



# 基于用户簇的分层速率分配优化算法

张祖凡<sup>1,2</sup>, 罗利莎<sup>1\*</sup>, 张宇<sup>1</sup>

1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

2. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065

\* 通信作者. E-mail: 958034213@qq.com

收稿日期: 2016-01-30; 接受日期: 2016-02-16; 网络出版日期: 2016-09-30

国家自然科学基金(批准号: 61440062)、国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2014AA01A705)和重庆市自然科学基金(批准号: CSTC2013jjB40001)资助项目

**摘要** 异构网络中视频流分层组播的层速率优化问题主要涉及分层数、分层速率和用户链路带宽, 针对层速率优化 NP-hard 问题, 本文提出一种基于用户簇的分层组播层速率优化 UC-LRAO (layer rate allocation optimization with user cluster) 算法. 根据用户数对视频流进行分层, 确定每层用户数和各用户承载分层视频流的带宽, 采用最大流-最小割的 Edmonds-Karp 算法和层内网络编码实现每层用户视频流的传输链路所需带宽的分配. 基于预定视频流分层的层数要求, 利用用户分簇对原分层重新合并, 从而优化分配分层速率和链路带宽. 仿真结果表明所提出的算法可以提高系统吞吐量.

**关键词** 异构网络, 分层组播, 用户簇, 分层速率, 用户链路带宽

## 1 引言

随着宽带网络和 Internet 快速发展, 多媒体服务业务应运而生, 如网络电视、远程学习、多方视频会议等<sup>[1,2]</sup>. 实际网络的固有异构性需要源节点能够根据异构网络用户可用带宽进行最佳数据传输<sup>[3]</sup>, 针对异构性提出基于网络编码 (network coding, NC) 的分层组播方案能够有效解决异构网络中用户差异性需求, 提高系统吞吐量<sup>[4]</sup>. 分层多播 (layered multicast, LM), 是一种被广泛采用的多速率多播技术<sup>[5]</sup>. 分层编码将信源编码为多层, 分别为基础层和增强层次. 用户根据自身带宽等限制因素尽可能多地接收相应的分层, 接收分层数越多, 恢复的源数据质量越好, 且高层编码包的解码依赖所有低层编码包, 也即分层编码包解码具有累积性<sup>[6]</sup>.

网络编码允许中间节点对信息进行编码后再转发给下游节点, 用户节点通过解码得到原始信息, 从而实现了多播速率“最大流-最小割”理论上界<sup>[7]</sup>. 文献[8]提出从 Markov 链的角度研究多播机会路由问题, 提出最小估计传输计数 (estimated transmission count, ETX) 作为度量, 设计最优多播路由算法来提高网络吞吐量, 该方案虽能在一定程度上提高网络吞吐量性能, 但其研究的是单一组播率,

**引用格式:** 张祖凡, 罗利莎, 张宇. 基于用户簇的分层速率分配优化算法. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 114–126, doi: 10.1360/N112015-00256  
Zhang Z F, Luo L S, Zhang Y. Layer rate allocation optimization algorithm with user cluster (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 114–126, doi: 10.1360/N112015-00256

不能很好地适应异构用户需求. 分层编码能够有效解决具有较低带宽用户为组播限制条件的问题, 根据分层编码的累积性, 较高层次编码包会因为低层次编码包的缺失而失去作用继而丢弃, 从而降低系统吞吐量. Zhang 等<sup>[9,10]</sup>研究了多速率多播的最大吞吐量问题, 证明采用 NC 的多速率组播的最大吞吐量问题是 NP-hard 问题, 提出一种近似满足公平性的 ApproxIVM 算法进行层速率分配, 取较低用户带宽作为其分层速率, 而具有较高带宽用户因其组播速率限制无法充分利用带宽, 该算法缺少对每个分层进行链路带宽分配, 可能存在实际带宽不足的用户不能接收到相应分层, 继而导致一部分网络带宽浪费. 文献 [11] 研究了基于 NC 的分层媒体多播层速率优化分配方案, 提出一种高效启发式 MRAA (m-layer rate allocation algorithm) 算法, 为其传输子图分配带宽并进行层速率优化, 该算法采用 NALBA (new algorithm for link bandwidth allocation) 子算法进行每层链路带宽分配, 其实质是具有较高带宽用户仅复用最大流最小的接收节点路径带宽, 用户未分配带宽采用均分原则, 无法实现链路带宽充分复用, 因而用户实际带宽值就会相应减少, 继而降低了系统吞吐量. 文献 [12] 提出一种基于 NC 的层速率优化问题以及每层波长带宽分配问题, 每层接收用户带宽值作为备选分层速率, 选取该层用户实际接收速率总和最大的备选带宽值作为最优分层速率, 但其每层的吞吐量最大并不能保证系统吞吐量最大, 同时, 在每层链路带宽分配过程中, 仅考虑节点度最大的路径进行链路带宽分配, 没有充分进行用户链路复用, 从而降低了系统吞吐量. 文献 [13] 提出一种基于微分进化算法的层间等级网络编码优化算法, 层间网络编码虽然能提高异构用户的带宽利用率, 但也带来解码过程中的解码复杂性以及算法的复杂性, 同时该方案以牺牲用户间的公平性来实现系统吞吐量最大化, 即牺牲较低带宽的用户来提高系统带宽性能. 文献 [14] 研究了一种中继节点辅助的方式, 中继节点采用层内网络编码和层间网络编码混合的三角网络编码, 列出吞吐量最大化线性方程采用 Lagrange 方程进行求解. 该方案在一定程度上提升了系统吞吐量, 但其前提假设多个信源均分为多层, 每层的接收速率相同, 因而并不能很好地解决异构用户需求.

针对分层组播的分层速率优化问题, 本文设计一种基于用户簇的分层速率分配优化 UC-LRAO 算法, 按照接收用户个数进行分层, 确定每层的接收用户及用户实际接收带宽; 再对每个分层的用户进行链路带宽分配, 在充分复用具有较小接收带宽的用户链路基础上, 依次选取具有节点度最大的链路进行链路带宽分配; 结合用户分簇, 将已有分层合并为预定分层, 得到最优分层速率.

本文第 2 节是系统框图和问题描述, 第 3 节对 UC-LRAO 算法进行阐述, 第 4 节通过仿真验证 UC-LRAO 算法的有效性, 第 5 节进行总结.

## 2 系统框图和问题描述

### 2.1 系统框图

为了分析方便, 用  $G(V, E, T, BS)$  表示有向网络拓扑图, 其中  $V$  表示网络节点集合,  $E$  为网络链路集合,  $(u, v)$  表示  $u$  节点到  $v$  节点的有向链路,  $T$  为网络用户节点集合, 网络中拥有  $|T|$  个用户, 任意用户  $U_i \in T$ ,  $BS$  为信源,  $R \in (V - BS - T)$  为网络中继节点. 也即  $V$  可以划分为  $BS, T, R$  三个不相交集合, 中继节点和接收节点相互独立.

