

多跳无线局域网视频质量优化的路由与源码率控制

李 昕,张宏科

(北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044)

摘 要: 使用以视频质量为中心的跨层设计思想,把应用层视频质量建模为网络层行为的函数,将用于视频传输的多跳无线局域网的结点带宽分配问题归结为整个网络范围内的流传输路径选择和码率控制问题,带宽调度优化的目标是使接收端总解码视频质量最佳,给出一个基于遗传算法的启发式方案以求解该优化问题并证明了算法的有效性.

关键词: 多跳无线局域网; 流媒体传输; 路由算法; 速率控制; 启发式算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 2A-160-05

Multi-hop WLAN Video Distortion Optimized Routing and Source Rate Control

LI Xin, ZHANG Hong-ke

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Model the end-to-end distortion based video quality as a function of network layer packet loss and delay, and formulate a network-wide optimal routing and rate allocation problem that minimizes the total video distortion. A genetic algorithm based heuristic solution is proposed to solve this optimization problem. The evaluation results show that the proposed solution is efficient and robust enough to adapt the video requirements dynamics.

Key words: multihop WLAN; video streaming; routing algorithm; rate allocation; heuristic algorithm

1 引言

由于无线多跳网络具有灵活、易部署的特点,在监控、战场、救援等场景下得到广泛的应用.随着实时视频压缩编码与无线传输技术的不断进步,人们已经不满足仅仅在无线多跳链路上支持简单数据通信,还希望其能够支持内容丰富的流媒体通信,如传输实时编码的视频数据.由于物理层特性限制,无线链路一般都有较高传输错误率,特别是在多个无线局域网构成多跳传输路径时,结点拥塞,信道干扰以及其它链路层动态特性都会加剧,成为在无线多跳局域网上成功部署视频应用所需要克服的障碍;另一方面,实时视频通信通常都有严格的报文延迟需求,现有无线多跳网络路由由优化机制主要针对丢包、延迟等网络层参数进行优化,无法根据视频传输实际带宽需求的动态变化对传输行为进行及时调整,在无线多跳网络中并发传输多路视频流时,难以保证端到端报文延迟以满足上层应用的需求,从而产生严重视频失真.

无线多跳网络领域中早期主要解决数据通信的路由问题以及如何在动态环境下保证网络连通性,产生了一系列相关的标准协议;在多跳网络上提供服务质量(QoS)保证的研究工作则主要关注于对一个或者多个网络层性能指标进行优化,如:跳数^[1]、链路失效概率^[2]、可用带宽^[3]、网络效用^[4]等.对于用于视频传输的多跳无线网络,这些现有方案都没有提供理想的直接支持.考虑到这种网络的性能主要是用接收端解码视频质量来评估,因此需要一种方法建立网络层行为(选路,传输码率控制,报文延迟与丢失)与应用层性能需求(视频失真)之间的直接映射关系,根据上层视频应用的实际需求来约束网络层行为,在并发多路视频流共享多跳网络传输资源的情况下,使得总体上层视频质量得到优化.

本文使用以视频质量为中心的跨层设计原则,把端到端的视频失真建模为网络层丢包与延迟特性的函数,将多跳无线局域网的带宽使用归结为整个网络范围内多个并发视频流的传输路径选择和源码率控制问题,带宽优化配置的目标是接收端多个视频流总失真最小;提

出一个基于遗传算法的启发式过程对多目标路由优化进行求解;最后对算法性能进行了分析评估。

2 视频质量优化路由与源码率控制

考虑在多跳无线局域网中并发多路视频流的情况:由多个无线结点组成的多跳网络中,结点之间的无线链路传输带宽将被多个视频流会话共享,本文主要研究网络资源优化分配问题:如何决定各个视频流的编码传输码率,以及如何将多跳网络结点之间有限的带宽资源分配到各个视频流上,以使得接收端多个视频流的加权整体质量最佳。下面首先建立这个带宽受限网络环境中资源优化分配问题的数学模型。

