

## 宽带无线网络中考虑信源编码特性的分层视频多播传输方法

孙文珠 王洪玉 王洁\* 唐震洲  
(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116024)

**摘要:** 该文提出一种适用于宽带无线网络的分层视频多播传输策略。该策略将自适应调制编码(AMC)和分层视频编码相结合, 首先将系统效用函数表示为与用户分布、系统资源及对应的调制编码方式(MCS)相关的函数, 通过分别使用非线性整数规划和快速贪婪搜索两种方法对多播组内及组间分配不同的无线资源, 以期达到最大化系统总效用函数的目的; 然后根据资源分配结果对视频编码结构进行调整, 使得视频编码分层结构与系统资源和用户信道条件相匹配。仿真结果表明, 该策略优化了视频编码分层结构, 充分利用了无线资源, 提高了系统性能。

**关键词:** 视频多播; 自适应调制编码; 分层视频编码

中图分类号: TN919.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2547-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00359

## Layered Video Multicast Considering Source-coding Characteristic in Broadband Wireless Networks

Sun Wen-zhu Wang Hong-yu Wang Jie Tang Zhen-zhou

(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** A layered video multicast scheme for broadband wireless networks is proposed. The multicast scheme works by combining layered video coding with Adaptive Modulation and Coding (AMC). The system utility is formulated into a function of user distribution, system resources, and corresponding Modulation and Coding Schemes (MCS). By allocating different resources inter-and intra-multicast groups through nonlinear integer programming and a fast greedy algorithm respectively, the system utility is maximized. The layered video coding structure is then modified according to resource allocation, so that the layered structure is compatible with available system resources and the channel conditions of different users. Simulation results show that this scheme optimizes the layered structure of video coding, takes full advantage of radio resources, and improves the system performance.

**Key words:** Video multicast; Adaptive Modulation and Coding (AMC); Layered video coding

### 1 引言

随着移动终端通信和处理能力的飞速发展, 无线终端用户对实时视频服务的需求日益增加。宽带无线网络的发展能够为移动用户提供越来越高的传输速率, 为实时无线视频服务如 IPTV(Internet Protocol TeleVision)、移动电视和无线视频直播等提供了实现平台。相对于单播传输, 无线视频广播、多播能够更加有效地利用带宽资源, 但同时也需要对无线资源进行更为灵活的分配。

针对多载波宽带无线网络中单播传输资源分配问题的研究已经较为成熟, 文献[1]对多载波中继系统中资源分配进行了研究。文献[2]对多载波宽带无

线网络中跨层资源分配算法进行了研究。针对多播传输的资源分配问题, 文献[3]对用户之间子载波分配和子载波之间功率分配问题进行了深入研究。文献[4]在资源分配过程中考虑了信源编码特性, 提出了一种利用信源编码特性的信源编码多播方案, 将多描述编码应用到多载波宽带无线网络多播传输中以提高系统性能。分层视频编码与自适应调制编码(Adaptive Modulation and Coding, AMC)相结合的方案是另一种多载波宽带无线网络中考虑信源编码特性的多播传输的有效方案。针对这方面的研究主要有文献[5-8]。文献[5]将机会传输与分层编码和自适应调制编码相结合, 提出一种适用于Wimax(802.16)宽带无线网络的多播传输方案。文献[6]将分层编码和自适应调制编码相结合, 通过为每一个视频编码层分配不同的调制编码方式(Modulation and Coding Schemes, MCS), 来优化Wimax网络中视频多播传输的资源分配, 从而提高

2013-03-21 收到, 2013-07-02 改回

国家自然科学基金(61172058), 高等学校博士学科点专项科研基金(20120041110011)和中央高校基本科研业务费专项资金(DUT13JS09)资助课题

\*通信作者: 王洁 wangjie@dlut.edu.cn

系统性能, 并给出了用贪婪算法求解次优资源分配的方法。文献[7]给出一种基于效用函数包络的资源分配方法。文献[8]给出通过动态优化算法来求解文献[6]中资源分配问题的方法, 该方法能够得出资源分配问题的最优解。

文献[5-8]中视频多播方案, 均是在假设视频编码分层结构固定的情况下, 通过调节视频码流中每一层的调制编码方式, 来优化系统性能。但是上述文献均未考虑视频编码分层结构(分层数目和每一层的编码码率)对系统性能的影响。如果视频编码每一层编码码率与传输该层调制编码方式对应的传输速率不匹配, 以层为单位进行自适应调制编码会在一定程度上造成资源的浪费, 从而影响系统的性能。此外, 视频编码分层结构不同, 会对视频编码的编码效率和编码复杂度产生影响。