假定信源对视频流进行分层编码<sup>[15]</sup>, 将其编码为  $L$  个分层, 分别为基本层  $L_0$  和增强层次  $L_1, L_2, \dots, L_{L-1}$ . 引入用户分簇思想<sup>[16]</sup>, 定义用户簇为  $C_j, j \in (1, 2, \dots, L)$ , 并作如下假设:

(1) 簇总数为分层编码的总分层数  $L$ , 每个用户簇中至少含有一个用户, 每个用户只能属于一个用户簇;

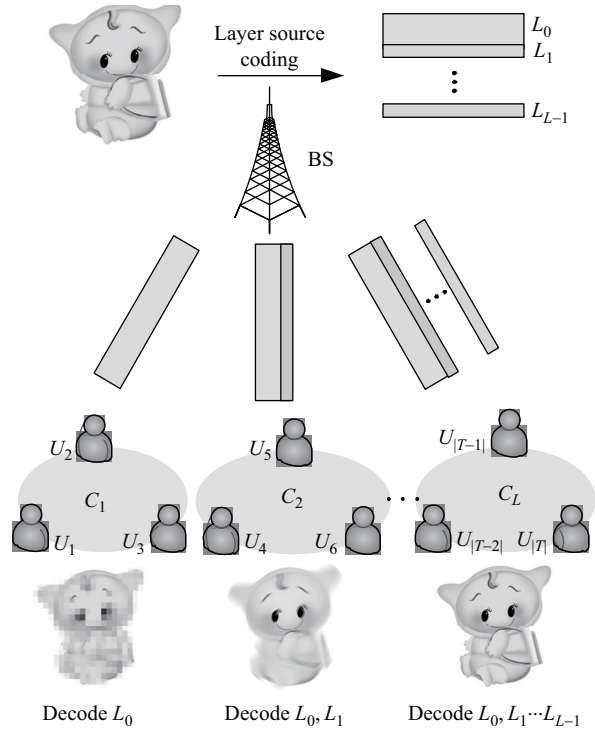


图 1 簇用户的视频分层组播示意图

Figure 1 Video layer multicast of cluster users

(2) 设用户  $U_i \in C_j$  的承载视频流带宽  $B_{U_i}$ , 用户  $U_m \in C_{j+1}$  的承载视频流带宽  $B_{U_m}$ , 则存在  $B_{U_i} < B_{U_m}$ ;

(3) 用户簇  $C_j$  接收的最大分层数为  $j$ , 簇  $C_j$  能够接收前  $j$  个分层编码包. 簇  $C_j$  接收的分层数大于  $C_{j-1}, j > 1$ , 也即簇  $C_j$  解码恢复的视频质量高于簇  $C_{j-1}$ .

图 1 为簇用户的视频分层组播示意图, 信源 BS 将视频分层编码为  $L$  层,  $|T|$  个用户根据自身承载视频流的带宽下载不同质量相同视频. 图中省略了中间节点  $R$ , 以分层视频流来表示中间节点的数据传输. 簇  $C_1$  中用户仅接收基本层  $L_0$ , 簇  $C_2$  中用户接收基本层  $L_0$  和增强层  $L_1$ , 簇  $C_L$  中用户接收前  $L$  层. 不同簇中解码获得的视频流质量不同, 且簇序号越大, 解码恢复的视频质量越高.

## 2.2 问题描述

组播通信的系统吞吐量, 也即用户节点接收速率总和. 引入一个 0-1 二进制变量  $Z_{U_i}^j$ , 用以表示用户节点  $U_i$  能否接收到第  $j$  层数据, 也即判定  $U_i$  是否属于簇  $C_j$ , 则有

$$z_{U_i}^j = \begin{cases} 0, & U_i \in C_j, \\ 1, & U_i \notin C_j, \end{cases} \quad \forall j \in (1, \dots, L), \forall U_i \in T. \quad (1)$$

由其定义可知, 一个用户仅能属于一个簇, 也即有且仅有一个  $Z_{U_i}^j = 1, j \in (1, \dots, L)$ , 参数  $Z_{U_i}^j$

取决于用户自身可用带宽  $B_{U_i}$  和前  $j$  个层的分层速率  $\sum_{k=1}^j r_k$ , 因而式 (1) 可以进一步表示为

$$z_{U_i}^j = \begin{cases} 0, & \sum_{k=1}^j r_k \leq B_{U_i} < \sum_{k=1}^{j+1} r_k, \\ 1, & \text{else,} \end{cases} \quad \forall j \in (1, \dots, L), \forall U_i \in T. \quad (2)$$

采用层间网络编码<sup>[17,18]</sup>能够提升系统吞吐量,但其存在不足,一方面会带来更高计算复杂度,另一方面对用户解码要求也更严苛,即用户仅有接收相应层间编码包才能顺利解码得到视频信息.为了保证每个用户能够解码相应分层编码包,本文仅考虑层内网络编码.中间节点中采用层内网络编码的分层组播方案,假设每条边上没有传输时延且除信源外网络节点都拥有足够大的存储空间来存储接收到的信息,以确保解码的可行性.

在假定簇总数等于分层数且簇  $C_j$  的用户能够接收前  $j$  个分层编码包,系统吞吐量等于用户实际的接收速率总和,则  $L$  层机制下分层组播层速率优化问题可以模型化为

$$\max T_p = \sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^{|T|} z_{U_i}^j \left( \sum_{k=1}^j r_k \right), \quad (3)$$

其中  $\sum_{k=1}^j r_k$  体现了解码的依赖性,仅有接收到前  $j$  层的所有分层编码包才能解码出第  $j$  层信源数据,也即用户  $U_i \in C_j$  其接收速率是前  $j$  层分层速率之和.

约束条件: (1) 流平衡. 中继节点在组播网络中辅助传输数据包,由流守恒定理可知所有的流出数据流等于所有流入的数据流,而在信源或者接收用户的流出数据流和流入数据流不相同,也即

$$\sum_{(u,v) \in \text{In}(v)} f_{U_i}^j(u,v) - \sum_{(v,u) \in \text{Out}(v)} f_{U_i}^j(v,u) = \begin{cases} z_{U_i}^j r_j, & v = \text{BS}, \\ -z_{U_i}^j r_j, & v \in C_j, \\ 0, & v \in R, \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\text{In}(v)$ ,  $\text{Out}(v)$  分别为网络节点  $v$  的输入路径和输出路径集合,  $f_{U_i}^j(u,v)$ ,  $f_{U_i}^j(v,u)$  分别为用户  $U_i$  在链路  $(u,v)$ ,  $(v,u)$  上接收第  $j$  层的链路带宽.

(2) 层内网络编码的带宽特性. 在中继节点上采用层内网络编码,不同用户在同一链路  $(u,v)$  接收同一分层  $j$  时没有链路带宽的竞争,也即

$$f^j(u,v) \geq f_{U_i}^j(u,v) \geq 0, \quad (5)$$

其中,  $f^j(u,v)$  为链路  $(u,v)$  接收第  $j$  层消耗的链路带宽.