2.1 视频质量模型

在实时视频流媒体传输网络中,源结点使用编码器将经过压缩的视频通过网络以一定码率向目的结点传输,目的结点接收这些报文后放到解码播放缓存中,根据视频应用不同的实时性需求,解码器可以容许一定程度的报文传输延迟,通常从几十毫秒至数百毫秒不等,称为播放时限。在无线网络中,由于链路拥塞或链路上随机丢包事件,都可能导致报文在播放时限之前无法到达目的结点的播放缓存,接收端视频解码器对接收到的流数据进行解码播放时会检测到报文丢失;解码器将尝试将这种数据缺失对视频质量造成的负面影响尽量隐藏起来,将失真降低到最小,隐藏的效果是与视频本身特性、编解码参数和解码器的具体实现相关的,如高动态性视频的失真就比静止图像视频更难以隐藏。采用均方误差(Mean Squared Error; MSE)可以对视频失真进行定量描述;本文采用更为通用的由 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio: 峰值信噪比,单位: dB)度量的视频失真作为单个视频的质量评估指标, PSNR 与 MSE 满足以下关系:

$$PSNR = 10 \log_{10}(255^2 / MSE) \quad (1)$$

在接收端解码器上的视频失真由三个部分组成:

$$D_{dec} = D_{enc} + D_{loss} + D_{cgn} \quad (2)$$

其中 D_{enc} 表示由源端编码器在对原始视频内容进行压缩编码过程中产生的失真, Stuhlmüller^[5] 给出一个简单的视频码率失真经验模型公式,通过曲线参数拟合方法对公式中的参数进行估计可以得到特定视频序列的码率失真关系:

$$D_{enc} = D_0 + \frac{\omega}{R_{enc} - R_0} \quad (3)$$

式(3)表明编码失真 D_{enc} 是编码码率 R_{enc} 的递减的凸函数,其中 D_0 、 ω 和 R_0 都是模型参数。通过记录不同码率下的视频失真,可以从视频的码率失真曲线对模型参数进行估计。对于不同的视频序列,不同编码设置(帧率、GOP 长度、是否有 B 帧)都会对上述参数产生影响。

图 1 显示了 2 个 QCIF 视频序列:Foreman 和 Mother and Daughter 用 H.264 编码器编码后的码率与视频质量平衡曲线进行参数拟合后的结果,编码器使用的参数为: GOP 为 15, 帧率为 30 帧/秒。

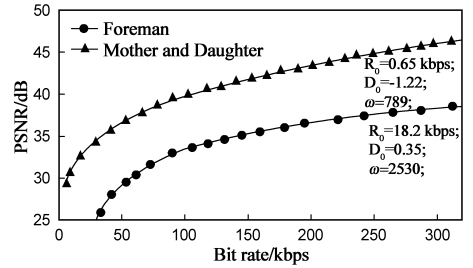


图1 视频的码率失真采集绘制的平衡曲线

式(2)的第二部分为丢包失真,表示由于无线链路的随机报文丢失而导致的失真,注意:这里无线链路是由多跳无线链路构成的端到端(End-to-End; E2E)链路:

$$D_{loss} = k \cdot Loss^{e2e} \quad (4)$$

其中 $Loss^{e2e}$ 为端到端的报文丢失概率, k 为解码视频质量对于报文缺失的敏感因子,它是依赖于视频内容和编码方式的参数;式(2)的第三部分 D_{cgn} 为拥塞失真,表示由于网络拥塞而使链路传输延迟增大,报文到达解码器的延迟超过了播放时限而导致的视频失真:

$$D_{cgn} = k \cdot (1 - Loss^{e2e}) \cdot Prob(Delay^{e2e} > T) \quad (5)$$

通过组合式(1)、(2)、(3)、(4)和(5),就可以将用失真度量的接收端视频质量表示为网络层性能指标(端到端链路丢包率 $Loss^{e2e}$ 和延迟 $Delay^{e2e}$)的函数。