针对上述问题, 本文充分考虑了视频编码分层结构对系统性能的影响, 通过寻找与用户信道条件、调制编码方式以及系统中可用资源相匹配的视频编码分层结构来最优化系统的性能。将系统总效用表示成与用户分布、系统可用资源及对应的调制编码方式相关的函数。首先, 通过非线性整数规划和贪婪搜索两种方法来对多播组组内和组间进行最优资源分配, 以最大化系统中所有用户效用之和; 然后, 根据最优资源分配结果来确定视频编码的分层结构。仿真结果表明, 本文方法能够优化视频编码分层结构, 能以较少的分层数目最大化系统的性能, 同时使得每一层的编码码率与系统中调制编码方式对应的传输速率相匹配, 充分利用了系统资源, 从而提高了系统性能。

本文结构安排如下: 第 2 节简单介绍相关背景; 第 3 节对相关工作进行介绍和分析; 第 4 节在对现有方案分析基础之上, 对本文方法进行详细描述; 第 5 节给出相应的优化算法; 第 6 节给出仿真结果并对算法复杂度进行分析; 第 7 节对论文进行总结。

## 2 分层视频编码与自适应调制编码

### 2.1 分层视频编码

分层视频编码或称为可伸缩视频编码(Scalable Video Coding, SVC), 可以将视频信号编码成一个基本层和多个增强层。视频编码端只进行 1 次编码, 解码端可以以不同分辨率、帧率或者质量进行解码。基本层能确保基本分辨率、帧率和质量的视频解码, 增强层可以逐步增加视频分辨率、帧率和质量。基本层是视频解码必须的, 增强层必须在基本层正确解码的基础上才能解码。

### 2.2 多载波宽带无线网络中的自适应调制编码技术

下一代移动通信系统如 LTE, Wimax 等都是基

于正交频分多址(OFDMA)技术的多载波宽带无线系统。本文以 Wimax 为例对基于 OFDMA 技术的多载波宽带无线网络中自适应调制编码技术进行简单说明。Wimax 中下行链路采用 OFDMA 和自适应调制编码技术。这使得 Wimax 网络中资源分配和调度非常灵活, 能很好地支持多播和广播服务。Wimax 中以调度帧(Scheduling Frame, SF)为单位进行无线资源的调度和分配, 每一个 SF 在时域上被划分为多个时隙, 频域上划分为多个子信道。资源分配的最小单元 tile 由不同时隙和不同频域子信道组合而成。终端用户能够通过上行链路向基站反馈其信道条件, 基站可以根据每个用户的信道条件, 灵活地将不同 tile 分配给不同用户, 同时为不同 tile 分配不同的调制编码方式。此外, Wimax 支持自适应功率分配。本文只考虑基站发射功率恒定的情况。

## 3 相关工作

设系统中可用 tile 数目为  $T$ , 同时进行  $S$  路视频广播, 每一路视频占用的 tile 数目为  $T_s$ , ( $s=1, 2, \dots, S$ ), 则  $T = \sum_{s=1}^S T_s$ 。接入每一路视频广播的用户数量为  $N_s$  ( $s=1, 2, \dots, S$ ), 总用户数目为  $N = \sum_{s=1}^S N_s$ 。可选调制编码方式级别为  $M$ , 对应的传输速率为  $r(m)$ , ( $1 \leq m \leq M$ )。调制编码级别越高, 对应的传输速率越高, 即  $r(1) < r(2) < \dots < r(M)$ 。信道条件越好的用户, 能接收到的调制编码方式级别越高, 反之亦然。根据用户信道条件不同, 按照能接收到的最高调制编码级别, 将接入每路视频的用户分成  $M$  个分组。用  $N_{s,m}$  ( $m=1, 2, \dots, M$ ) 表示接入第  $s$  路视频的用户中能接收到调制编码级别最高为  $m$  的用户数目, 则  $\sum_{m=1}^M N_{s,m} = N_s$ 。分组  $N_{s,m}$  中用户接收码率为  $R_{s,m}$ , 用户效用函数  $U_{s,m}(R_{s,m})$  为接收码率的函数, 该路视频中所有用户效用之和为

$$U_s = \sum_{m=1}^M N_{s,m} \times U_{s,m}(R_{s,m}) \quad (1)$$

系统总效用表示为所有用户效用之和:

$$U_{\text{total}} = \sum_{s=1}^S U_s \quad (2)$$

系统设计目标是在系统资源一定的前提下, 通过调整发送端的传输策略, 最大化系统总效用为

$$\max(U_{\text{total}}), \sum_{s=1}^S T_s \leq T \quad (3)$$

文献[6]和文献[8]将分层视频编码和自适应调制编码相结合, 通过为不同的视频编码层分配不同的调制编码级别, 使信道条件好的用户能接收到更多的视频编码层, 信道条件差的用户能接收到较少的