(3) 链路带宽限制. 各分层在链路  $(u,v)$  上传输链路带宽总和不能超过链路  $(u,v)$  容量  $C(u,v)$  限制范围,也即在链路  $(u,v)$  接收所有分层的链路带宽不大于其链路容量,

$$\sum_{j=(1,2,\dots,L)} f^j(u,v) \leq C(u,v). \quad (6)$$

(4) 用户公平性限制. 在一个组播组中,为了保证公平性,分层速率的选取是该分层接收集合中用户带宽的最小值,继而保证具有较低带宽的用户能够接收到相应的分层.此时需要所有用户都至少能接收到基本层,拥有较高带宽的用户通过接收更高层来提高解码视频质量,也即

$$T_p \geq |T| \cdot r_1, \quad r_k = \min\{F_{U_i}, \forall U_i \in C_k\}, \quad (7)$$

其中  $r_k$  为第  $k$  层的分层速率,  $F_{U_i}$  为接收前  $k-1$  层后用户  $U_i \in T_k$  的剩余可用带宽.

由式 (3) 可知, 系统吞吐量与参数  $Z_{U_i}^j$  及分层速率  $r_k$  有关, 而  $Z_{U_i}^j$  随着  $r_k$  的变化也不同, 因而很难直接通过优化分层速率实现系统吞吐量最大. 文献 [10] 指出最大化吞吐量总和的分层速率优化问题是一个 NP-hard 问题. 文献 [11] 解决层速率优化问题, 首先将接收每层的用户带宽最小值作为该层最优分层速率, 确保用户能接收到该分层, 并证明优化分配  $L$  层层速率即是网络拓扑图优化分解为  $L$  个传输子图.

由于各用户在传输过程中存在公用链路, 因而用户的可用带宽往往小于用户的理论带宽, 在不知道用户的可用带宽情况下, 直接将用户分解为  $L$  个用户簇并保证系统吞吐量最大是较为困难. 针对层速率优化 NP-Hard 问题, 采用类似文献 [11] 的思路, 根据约束条件 (1)–(4), 本文首先进行  $N$  ( $N = |T|$ ) 个传输子图划分, 为满足用户公平性, 取传输子图的接收用户带宽最小值作为该分层的最佳分层速率, 求出每个传输子图的分层速率、接收用户集合及用户可用带宽; 对每个传输子图进行链路带宽分配, 采用高复用链路进行分层视频流传输, 在复用链路上采用层内网络编码确保用户能够接收到相应分层编码包; 最后采用插板法进行用户分簇, 将  $N$  层合并为  $L$  层, 将系统吞吐量问题转化为各簇用户接收速率总和最大问题.

### 3 UC-LRAO 算法设计

本文所给出的 UC-LRAO 算法包括 3 个子算法, 分别为 NRAA (n-layer rate allocation algorithm) 子算法、启发式链路重用的带宽分配 LRBA (link reuse bandwidth allocation algorithm) 子算法、PUC-LRAO (plug-in l-layer rate allocation algorithm with user cluster) 子算法. 其中, NRAA 子算法是将网络拓扑图按照接收节点个数  $|T|$  分解为  $N$  ( $N = |T|$ ) 个传输子图, 也即将信源拟分层为  $N$  层, 用户接收前  $l-1$  层, 用户带宽最小值作为其第  $l$  ( $l \leq N$ ) 层分层速率, 得出各用户承载分层视频流的带宽  $B_{U_i}$ . LRBA 子算法则是对每个分层的接收用户进行链路带宽分配, 其实质是在充分复用已分配带宽的用户链路前提下, 依次选取节点度最大的链路进行带宽分配, 进一步提高链路利用率, 为更高层的接收预留链路带宽资源. 而 PUC-LRAO 子算法是结合用户分簇思想, 将用户承载带宽作为限制因素, 提出一种插板算法, 将  $N$  层合并为  $L$  个分层, 求出  $L$  层机制下吞吐量最大化的最佳分簇及最优分层速率. 在带宽分配阶段的复用链路采用网络编码, 可以有效解决同一分层的链路带宽竞争问题. 链路充分复用为更高层的接收预留更多带宽资源, 进一步提高系统吞吐量.

#### 3.1 NRAA 算法

本文将以最大化吞吐量为目标的层速率优化问题首先转化为  $N$  层机制下分层编码层速率优化问题, 将网络拓扑图分解为  $N$  个传输子图. 设  $G_l(V_l, E_l, T_l, BS)$  为第  $l$  ( $l \leq N$ ) 层的传输子图, 利用 Edmonds-Karp 算法<sup>[19]</sup> 计算第  $l$  层中用户接收前  $l-1$  个分层剩余的最大流  $F_{U_i}$ , 为了保证每个用户都能接收到相应分层编码包, 将非零  $F_{U_i}$  的最小值作为第  $l$  层最优层速率.

值得注意的是, 当具有带宽最小值的用户存在多个, 为了确保每个分层都存在用户接收, 此时需更新实际分层数  $N$  ( $N < |T|$ ). NRAA 算法流程图如算法 1 所示.

其中,  $\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_N]$ , 各用户承载分层视频流的带宽矩阵为  $\mathbf{B} = [B_{U_1}, B_{U_2}, \dots, B_{U_l}, \dots, B_{U_{|T|}}]$ , 并对用户带宽进行升序排序, 则有  $B_{U_i} \leq B_{U_{i+1}}, U_i \in T, B_{U_i} = \sum_{m=(1,2,\dots,l)} r_m, U_i \in T_l$ .

**算法 1** NRAA 算法

**Require:** 网络拓扑图  $G(V, E, T, BS)$ , 任意链路  $(u, v) \in E$  的带宽  $C(u, v)$ ;

**Ensure:** 分层速率矩阵  $\mathbf{r}$ , 各用户承载分层视频流的带宽矩阵  $\mathbf{B}$ ;

1. 初始化 for  $\forall U_i \in T, 1 \leq i \leq |T|$  do  $B_{U_i} = 0$ , 初始化分层数  $l = 1$  以及分层总数  $N = |T|$ , 第  $l$  ( $l \leq N$ ) 层接收用户为所有用户, 也即  $l$  ( $l \leq N$ ),  $|T_l| = |T|$ , 初始化分层速率矩阵  $\mathbf{r} = 0$ ;
2. for  $l = 1$  to  $N$
3. while  $i \leq |T_l|$
4. 运行 Edmonds-Karp 算法, 计算剩余最大流  $F_{U_i}$ ;
5. 如果  $F_{U_i} \leq 0$ , 将用户  $U_i$  从  $T_l$  中删除, 也即  $T_l = T_l - U_i, |T_l| = |T_l| - 1$ ;
6. 更新  $i = i + 1$ ;
7. end while
8. if  $T_l == \emptyset$ , do 更新实际分层数  $N = l - 1$ , NRAA 算法结束;
9. 更新第  $l$  层的分层速率  $r_l = \min \{F_{U_i}, \forall U_i \in T_l\}$ , for  $\forall U_i \in T_l, 1 \leq i \leq |T_l|$ , do  $B_{U_i} = B_{U_i} + r_l$ ;
10. 调用 LRBA 算法为第  $l$  层的链路带宽分配  $f'(u, v)$ , 求出传输子图  $\hat{G}_l(V_l, E_l, T_l, BS)$ ;
11. 更新第  $l$  层的接收用户集合  $T_l = T_{l-1}$ ;
12. end for

**3.2 LRBA 算法**

在确定好每个分层的用户、分层速率以及各用户承载分层视频流的带宽, 应对其传输链路分配相应带宽. 本文提出一种启发式链路重用的带宽分配 LRBA 算法, 在满足流平衡及最大流等约束条件下, 对用户进行链路带宽分配, 其实质是鼓励用户重用其他用户路径. 在第  $l$  层传输拓扑中, 每个用户选择路径是相对独立的, 尽量多重用其他接收用户路径可以为更高分层编码包的接收预留更多资源, 提高链路重用率, 继而提高系统吞吐量. 在重用路径上采用网络编码来确保用户接收到相应编码包.

