步将采用无人机基站代替固定位置的小基站,因为无人机基站部署更加灵活,可以更进一步地提高频谱效率。

参考文献

- [1] ARANITI G, CONDOLUCI M, SCOPELLITI P, et al. Multicasting over emerging 5G networks: challenges and perspectives [J]. *IEEE Network*, 2017, 31(2): 80-89.
- [2] CHEN J, CHIANG M, ERMAN J, et al. Fair and optimal resource allocation for LTE multicast (eMBMS): Group partitioning and dynamics [C] // 2015 IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). IEEE, 2015: 1266-1274.
- [3] AFOLABI R O, DADLANI A, KIM K. Multicast scheduling and resource allocation algorithms for OFDMA-based systems: a survey [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2012, 15(1): 240-254.
- [4] DEB S, JAISWAL S, NAGARAJ K. Real-time video multicast in WiMAX networks [C] // IEEE INFOCOM 2008-The 27th Con-

- ference on Computer Communications. IEEE, 2008; 1579-1587.
- [5] LI P, ZHANG H, ZHAO B, et al. Scalable video multicast with adaptive modulation and coding in broadband wireless data systems [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2011, 20(1): 57-68.
- [6] DING Z, LIU Y, 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] DAI L, WANG B, YUAN Y, et al. Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends [J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(9): 74-81.
- [8] LÓPEZ O L A, ALVES H, LATVA-AHO M. Distributed rate control in downlink NOMA networks with reliability constraints [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(11): 5410-5423.
- [9] 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.
- [10] SUN Y, NG D W K, DING Z, et al. Optimal joint power and subcarrier allocation for full-duplex multicarrier non-orthogonal multiple access systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(3): 1077-1091.
- [11] ZHU H, CAO Y, JIANG T, et al. Scalable NOMA multicast for SVC streams in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(12): 6339-6352.
- [12] WANG C X, HAIDER F, GAO X, et al. Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 122-130.
- [13] ZHANG T, MAO S. Cooperative Caching for Scalable Video Transmissions Over Heterogeneous Networks [J]. IEEE Networking Letters, 2019, 1(2): 63-67.
- [14] SCHWARZ H, MARPE D, WIEGAND T. Overview of the scalable video coding extension of the H. 264/AVC standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(9): 1103-1120.
- [15] HANS K, ULRICH P, DAVID P. Knapsack Problems[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2004.
- [16] QIAN L P, WU Y, ZHOU H, et al. Non-orthogonal multiple access vehicular small cell networks: Architecture and solution [J]. IEEE Network, 2017, 31(4): 15-21.
- [17] YE Q, ZHUANG W, ZHANG S, et al. Dynamic radio resource slicing for a two-tier heterogeneous wireless network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(10): 9896-9910.
- [18] SHARANGI S, KRISHNAMURTI R, HEFEEDA M. Energy-efficient multicasting of scalable video streams over WiMAX networks[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2010, 13(1): 102-115.
- [19] BENJEBBOU A, LI A, SAITO Y, et al. System-level performance of downlink NOMA for future LTE enhancements[C]// 2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshops). IEEE, 2013: 66-70.



JI Xiao-xiang, born in 1995, postgraduate. His main research interests include non-orthogonal multiple access technique and resource allocation for heterogeneous wireless networks.



SHEN Hang, born in 1984, Ph.D. associate professor. His main research interests include network slicing, space-air-ground integrated networks.