视频编码层, 使得系统总效用达到最大值。

设每一路视频编码为  $L$  层, 包括 1 个基本层和  $L-1$  个增强层。第  $s$  路视频中第  $l$  层的编码码率为  $\lambda_{s,l}$ 。设为该层分配的调制编码级别为  $MC_{s,l}$ , 传输该层需要的 tile 数目为  $\lceil \lambda_{s,l}/r(MC_{s,l}) \rceil$ 。设第  $s$  路视频中共有  $L(s)$  层被传输, 则该路视频占用总 tile 数目为

$$T_s = \sum_{l=1}^{L(s)} \lceil \lambda_{s,l}/r(MC_{s,l}) \rceil \quad (4)$$

该路视频中第  $N_{s,m}$  个分组中, 用户的接收码率为

$$R_{s,m} = \sum_{l: MC_{s,l} \leq m} \lambda_{s,l} \quad (5)$$

改变每一路视频中每一视频编码层的调制编码级别  $MC_{s,l}$ , 会引起用户接收码率的变化, 从而会引起用户效用的变化。在总 tile 数目一定的前提下, 通过调节每一路视频中每一个视频编码层的调制编码级别可以找到式(3)的最大值。文献[6]用贪婪方法找出式(3)的次优解, 文献[8]给出了通过动态优化算法找出式(3)最优解的方法。文献[6, 8]中的方法在最优化的过程中均假设视频编码分层结构固定不变, 未考虑分层结构不同对系统性能的影响。另外文献[6, 8]中资源分配方法容易引起资源浪费, 如果分层结构中每一层编码码率分配不当, 容易造成资源浪费。如假设视频编码每一层编码码率固定为 32 kbps, 该层分配到的调制编码方式对应的传输速率为 21.6 kbps, 则该层占用的 tile 数目为  $\lceil 32/21.6 \rceil = 2$ , 但此时两个单位 tile 传输速率可以达到 43.2 kbps, 因此文献[6, 8]中方法会在一定程度上造成资源的浪费。

#### 4 本文方法

本文根据系统中可选调制编码级别和用户分布情况来调节视频编码的分层参数, 以尽量少的分层数目来最优化系统性能; 根据系统中不同调制编码方式对应的传输速率来确定每一层的编码码率, 使视频编码每一层的编码码率与对应调制编码方式的传输速率相匹配, 充分利用了系统资源, 从而提高了系统的性能。

与上文相同, 设系统中总 tile 数目为  $T$ 。第  $s$  路视频中, 采用调制编码级别为  $m$  的 tile 数目为  $t_{s,m}$ , ( $s = 1, 2, \dots, S; m = 1, 2, \dots, M$ ), 则该路视频所占用的总 tile 数目为

$$T_s = \sum_{m=1}^M t_{s,m} \quad (6)$$

该路视频分组  $N_{s,m}$  中用户的接收码率为

$$R_{s,m} = \sum_{i=1}^m t_{s,i} \times r(i) \quad (7)$$

系统目标函数同式(3)。如式(7)所示, 用户的接收码率  $R_{s,m}$  是  $t_{s,m}$  的函数。用户的效用函数  $U_{s,m}$  为接收码率  $R_{s,m}$  的函数, 由式(1)和式(2)可以看出, 系统目标函数式(3)是  $t_{s,m}$  的函数。此外, 式(3)中限制条件  $\sum_{s=1}^S T_s \leq T$  也是  $t_{s,m}$  的函数。通过合理调节  $t_{s,m}$ , 即为每一路视频中不同的调制编码级别分配不同的 tile 数目, 可以使得系统总效用达到最大值。因为系统中共有  $S$  视频广播, 每路视频广播有  $M$  种可选的调节编码方式, 因此系统中对应的  $t_{s,m}$  共有  $S \times M$  个。设矩阵  $\mathbf{H}$  为  $S \times M$  维矩阵, 用该矩阵元素  $h(s, m)$  表示第  $s$  路视频中第  $m$  级调制编码方式占用的 tile 数目, 即  $t_{s,m}$ 。则系统性能可以表示为矩阵  $\mathbf{H}$  的函数, 记为  $U_{\text{total}}(\mathbf{H})$ 。