用  $P$  表征  $G(V, E, T, BS)$  中的路径集合,  $P_l$  表示第  $l$  个分层传输子图  $G_l(V_l, E_l, T_l, BS)$  的路径集合,  $E(P_l)$  表示  $P_l$  中所有链路集合, 分层速率为  $r_l$ . 为了保证  $T_l$  用户全部能接收到第  $l$  层编码包, 由文献 [11] 可知, 第  $l$  层最优分层速率为接收用户带宽值的最低值, 因而集合  $T'_l$  中用户将自身剩余带宽全部用来接收第  $l$  层编码包, 也即假定  $T'_l$  用户已完成链路带宽分配, 并设其传输路径集合为  $P_{T'_l}$ . 剩余带宽值较大的用户集合  $T''_l$  中用户与已分配链路带宽的用户进行链路重用后, 若用户  $U_i$  还需分配带宽  $u_{assign} F_{U_i} > 0$ , 依次选取包含最大节点度  $\max(\deg_u)$  的路径进行链路带宽分配, 定义节点  $u$  的度  $\deg_u$  为节点  $u$  入度  $\text{indeg}_u$  与出度  $\text{outdeg}_u$  之和减去 1, 也即

$$\deg_u = \text{indeg}_u + \text{outdeg}_u - 1. \quad (8)$$

假设信源存在  $N_{U_i}$  种路径到达用户  $U_i$ , 则用户  $U_i$  路径集合  $P_{U_i}$  可以表示为

$$P_{U_i} = \{P_{U_i,1}, P_{U_i,2}, \dots, P_{U_i,m}, \dots, P_{U_i,N_{U_i}}\}. \quad (9)$$

设路径  $P_{U_i,m}$  的剩余带宽值为  $F_{U_i,m}$ , 经过链路  $(u, v)$  的流量是  $F_{U_i}(u, v)$ . 为了保证  $T'_l$  中所有用户接收第  $l$  层数据, 则链路  $(u, v)$  上需要分配带宽  $f'(u, v)$  可以表示为

$$f'(u, v) = \max \{F_{U_i}(u, v) \mid U_i \in T'_l\}. \quad (10)$$

对于剩余带宽大于  $r_l$  的用户  $U_i \in T''_l$ , 采用 LRBA 算法 (见算法 2) 进行第  $l$  层链路带宽分配.

在用户和已分配带宽的用户进行链路复用时, 选取该路径上已分配带宽的用户最大流的最大值、用户剩余的带宽以及该用户路径最大流中的最小值作为其已分配带宽  $\text{pre}F_{U_i,m}$ , 也即

$$\text{pre}F_{U_i,m} = \min \{\max(F_{U_i}(u, v)), \text{un}F_{U_i}, F_{U_i,m}\}, \quad (11)$$

**算法 2** LRBA 算法

**Require:** 第  $l$  层传输子图  $G_l(V_l, E_l, T_l, BS)$ , 分层速率  $r_l$ , 对于  $\forall U_i \in T_l$ , 用户  $F_{U_i}$  的带宽, 采用 Edmonds-Karp 算法得出用户的路径集合  $P_{U_i}$ , 并设信源经过  $N_{U_i}$  条路径到达用户  $U_i$ ;

**Ensure:** 第  $l$  层分配的链路带宽  $f'(u, v)$  和传输子图  $\hat{G}_l(V_l, E_l, T_l, BS)$ ;

1. 调用初始化链路  $(u, v)$  需分配带宽值为  $f'(u, v) = \max\{F_{U_i}(u, v) \mid U_i \in T_l'\}$ , 对于  $\forall U_i \in T_l''$ , 初始化从信源到用户  $U_i$  的各路径为第  $l$  层还需分配路径带宽  $\text{un}F_{U_i} = r_l$ , 用户  $U_i$  已分配路径集合  $P_{U_i}^{be} = \emptyset$ , 对于任意路径  $\forall P_{U_i, m} \in P_{U_i}$ , 初始化路径  $P_{U_i, m}$  的剩余带宽值  $\text{re}F_{U_i, m} = F_{U_i, m}$ , 其中  $F_{U_i, m}$  为路径  $P_{U_i, m}$  的带宽. 初始化第  $l$  层传输路径  $P_l = P_{T_l'}$ , 已分配链路带宽的用户集合  $T_l^{be} = T_l'$ , 初始化用户序号  $i = 1$ , 初始化路径序号  $m = 1$ ;
2. for  $i = 1$  to  $|T_l|$ ;
3.   if  $(P_l \cap P_{U_i}) \neq \emptyset$
4.     for  $m = 1$  to  $N_{U_i}$ ;
5.       if  $(u, v) \in (P_{U_i, m} \cap P_l)$
6.          用户  $U_i$  复用链路  $(u, v)$  并采用式 (11) 更新路径  $P_{U_i, m}$  上已分配带宽  $\text{pre}F_{U_i, m}$ ;
7.          更新复用后用户  $U_i$  还需分配带宽  $\text{un}F_{U_i} = \text{un}F_{U_i} - \text{pre}F_{U_i, m}$ ;
8.          更新复用后  $P_{U_i, m}$  上剩余带宽  $\text{re}F_{U_i, m} = \text{re}F_{U_i, m} - \text{pre}F_{U_i, m}$ ;
9.          将  $P_{U_i, m}$  添加到已分配路径集合  $P_{U_i}^{be} = P_{U_i}^{be} \cup P_{U_i, m}$ ;
10.       end if
11.     if  $\text{un}F_{U_i} \leq 0$ , do 跳转到 21;
12.   end for
13. end if
14. while  $\text{un}F_{U_i} > 0$
15.   选取包含节点度最大  $\max(\text{deg}_u)$  路径  $P_{U_i, m}$ , 其中  $u \in P_{U_i, m}$ , 也即  $P_{U_i, m} = \{\max(\text{deg}_u), P_{U_i, m} \in P_{U_i}\}$ ;
16.   将路径  $P_{U_i, m}$  剩余带宽  $\text{re}F_{U_i, m}$  和用户  $P_{U_i, m}$  未分配带宽  $\text{un}F_{U_i}$  两者的最小值赋给  $\text{pre}F_{U_i, m}$ , 也即  $\text{pre}F_{U_i, m} = \min\{\text{re}F_{U_i, m}, \text{un}F_{U_i}\}$ ;
17.   更新剩余带宽  $\text{re}F_{U_i, m} = \text{re}F_{U_i, m} - \text{pre}F_{U_i, m}$ ;
18.   更新需分配带宽  $\text{un}F_{U_i} = \text{un}F_{U_i} - \text{pre}F_{U_i, m}$ ;
19.   将  $P_{U_i, m}$  添加到已分配路径集合  $P_{U_i}^{be} = P_{U_i}^{be} \cup P_{U_i, m}$ , 将已添加路径  $P_{U_i, m}$  从用户路径中剔除  $P_{U_i} = P_{U_i} - P_{U_i, m}$ ;
20. end while
21. 记录用户  $U_i$  接收到第  $l$  层路径集合  $P_{U_i} = P_{U_i}^{be}$ , 对于  $\forall (u, v) \in P_{U_i}$ , 已分配带宽  $f'_{U_i}(u, v) = F_{U_i, m} - \text{re}F_{U_i, m}$ ;
22. 更新第  $l$  层传输路径  $P_l = P_l \cup P_{U_i}$ , 将用户  $U_i$  添加到已分配用户集合  $T_l^{be} = T_l^{be} \cup U_i$ ;
23. end for
24. 对于  $\forall (u, v) \in P_l$ , 更新链路带宽  $f'(u, v) = \max\{f'_{U_i}(u, v), U_i \in T_l, (u, v) \in P_l\}$  和包含所有路径  $P_l$  的传输子图  $\hat{G}_l(V_l, E_l, T_l, BS)$ , 为了保证用户接收到相应的分层数, 在复用链路上, 采用层内网络编码.

其中  $U_i \in T_l^{be}, (u, v) \in P_{U_i, m}$ .

由前两个子算法得出  $N$  个分层情况下的第  $l$  层分层速率  $r_l$ 、分配的链路带宽  $F_l$  及分层速率矩阵  $\mathbf{r}$  可以表示为

$$r_l = \min\{F_{U_i}, \forall U_i \in T_l\}, \quad (12)$$

$$F_l = \sum_{(u, v) \in P_l} f'_l(u, v), \quad (13)$$

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_l, \dots, r_N]. \quad (14)$$

**3.3 PUC-LRAO 算法**

前两个子算法得到每个用户的可用带宽, 采用 PUC-LRAO 算法进行用户分簇的确定. 将拟分层的  $N$  个分层合并成  $L$  个分层, 根据有序用户的实际接收速率, 设用户簇  $C_j$  的接收节点个数为  $|C_j|$ , 则系

统吞吐量最大化问题可以转化为  $\max\{\sum_{j=(1,2,\dots,L)} |C_j| \cdot \min\{B_{U_i}, \forall U_i \in C_j\}\}$ , 其中  $\min\{B_{U_i}, \forall U_i \in C_j\}$  为簇  $C_j$  用户实际带宽的最小值.

在假定簇  $C_j$  接收最大分层数为  $j$ , 簇总数为分层总数, 本文将吞吐量最大化问题转化为将各个用户放置在不同簇  $C_j$  中, 也即每个分层传输子图确定过程. 也就是说, 为实现吞吐量最大化可以将层速率优化问题直接转化为寻找最佳分簇方式. 根据已排序用户带宽值将用户放入相应簇中, 类似于相同元素分堆问题. 根据用户实际可用带宽进行排序,  $B_{U_i} \leq B_{U_{i+1}}, U_i \in T$ . 将具有相同实际带宽的用户进行捆绑, 并记录捆绑后的用户数为  $D$ . 采用插板法,  $D$  个用户具有  $(D-1)$  个空, 插入  $(L-1)$  个板, 形成  $L$  个分组, 也即将  $D$  个用户分为  $L$  簇, 则共有  $C_{D-1}^{L-1}$  种分簇方式, 下面将详细介绍利用插板法来进行分簇.

利用插板法对有序用户带宽进行分簇, 以用户吞吐量总和作为目标函数, 求出最优层速率的分簇, PUC-LRAO 算法具体步骤如算法 3.

### 算法 3 PUC-LRAO 算法

**Require:** 用户实际带宽矩阵  $\mathbf{B}$ , 分簇总数  $L$ , 捆绑后用户总数  $D$ ;

**Ensure:** 最优分层速率矩阵  $\mathbf{r}^{\text{optimal}}$  和最优系统吞吐量  $T_p^{\text{optimal}}$ ;

1. if  $D \leq L$
2. 取每个分层接收的用户带宽最小值作为分层速率, 直接求出系统吞吐量;
3. else
4. 利用插板法, 列出  $C_{D-1}^{L-1}$  中分簇方式, 初始化最优系统吞吐量  $T_p^{\text{optimal}} = 0$ ;
5. for  $i = 1$  to  $C_{D-1}^{L-1}$
6. 利用式 (17), (18), (16) 分别计算第  $i$  种分簇方式的分层速率矩阵  $\mathbf{r}$  和系统吞吐量  $T_p$ ;
7. 若存在  $T_p > T_p^{\text{optimal}}$ , 更新  $T_p^{\text{optimal}} = T_p$ , 更新最优分层速率矩阵  $\mathbf{r}^{\text{optimal}} = \mathbf{r}$ ;
8. end for
9. end if
10. 吞吐量  $T_p^{\text{optimal}}$  对应的分簇方式即为最佳分簇, 输出最优分层速率矩阵  $\mathbf{r}^{\text{optimal}}$  和  $T_p^{\text{optimal}}$ .

在保证用户公平性以及流平衡等约束条件下, 前两个子算法得出每个用户的可用带宽、 $N$  个分层对应的分层速率及链路带宽分配情况下, 采用插板法进行分簇, 遍历每个分簇的吞吐量  $T_p$ , 找出最大吞吐量对应的用户分簇及对应的最优分层速率, 则该最优分层速率矩阵  $\mathbf{r}^{\text{optimal}}$  对应的  $T_p^{\text{optimal}}$  即为最优解.