设使得式(3)取最大值的  $\mathbf{H}$  用  $\mathbf{H}^*$  表示, 对应元素  $h^*(s, m)$  的值为  $t_{s,m}^*$ , 则视频编码的分层数目和每一层的编码码率可以通过  $\mathbf{H}^*$  中元素求出。定义  $S \times M$  维标识矩阵为

$$\mathbf{IM}(s, m) = \begin{cases} 1, & h^*(s, m) \neq 0 \\ 0, & h^*(s, m) = 0 \end{cases}, \quad 1 \leq s \leq S, 1 \leq m \leq M \quad (8)$$

将每路视频中采用相同调制编码级别的 tile 所传输数据视为视频编码的一层, 则该路视频中视频编码分层数目为

$$L_s = \sum_{m=1}^M \mathbf{IM}(s, m) \quad (9)$$

该路视频中第  $l$  层编码码率用  $\gamma_{s,l}$  表示, 则  $\gamma_{s,l}$  为

$$\gamma_{s,l} = t_{s,lm}^* \times r(lm) \quad (10)$$

其中  $l$  和  $lm$  满足  $l = \sum_{m=1}^{lm} \mathbf{IM}(s, m)$ 。通过式(10)得出每一层的编码码率是传输该层所用调制编码级别对应传输速率的整数倍, 因此有效减少由于分层编码码率与传输速率不匹配带来的资源浪费。

#### 5 最优分层参数的求解

本节给出两种求解上述问题的有效方法。第 1 种为整数规划方法, 通过该方法得出的解接近上述问题的最优解, 但是整数规划方法复杂度较高。第 2 种方法为贪婪搜索法, 该方法大大降低了算法的复杂度, 同时对系统性能影响很小, 能够达到较好的算法性能与复杂度的折中。

## 5.1 整数规划法

为便于清晰表达, 将目标函数重写为

$$\left. \begin{aligned} & \max \left( \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M N_{s,m} \times U_{s,m} \left( \sum_{i=1}^m h(s,i) \times r(i) \right) \right) \\ & \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M h(s,m) \leq T, h(s,m) \geq 0, \\ & (1 \leq s \leq S, \\ & 1 \leq m \leq M) \text{且为整数} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由于矩阵  $\mathbf{H}$  中元素是系统中最小分配单元 tile 的数目, 所以需要加上该值为整数的限制条件。求解式(11)最大值是一个非线性整数规划问题, 可以通过文献[9]中非线性规划方法来进行。

首先去掉整数约束, 通过定义惩罚函数将问题转化为无约束优化问题, 如式(12)所示:

$$\max F(\mathbf{H}, \sigma) = U_{\text{total}}(\mathbf{H}) - \sigma \times P(\mathbf{H}) \quad (12)$$

其中  $P(\mathbf{H}) = \left[ \max \left( 0, \sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M h(s,m) - T \right) \right]^2$ ,  $\sigma$  设定为一很大的正数。然后通过迭代搜索法来求解式(12)最优解。

算法步骤如下:

(1) 初始惩罚因子  $\sigma^1$ , 放大系数  $c > 1$ , 允许误差  $e > 0$ , 令  $k = 1$ ;

(2) 求解式(12)极大值点, 设为  $\mathbf{H}^k$ ;

(3) 当  $\sigma^k \times P(\mathbf{H}) < e$  时, 停止迭代,  $\mathbf{H}^k$  为所求近似最优解  $\mathbf{H}^*$ 。否则令  $k = k + 1, \sigma^k = c \times \sigma^{k-1}$ , 返回(2)执行。

第(2)步中, 对式(12)非约束优化问题可以通过解析法或者数值法<sup>[9]</sup>来求解。上述步骤得出的解通常不是整数解, 通过分支定界法来求得对应的整数解。在得出  $\mathbf{H}^*$  之后, 通过式(9)和式(10)求出最优分层数目和每一层的编码码率。

## 5.2 贪婪搜索法

虽然通过上述方法得出的解, 接近最优解。但是由于受到初值、精度和惩罚项的影响, 算法复杂度较高且难以确定。本小节通过贪婪搜索算法来求解式(11), 降低运算复杂度。

算法步骤如下:

(1) 初始化矩阵  $\mathbf{H}$ , 令  $h(s,m) = 0, (1 \leq s \leq S, 1 \leq m \leq M)$ , 搜索步长  $\Delta t$  为不小于 1 的整数;