由分簇定义, 第  $j$  个簇  $C_j$  用户可以接收前  $j$  层所有编码包, 用  $|C_j|$  表示簇  $C_j$  中包含的用户个数, 则第  $k$  层编码包的接收用户集合  $T_k$  可以表示为

$$T_k = \sum_{j=(k,\dots,L)} |C_j|, \quad 1 \leq k \leq L. \quad (15)$$

合并为  $L$  层后, 式 (3) 中的吞吐量  $T_p$  可以进一步表示为

$$T_p = \sum_{k=1}^L \sum_{j=k}^L |C_j| \cdot r_k. \quad (16)$$

为保证每个分层接收用户都能接收到该分层, 则分层速率取决于该层接收用户的带宽最小值. 在假定簇  $C_j$  接收最大分层数为  $j$ ,  $C_j$  中用户可用带宽小于  $C_{j+1}$  中用户带宽, 则  $r_k$  可以表示为

$$r_k = \begin{cases} \min(B_{U_i}), & k = 1, \\ \min(B_{U_i}) - \sum_{i=(1,2,\dots,k-1)} r_i, & k \neq 1, \end{cases} \quad \forall U_j \in C_k, \quad (17)$$



合并为  $L$  层后, 分层速率矩阵可以表示为

$$\mathbf{r} = [r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_L]. \quad (18)$$

算法 PUC-LRAO 将  $N$  个分层合并成  $L$  个分层,  $L$  层机制下第  $k$  层是由  $N$  层机制下第  $(|T| - |T_k| + 1)$  层到第  $(|T| - |T_k| + n_k)$  层合并而成. 因而第  $k$  层分配的链路带宽可以表示为

$$B_k = \sum_{(|T|-|T_k|+1)}^{(|T|-|T_k|+n_k)} F_l = \sum_{(|T|-|T_k|+1)}^{(|T|-|T_k|+n_k)} \sum_{(u,v) \in P_l} f'_l(u, v). \quad (19)$$

与文献 [11] 不同之处在于, 一方面采用高链路复用, 用户按照带宽从小到大顺序为每个接收节点分配链路带宽, 在充分复用已分配带宽的用户链路基础上, 若还存在未分配带宽就依次选取路径中节点度最大的路径进行带宽分配, 若分配完毕则将其添加到已分配带宽的用户中, 用于后续用户的带宽分配, 提高链路利用率, 继而为更高分层的传输预留资源; 另一方面从全局角度进行层速率的优化, 采用插板法根据用户可用带宽进行分簇, 遍历每种分簇方式的吞吐量, 求出吞吐量最大化对应的最优分簇及最优分层速率.

#### 4 仿真实验和结果分析

若直接从系统吞吐量来对比分析不同算法优劣, 需要保证在仿真过程中各用户的理论带宽值  $\max\text{-flow}(U_i)$  保持不变, 也即理论系统吞吐量  $\sum_{U_i \in T} \max\text{-flow}(U_i)$  保持不变, 这对于不同随机网络以及不同用户数的随机网络是不能实现的, 因而从满足异构需求角度出发, 引入两个相关效用函数, 平均标准速率 ANR (average normalized rate) 和归一化吞吐量 NT (normalized throughput) [11]. 效用函数 ANR 反映系统中接收用户对各自可用带宽的平均利用率, 其值越大, 则用户实际接收带宽越接近各自理论接收带宽, 用户的满意度越高. 各用户理论接收带宽相同的情况下, 平均标准速率 ANR 性能越高, 用户的实际接收带宽越大, 也即本文的优化目标系统吞吐量最大化. 效用函数 NT 用来表述所有接收用户的实际接收带宽和理论接收带宽的比例, 其值越大, 说明带宽利用性能更佳. 理论系统吞吐量相同的情况下, 归一化吞吐量 NT 性能越高, 用户的实际接收带宽越大.

$$\text{ANR} = \frac{1}{|T|} \sum_{U_i \in T} \frac{R_i}{\max\text{-flow}(U_i)}, \quad (20)$$

$$\text{NT} = \frac{T_p}{\sum_{U_i \in T} \max\text{-flow}(U_i)}, \quad (21)$$

其中,  $R_i$  和  $\max\text{-flow}(U_i)$  分别代表用户节点  $U_i$  的实际接收的总速率及理论最大流值.

采用 Salama 模型 [20] 产生随机网络拓扑进行带宽性能仿真的评估,  $|T|$  个用户随机分布在直角坐标系中, Salama 模型产生一个平均节点度为  $\varepsilon$  且任意两节点之间连通性由概率  $P_\varepsilon(u, v)$  决定的随机网络,  $P_\varepsilon(u, v)$  定义为

$$P_\varepsilon(u, v) \triangleq \frac{q \cdot \varepsilon}{|T|} \cdot \beta \cdot \exp \frac{-d(u, v)}{d_{\max} \cdot \alpha}, \quad (22)$$

其中  $q$  为常数,  $\varepsilon$  为平均节点度,  $\alpha, \beta \in (0, 1]$  为网络特性的调节参数,  $\alpha$  控制网络短边与长边比例,  $\beta$  控制网络度数, 选择适当的  $\alpha, \beta$  能使生成的随机网络更接近现实网络.  $d(u, v)$  为  $u, v$  之间的欧几里得距离, 也即两节点之间的直线距离.  $d_{\max}$  为所有节点之间距离最大值.

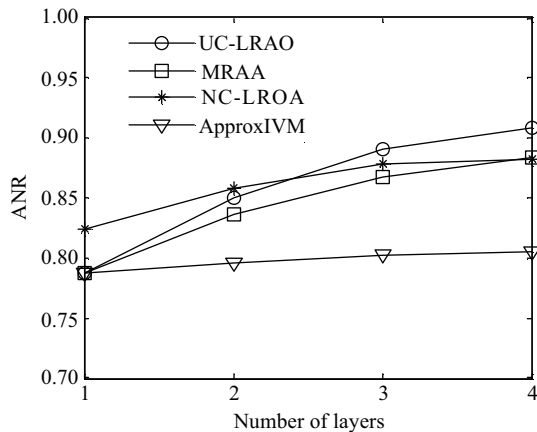


图 2 不同分层数情况下的 ANR 性能

Figure 2 ANR performance against the number of layers

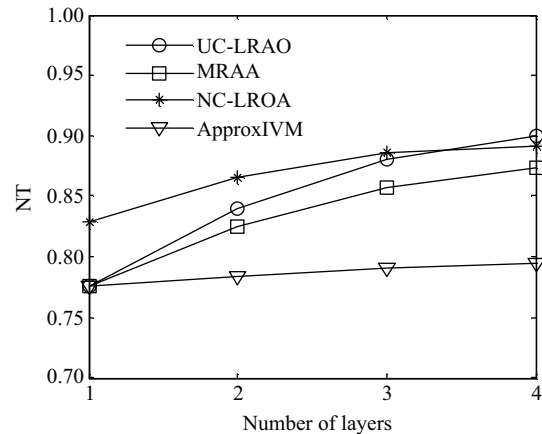


图 3 不同分层数下归一化吞吐量性能

Figure 3 Normalized throughput performance against the number of layers

本文通过 MATLAB 仿真实验评估所提出的算法性能, 为了保证随机网络更为接近现实网络, 本实验中设定  $\alpha = 0.15, \beta = 0.2$ , 控制网络中平均节点度  $\varepsilon$  减少不同网络带来的差异性. 模拟仿真中设定  $\varepsilon = 3$ . 比较 UC-LRAO 算法和 MARR<sup>[11]</sup> 算法、NC-LROA<sup>[12]</sup> 算法以及 ApproxIVM<sup>[9,10]</sup> 算法在不同分层数情况下和不同接收用户情况下的 ANR 性能和 NT 性能.

#### 4.1 分层数对带宽性能的影响

针对分层组播分层数变化时对网络带宽性能的影响进行分析. 采用 Salama 模型生成用户节点为 10, 中间节点为 20 的随机网络拓扑, 链路带宽容量在  $[1,20]$  取值, 为不失一般性, 生成 10 个随机网络, 具有不同链路容量的同一网络拓扑都进行 50 次实验, 最终取实验平均值.

实验中, 本文比较了 UC-LRAO 算法、NC-LROA 算法、MRAA 算法以及 ApproxIVM 算法在不同分层数条件下对应的 ANR 和 NT 性能. 如图 2 和 3 所示, 在具有相同用户节点和中继节点的随机网络拓扑中, 随着分层数增加, 四个算法的 ANR 和 NT 性能都随之增加, 原因在于分层数增加, 用户实际接收速率越接近用户可用带宽, 用户能够接收的信息越多, 带宽利用率越高; 在分层数为 1, UC-LRAO 算法、MRAA 算法、ApproxIVM 算法 3 者的 ANR 和 NT 值都相同且较少, 原因在于, 3 种算法最优分层速率都取决于网络中具有非零最小可用带宽的用户, 也即都是以接收该层的用户最小可用带宽作为第一层速率, 而 NC-LROA 算法将参与该层接收的所有用户可用接收带宽作为备选层速率, 接收用户吞吐量总和最大化的用户带宽即为最优分层速率, 因而其带宽性能较好. 随着分层数增加, UC-LRAO 算法 ANR 和 NT 性能最佳, 因其算法进行充分链路复用优化每层链路带宽分配, 并从全局角度下进行层速率的优化; MRAA 算法在链路带宽分配阶段仅考虑的是复用具有最小带宽的用户链路, 未分配带宽采用均匀分摊策略, 未能充分复用带宽, 其 ANR 和 NT 性能稍差; NC-LROA 算法在每层速率的选取最优, 其 NT 性能较好, 但这并不能保证所有分层速率是最优, 用户带宽低于最优分层速率将不能接收到该层及其以上层次, 因而用户的带宽利用率 ANR 较低; ApproxIVM 算法每层链路带宽采用随机分配, 没有充分利用带宽, 且层速率仅取决于可用带宽的最小值因而其性能最差. 总体来说, UC-LRAO 算法要优于 MRAA 算法和 ApproxIVM 算法, 而其在分层数较小时, NC-LROA 算法性能更佳. 但 NC-LROA 算法的实质是牺牲具有较小带宽的用户性能来保证单个分层的吞吐量最大, 也即

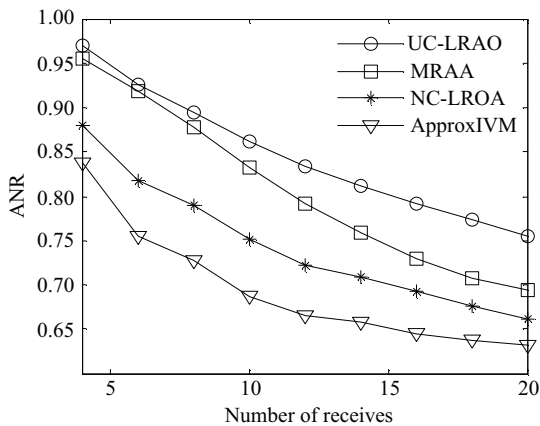


图 4 不同用户数情况下的 ANR 性能

Figure 4 ANR performance against the number of receives

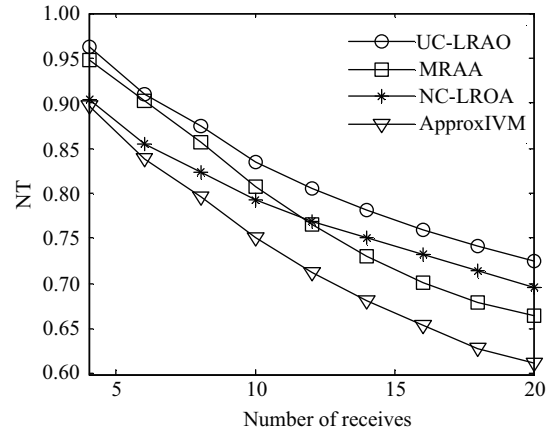


图 5 不同用户数下归一化吞吐量性能

Figure 5 Normalized throughput performance against the number of receives

存在具有较低带宽的用户很有可能接收不到任何视频信息, 因而其不满足用户公平性原则, 且分层数较低时, 分层组播的优势难以得到发挥, 文献 [11] 指出为满足用户异构性及合理开销, 分层数  $L = 4$  较为合理, 因而本文提出的算法在满足用户公平性时性能较好.

#### 4.2 用户数对带宽性能的影响

针对网络拓扑图中用户数变化时对网络带宽性能的影响进行分析, 固定分层数  $L = 4$ . 采用 Salama 模型生成网络节点总数固定为 40, 用户数从 4 个逐步增长到 20 个, 步长为 2, 链路带宽容量在 [1,20] 取值的随机网络. 为不失一般性, 不同用户数生成 10 个随机网络, 具有不同链路容量的同一网络拓扑进行 50 次实验, 最终取实验平均值. 采用平均节点度为 3 的多个不同的随机网络进行实验, 消除不同网络对带宽性能的影响. 采用不同链路容量的同一网络进行多次实验消除链路容量不同对带宽性能的影响.

用户数以步长为 2 进行增加, 在仿真过程中, 首先采用 Salama 模型对其进行随机网络的产生, 采用 UC-LRAO 中的 3 个子算法来进行分层速率的确定和链路带宽的分配. 从图 4 和 5 中可以看出, 随着用户个数增多, 4 种算法的带宽性能都呈下降趋势. 这是因为网络节点总数固定时, 随着用户数增多, 中间节点个数减少, 不同用户的公用链路增加, 使得满足不同用户最大流的路径减少, 用户中没有达到最大接收速率的数目增多, 网络整体带宽性能相应下降. 从图中可以看出, UC-LRAO 算法的 ANR 和 NT 性能最佳. 一方面, 该算法在充分复用已分配带宽的链路基础上, 依次选取节点度最大的路径进行带宽分配, 为未分配带宽的用户链路复用提供可能, 这样既充分重用链路又为更高层的接收预留了更多资源; 另一方面, 从全局角度进行分层合并实现层速率优化. 而其他 3 种启发式算法中, ApproxIVM 算法性能最差, 因为该算法每次选取最低用户接收带宽作为分层速率且随机选取链路进行数据传输, 没有考虑到链路的有效分配. 算法 MRAA 仅采用具有最小带宽的用户链路进行复用, 被动地增加了链路重用. 算法 NC-LROA 中选取合适的用户带宽作为分层速率确保该分层接收速率总和最大, 但不能保证所有分层的接收速率总和最大, 而用户带宽小于分层速率的用户不能接收到该分层及以上层次, 因而其 ANR 性能较好, 而该算法的 NT 性能较差.