(2) 找出满足式(13)的  $s$  和  $m$  的值, 用  $s^*$  和  $m^*$  表示。

$(s^*, m^*)$

$$= \arg \max_{\substack{1 \leq s \leq S \\ 1 \leq m \leq M}} \left( \frac{U_{\text{total}}(h(s,m) + \Delta t) - U_{\text{total}}(h(s,m))}{\Delta t} \right) \quad (13)$$

(3) 令  $h(s^*, m^*) = h(s^*, m^*) + \Delta t$ , 如果

$$\sum_{s=1}^S \sum_{m=1}^M h(s,m) > T, h(s^*, m^*) = h(s^*, m^*) - \Delta t$$

进行第(4)步, 否则跳转到第(2)步;

(4) 第(3)步得出的矩阵  $\mathbf{H}$  中对应元素值即为满足式(11)的值。根据式(9)和式(10)计算出每一路视频分层数目和每一层的编码码率。

## 6 实验结果与分析

为了验证本文方法的有效性, 本文分别在单路广播和多路广播两种情况下, 对本文方法与文献[6]和文献[8]中方法进行仿真比较。两种情况下, 分别对系统总效用和用户平均接收码率两个指标进行比较。文献[6]和文献[8]中对不同算法进行仿真比较时, 定义用户的效用函数为用户接收码率的对数函数, 即  $U(R_{s,m}) = \lg(1 + R_{s,m})$ , 定义系统的总效用为所有用户的效用之和。文献[6]和文献[8]在定义效用函数时, 并没有给出具体的单位。本文在进行仿真比较时, 为了与文献[6]和文献[8]保持一致, 采用相同的效用函数。需要说明的是, 效用函数可以表示为接收码率的任意非负非减函数, 如视频解码峰值信噪比(PSNR)等, 效用函数的单位根据不同效用函数的定义也有所不同。

### 6.1 实验设定

本文采用与文献[8]相同的仿真环境来进行仿真。仿真基于标准文档<sup>[10]</sup>, 条件简单介绍如下, 设 200 个用户在距离基站 500~1000 m 的环形范围内随机分布。载波频率 3.5 GHz, 频带宽度 10 MHz。发射功率 46 dBW, 天线增益 17 dB, 噪声系数为 5 dB。与文献[6]和文献[8]相同, 仿真中所采用信道模型只考虑路径传播损耗, 没有考虑信道衰落的影响。设路径损耗模型为  $PL(\text{dB}) = 35.2 + 25 \lg(d)$ ,  $d$  为传输距离。如文献[6]和文献[8]所述, 信道衰落对系统性能的影响可以通过改变信道模型反映出来。设每一个 SF 中, 基站可以通过上行信道获得每个用户的接收信噪比, 通过接收信噪比计算出每个用户能够正确接收的最大调制编码级别。与文献[6]和文献[8]相同, 本文方法考虑在一个 SF 内进行资源分配, 假设在一个 SF 之内各个用户信道条件保持不变。仿真过程中采用 IEEE802.16 标准中 6 种调制编码方式, 如表 1 所示。同时表 1 给出了上述仿真条件下, 不同调制编码方式对应的传输速率。

表 1 MCS 对应的传输速率和接收用户的比例

$m$	调制方式	编码码率	$r(m)$ kbps
1	QPSK	1/2	4.8
2	QPSK	3/4	7.2
3	16QAM	1/2	9.6
4	16QAM	3/4	14.4
5	64QAM	1/2	19.2
6	64QAM	3/4	21.6

文献[6]和文献[8]中的资源分配方法是针对固定分层结构设计的, 没有考虑不同分层编码结构对系统性能的影响。针对文献[6]和文献[8]的仿真, 采用两种固定分层编码结构, 以体现出不同分层编码结构对系统性能的影响。两种分层结构分层数目均为 10 层, 第 1 种分层结构中每层编码码率为 32 kbps, 第 2 种分层结构中每层编码码率为 96 kbps。针对本文方法的仿真, 不固定分层编码结构, 通过文中第 5 节整数规划和贪婪搜索两种方法来优化系统性能。

### 6.2 系统性能比较

(1)单路视频广播 单路视频广播情况下, 200 个用户都接入这 1 路视频。设用户分布为随机分布, 进行 500 次仿真, 对仿真结果取平均。图 1 和图 2 分别给出了在 tile 数目为 0~30 时系统总效用和用户平均接收码率的性能曲线。图中曲线“整数规划”和“贪婪搜索”分别代表本文中两种资源分配算法对应的结果。文献[6]限制所有用户至少能收到基本层, 因此文献[6]中基本层使用最低级别的调制编码方式。设基本层占用 tile 数目为  $T_0$ , 两种分层结构下基本层编码码率分别为 32 kbps 和 96 kbps(图中分别用 32, 96 表示), 对应的  $T_0$  分别为 7 和 20。与文献[6]和文献[8]相比, 第 1 种分层结构下  $T \geq 7$  时, 本文方法用户平均效用分别最大提高了 0.39 和 0.30, 用户平均接收码率分别最大提高了 42.3 kbps

和 31.3 kbps; 第 2 种分层结构下  $T \geq 20$  时, 本文方法用户平均效用分别最大提高了 0.31 和 0.28, 用户平均接收码率最大提高了 42.6 kbps 和 32.8 kbps。 $T < T_0$  时, 文献[6]中方法在两种分层结构下用户平均效用与用户平均接收码率均为 0。文献[8]相比, 第 1 种分层结构下  $T < 7$  时, 本文方法用户平均效用最大提高了 1.91, 用户平均接收码率最大提高了 9.6 kbps; 第 2 种分层结构下  $T < 20$  时, 本文方法用户平均效用最大提高了 3.21, 用户平均接收码率最大提高了 21.7 kbps。

(2)多路视频广播 在多路视频同时广播的情况下, 文献[6]和文献[8]均假定每一路视频广播用户效用函数完全相同。为了区分不同的视频流, 本文对效用函数稍作修改, 设第  $s$  路视频的效用函数为  $\lg(1 + R \times \mu(s))$ , 不同视频流  $\mu(s)$  不同。在仿真过程中, 定义  $\mu(s) = 1 + (s - 1) \times 0.1, s = 1 < s < S$ 。假设系统中同时广播 6 路实时视频信号, 每个用户随机接入 1 路视频。由于存在随机性, 进行 500 次仿真, 对仿真结果取均值。

图 3 和图 4 分别给出了在 tile 数目为 0~200 的情况下, 本文方法与文献[6]和文献[8]中方法系统总效用与用户平均接收码率的比较。两种分层结构对应的  $T_0$  分别为 42 和 120。 $T > T_0$  时, 与文献[6]和文献[8]相比, 第 1 种分层结构下, 本文方法用户平均效用分别最大提高了 0.52 和 0.19, 用户平均接收码率分别最大提高了 56.1 kbps 和 33.6 kbps; 第 2 种分层结构下, 本文方法用户平均效用分别最大提高了 0.30 和 0.13, 用户平均接收码率分别最大提高了 45.9 kbps 和 15.1 kbps。 $T < T_0$  时, 与文献[8]相比, 第 1 种分层结构下, 本文方法用户平均效用最大提高了 1.01, 用户平均接收码率最大提高了 7.8 kbps; 第 2 种分层结构下, 本文方法用户平均效用最大提高了 1.70, 用户平均接收码率最大提高了 13.8 kbps。

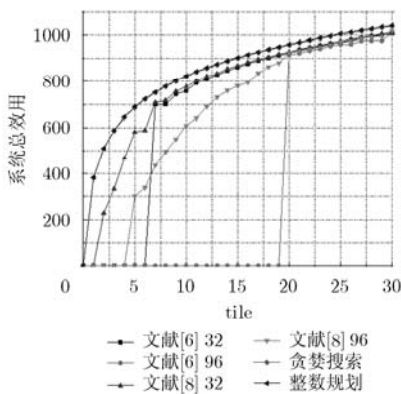


图 1 不同 tile 数目下单路广播用户总效用

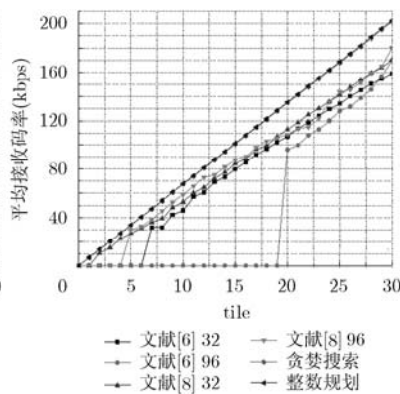


图 2 不同 tile 数目下单路广播用户平均接收码率

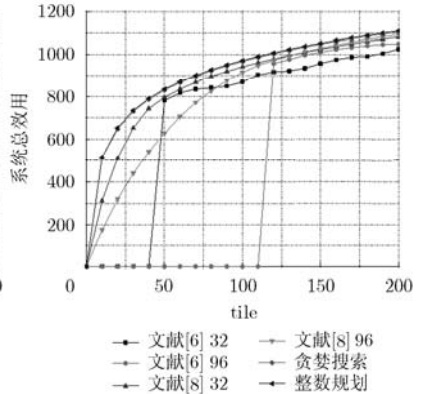


图 3 不同 tile 数目下多路广播用户总效用

通过以上实验结果可以看出本文方法在单路和多路广播中性能均优于文献[6]和文献[8]中的方法。在单路和多路视频广播的情况下,本文中整数规划和贪婪搜索两种优化算法的结果基本一致。