## 5 结论

本文针对分层组播的分层速率优化问题,提出 UC-LRAO 算法优化分配分层速率以实现系统吞吐量最大化. 利用链路复用 LRBA 子算法为每层分配链路带宽,在充分复用较低带宽的用户链路基础上,选取节点度最大的路径进行带宽分配,为更高层编码包的接收预留更多资源,在复用链路上采用层内网络编码确保用户接收到相应分层编码包;结合用户分簇思想,将多个分层合并为预定分层数,从全局角度进行分层速率优化. 实验表明,本文提出的 UC-LRAO 算法相比于已有算法在吞吐量性能方面有一定提升.

## 参考文献

- 1 Kovács E R, Pedersen M V, Lucani D E, et al. Receiver heterogeneity helps: network coding wireless multi-layer multicast. In: Proceedings of International Symposium on Network Coding, Aalborg, 2014. 1–6
- 2 Tassi A, Chatzigeorgiou I, Vukobratovic D. Resource-allocation frameworks for network-coded layered multimedia multicast services. *IEEE J Sele Areas Commun*, 2015, 33: 141–155
- 3 Keyin X, Yide Z, Gang F. eCOPE: energy efficient network coding scheme in multi-rate wireless networks. In: Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking Workshop, Shanghai, 2013. 18–23
- 4 Kim M J, Lucani D, Shi X M, et al. Network coding for multi-resolution multicast. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, San Diego, 2010. 1–9
- 5 Zhao J, Yang F, Zhang Q, et al. LION: layered overlay multicast with network coding. *IEEE Trans Multimedia*, 2006, 8: 1021–1032
- 6 Lee S H, Vishwanath S. Distributed rate allocation for network-coded multicast networks. *IEEE Commun Lett*, 2013, 17: 2204–2207
- 7 Yang M, Yang Y Y. Applying network coding to peer-to-peer file sharing. *IEEE Trans Comput*, 2013, 63: 1938–1950
- 8 Wang P, Gu Y T, Mei S L. Optimal multicast opportunistic routing based on Markov chain. *Sci Sin Inform*, 2013, 43: 1032–1041 [王鹏, 谷源涛, 梅顺良. 基于 Markov 链的最优多播机会路由算法. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43: 1032–1041]
- 9 Zhang M. On the study of the optimal multi-rate throughput for multicast. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, 2010. 322–326
- 10 Zhang M, Zhang S Y, Liu W Y. On the optimal multi-rate throughput for multicast. *J Electron Inf Tech*, 2008, 30: 16–20 [张牧, 张顺颐, 刘伟彦. 多速率多播最大吞吐量问题研究. *电子与信息学报*, 2008, 30: 16–20]
- 11 Lin X B, Xu Y L, Zhan C, et al. Optimal layer rate allocation in layered media multicast based on network coding. *J Electron Inf Tech*, 2010, 32: 2421–2428 [林晓斌, 许胤龙, 詹成, 等. 基于网络编码的分层媒体多播中的层速率分配优化. *电子与信息学报*, 2010, 32: 2421–2428]
- 12 Liu H L, Hu T, Chen Y, et al. Optimization of layer rate and wavelength allocation based on network coding for multirate optical multicast. *IET Commun*, 2014, 8: 1570–1577
- 13 Si J-J, Cheng Y-B, Sun M-M. Optimization of inter-layer hierarchical network codes based on differential evolution algorithm. *J Yanshan Univ*, 2014, 38: 340–347 [司菁菁, 程银波, 孙明明. 基于微分进化算法的层间等级网络编码优化. *燕山大学学报*, 2014, 38: 340–347]
- 14 Ostovari P, Khreishah A, Wu J. Multi-layer video streaming with helper nodes using network coding. In: Proceedings of IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, Hangzhou, 2013. 524–532
- 15 Seo K, Roh K. Advanced FGS coding scheme based on MPEG-4 FGS technology. In: Proceedings of IEEE Workshop on Multimedia Signal Processing, Crete, 2007. 308–311
- 16 Wei Y H, Wang J Y, Qiu H B. A stable scheme of application layer multicast for heterogeneous and dynamic networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, Guilin, 2014. 414–419
- 17 Widmer J, Capalbo A, Anta A F, et al. Rate allocation for layered multicast streaming with inter-layer network coding. In: Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications, Orlando, 2012. 2796–2800
- 18 Tan X L, Li H, Zhu Z P, et al. LMTM: multi-tree multicast with inter-layer network coding for layered multimedia streaming. In: Proceedings of the International ICST Conference on Communications and Networking, Guilin, 2013. 871–876
- 19 Edmonds J, Karp R M. Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *J ACM*, 1972, 19: 248–264

20 Salama H F, Reeves D S, Viniotis Y, et al. Evaluation of multicast routing algorithms for real-time communication on high-speed networks. *IEEE J Sele Areas Commun*, 1997, 15: 332–345

## Layer rate allocation optimization algorithm with user cluster

Zufan ZHANG<sup>1,2</sup>, Lisha LUO<sup>1\*</sup> & Yu ZHANG<sup>1</sup>

1. *School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;*

2. *Chongqing Key Labs of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China*

\*Corresponding author. E-mail: 958034213@qq.com

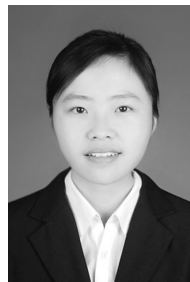
**Abstract** The layer rate optimization of a video layered multicast, in heterogeneous network, includes the number of layers, layer rate, and bandwidth of the user links. In order to solve the NP-hard problem in layer rate optimization, a Layer Rate Allocation Optimization with User Cluster (UC-LRAO) algorithm is proposed. The number of users in each layer and the corresponding user bandwidth carrying video streaming is obtained according to the total user number. Then the video streaming link bandwidth of users of each layer is allocated by introducing the Edmonds-Karp Max-flow Min-cut algorithm and intra-layer network coding. Finally, according to the expected layer number of the layered video streaming, the video streaming is layered again and reconstructed by clustering the users. Then, the layer rate and link bandwidth are optimized and allocated. Simulation results show that the proposed algorithm can improve the system throughput.

**Keywords** heterogeneous network, layered multicast, user cluster, layer rate, user link bandwidth

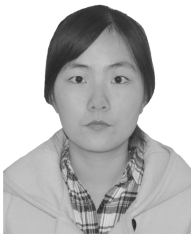


**Zufan ZHANG** obtained his M.S. degree in electromagnetic field and microwave technology from Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China, and a Ph.D. degree in communication and information system from the University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, China, in 1997 and 2007 respectively. He is currently a professor in the School of Communications and In-

formation Engineering at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His major research interests focus on wireless and mobile communication networks, radio resource management, and network coding.



**Lisha LUO** obtained her B.S. degree in electronic and information engineering from Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China. She is currently an M.S. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China. Her research interests are wireless and mobile communication networks, radio resource management, and network coding.



**Yu ZHANG** obtained her B.S. degree from the College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecom in 2013. She is currently an M.S. candidate at Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, China. Her research concerns wireless and mobile communication networks.