图 5 给出了多路视频广播情况下,用户效用的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)曲线。对文献[6]和文献[8]在第 2 种分层结构下进行仿真。从图中可以看出,与文献[6]相比,文献[8]通过降低部分信道条件差的用户的效用,来提高部分信道条件好的用户的效用,使得系统总效用得到提高。而本文方法中所有用户效用基本均优于文献[6]和文献[8]。

(3)分层结构说明 文献[6, 8]中的方法是在给定分层结构的前提下优化系统的性能,没有考虑分层结构变化对系统性能的影响。通过图 1-图 4 可以看出,分层结构改变时,通过文献[6, 8]中方法得出的用户平均效用和用户的平均接收码率差别较大。本文方法在优化系统性能的过程中去掉了固定分层结构的限制,通过文中第 4 节和第 5 节的方法来最优化系统资源分配。根据得出的资源分配结果,通过式(9)和式(10)来调整该分配方案对应的分层结构,这样得出的分层结构与用户分布以及系统可用资源相适应,从而提高了系统性能。

### 6.3 复杂度分析

虽然本文中整数规划方法能近似得出最优解,但是由于受到初值、精度和惩罚项的影响,这种算法复杂度较高且难以确定,故整数规划方法在实际应用中存在一定难度。因此本部分只将本文贪婪算法复杂度与文献[6]和文献[8]中算法复杂度进行比较。系统中共有  $S$  路视频广播,  $M$  种可选的调制编码方式,视频编码层数为  $L$ ,可分配的 tile 总数目为  $T$ ,用户总数为  $N$ 。表 2 为文献[6],文献[8]和本文贪婪算法的复杂度比较。

表 2 不同算法复杂度比较

算法	复杂度
文献[8]中算法	$O(LN + SM^2LT + ST^2)$
文献[6]中算法	$O(SML)$
本文贪婪算法	$O(SMT)$

由表 2 可以看出,文献[8]中动态优化算法复杂度远大于文献[6]和本文贪婪算法复杂度。本文贪婪算法复杂度与搜索步长有关,当搜索步长取最小值,  $\Delta t = 1$  时,其复杂度为  $O(SMT)$ ,与文献[6]中算法复杂度相当。另外,通过增加搜索步长,可以进一步降低本文贪婪算法的复杂度。结合上文仿真结果,本文贪婪算法在几乎不影响系统性能的前提下,有效降低了算法复杂度,可用于实际系统中。

另外,在实际应用中本文方法需要与高效的码率控制算法相结合,以便对视频编码码率进行快速有效的调整。码率控制一直以来是视频编码领域一个研究重点,可以通过多种快速有效的算法实现<sup>[11]</sup>,所以本文不对码率控制算法进行特别研究。针对最新的视频编码标准 H.264/AVC 及其可伸缩扩展部分 H.264/SVC,近年来许多文献给出了高效的码率控制算法,如文献[12],文献[13]等。此外,SVC 编码后的码流中存在多个码流提取点,实际传输中可以通过码流提取对 SVC 码流进行重新组织,以此来获得满足实际需求的分层码流。文献[14, 15]中给出了两种码流提取方法,这两种方法在充分考虑码流率失真特性的同时,能够快速有效地提取所需码流。综上,视频编码速率的调整可以通过多种高效的方式实现,因此在实际应用中不会给系统处理带来很大压力,不会影响本文方法在实际中的应用。

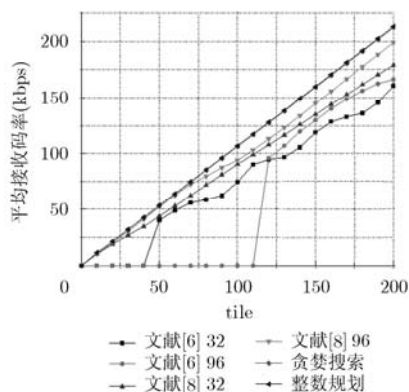


图 4 不同 tile 数目下多路广播用户平均接收码率

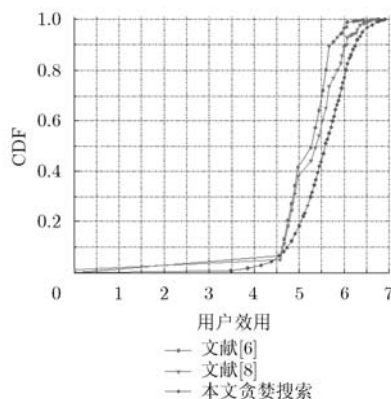


图 5 用户效用累积分布

## 7 结束语

本文提出了一种适用于宽带无线网络的视频多播传输方法。该方法将分层视频编码和自适应调制编码相结合, 通过多播组内和组间进行最优资源分配来优化系统总效用; 然后根据资源分配结果来调整分层编码的参数, 使得分层编码结构与用户分布、系统资源及其对应的调制编码方式相匹配。实验结果表明, 该方法优化了分层编码的结构, 充分利用了无线资源, 提高了系统的性能。本文两种资源分配算法中, 贪婪算法在系统性能和计算复杂度之间获得了一个良好的折中, 适合应用在实际系统中。

## 参 考 文 献

- [1] 余官定, 张朝阳, 陈雁, 等. OFDM 中继系统的中继子载波对选择和功率分配[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(2): 265-268.  
Yu G D, Zhang C Y, Chen Y, *et al.* Subcarrier pair selection and power allocation in OFDM relaying system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(2): 265-268.
- [2] Zhu H L. Radio resource allocation for OFDMA systems in high speed environments[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(4): 748-759.
- [3] Liu J, Chen W, Cao Z G, *et al.* Dynamic power and sub-carrier allocation for OFDMA-based wireless multicast systems[C]. The 2008 IEEE International Conference on Communications, New York, 2008: 2607-2611.
- [4] 许文俊, 贺志强, 牛凯, 等. OFDM 系统中考虑信源编码特性的多播资源分配方案[J]. 通信学报, 2010, 31(8): 66-74.  
Xu W J, He Z Q, Niu K, *et al.* Multicast resource allocation scheme considering source-coding characteristic in OFDM systems[J]. *Journal on Communications*, 2010, 31(8): 66-74.
- [5] Huang C W, Huang S M, Wu P H, *et al.* OLM: opportunistic layered multicasting for scalable IPTV over mobile WiMAX [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(3): 453-463.
- [6] Deb S, Jaiswal S, and Nagaraj K. Real-time video multicast in WiMAX networks[C]. The IEEE International Conference on Communications, Phoenix, 2008: 1579-1587.
- [7] Kuo W H, Liao W, and Liu T. Adaptive resource allocation for layer-encoded IPTV multicasting in IEEE 802.16 WiMAX wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2011, 13(1): 116-124.
- [8] Li P L, Zhang H H, Zhang B H, *et al.* Scalable video multicast with adaptive modulation and coding in broadband wireless data systems[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(1): 57-68.
- [9] Avriel M. *Nonlinear Programming: Analysis and Methods* [M]. Mineola, NY: Dover Publications, 2003: 372-415.
- [10] IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group. IEEE 802.16 m Evaluation Methodology Document (EMD) [S]. 2008.
- [11] Chen Z Z and Ngan K N. Recent advances in rate control for video coding[J]. *Signal Processing-Image Communication*, 2007, 22(1): 19-38.
- [12] Chen Z F and Wu D P. Rate-distortion optimized cross-layer rate control in wireless video communication[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2012, 22(3): 352-365.
- [13] Hu H M, Li B, Lin W, *et al.* A rate-control algorithm using inter-layer information for H.264/SVC for low-delay applications[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2011, 22(6): 504-515.
- [14] Maani E and Katsaggelos A K. Optimized bit extraction using distortion modeling in the scalable extension of H.264/AVC[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2009, 18(9): 2022-2029.
- [15] 卢冀, 肖嵩, 吴成柯. 一种面向视频传输的 SVC 码流排序方法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(3): 537-542.  
Lu J, Xiao S, and Wu C K. A sorting approach of SVC streaming for video transmission[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(3): 537-542.

孙文珠: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为信源信道联合编码、多媒体信通信。

王洪玉: 男, 1968 年生, 博士生导师, 研究方向为信源信道联合编码、多媒体通信、无线传感器网络、移动自组织网络。

王 洁: 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 研究方向为无线传感器网络、RFID、移动自组织网络、视频信号处理。

唐震洲: 男, 1978 年生, 博士生, 副教授, 研究方向为多媒体通信、无线传感器网络、协作通信。