本文研究无线多跳网络中并发传输多路视频的情况,以集合表示并发的多路视频: $v \in V$, 为单个视频 v 赋予一个优先级权值 ρ_v , 使全部视频会话的加权质量最佳的资源分配优化问题,优化目标函数可表示为:

$$D = \sum_{v \in V} \rho_v D_v^{dec} \quad (6)$$

2.2 网络模型

把由多个无线结点组成的多跳无线局域网建模为一个直通图 $G(N, L)$, N 是顶点的集合,表示无线节点, L 是边的集合,用来表示节点之间的无线链路。

将结点 i 与 j 之间的无线链路记为 $\{i, j\}$, 通过无线链路信息估计算法和工具,对 WLAN 结点间三个基本链路特性进行实时的跟踪测量: A_{ij} 表示无线链路的可用带宽; $Loss_{ij}$ 表示无线链路上的平均报文丢失概率, $Delay_{ij}$ 表示链路上的平均报文延迟。

视视频流 v 从源结点 s_v 到目的结点 d_v 的传输路径为 P_v , 可以认为 P_v 上经过的各跳无线链路上的随机丢包事件是相互独立的,那么对于视频流 v 的端到端报文丢失概率可以表示为:

$$Loss_v^{e2e} = 1 - \prod_{i, j \in P_v} (1 - Loss_{ij}), \forall v \in V \quad (7)$$

同样,视频 v 的端到端的报文延迟是其传输路径 P_v 上全部链路的延迟之和:

$$Delay_v^{e2e} = \sum_{\{i,j\} \in P_v} Delay_{ij}, \forall v \in V \quad (8)$$

设视频流 v 在接收端报文解码缓存的播放时限为 T_v ,端到端传输延迟大于 T_v 的报文将被解码器忽略并导致视频失真.采用大偏差分析方法可以获取对端到端的延迟概率的估计值并提供了一种估计多跳传输延迟的独立随机变量求和问题的准确高效的办法^[6].假定链路延迟满足指数分布,可以得出:对于一个独立同分布的重尾威布尔随机变量序列 $\{X_1, \dots, X_n\}$ 有:

$$Prob \left[\sum_{k=1}^n X_k > x \right] \approx Prob \left[\max_{1 \leq k \leq n} \{X_k\} > x \right] \approx n \cdot Prob \left[X_1 > x \right] \quad (9)$$

根据式(9)可估计出视频 v 因为端到端传输延迟产生的解码报文缺失概率: $Prob(Delay_v^{e2e} > T_v)$.

设视频 v 的编码传输码率为 R_v ,那么当网络中存在多个并发视频传输时,链路 $\{i,j\}$ 上的总流量负载是所有通过那条链路的视频会话平均码率的总共和,减去在到达 $\{i,j\}$ 之前在其上流链路上因为丢包而损失的流量.将端到端传输路径中从源结点至链路 $\{i,j\}$ 的部分用表示,如果链路不在的转发路径上,则令为空集.那么任意一条无线链路上的总码率负载可表示为:

$$B_{ij} = \sum_{v \in V} R_v \cdot \prod_{\{m,n\} \in \bar{P}_v} (1 - Loss_{mn}) \quad (10)$$

$$\bar{P}_v^j = \emptyset; \forall \{i,j\} \notin P_v \quad (11)$$

将链路 $\{i,j\}$ 的占用率表示为:

$$\lambda_{ij} = B_{ij}/A_{ij}, \{i,j\} \in L \quad (12)$$

多个视频的传输路径集合 $\{P_v\}_{v \in V}$ 应该满足各条链路的带宽约束条件,避免链路负载过高而导致拥塞,取:

$$\lambda_{ij} < 0.85, \{i,j\} \in L \quad (13)$$

2.3 优化问题建模

定义优化问题如下:在多跳无线网络 $G(N, L)$ 中并发多个视频传输 $v \in V$; 应该如何选择各路视频流的编码传输码率以及多跳传输路径以使得总视频的加权质量最佳(总失真最小).

为表达视频 v 的多跳传输路径 P_v , 引入一个辅助变量 x :

$$x_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \{i,j\} \in P_v \\ 0, & \{i,j\} \notin P_v \end{cases} \quad (14)$$

可建立优化问题对应的数学模型如下:

minimize:

$$D = \sum_{v \in V} \rho_v D_v^{dec} = \sum_{v \in V} \rho_v \left\{ \begin{array}{l} \left(D_v^0 + \frac{\omega_v}{R_v^{enc} - R_v^0} \right) \\ + k_v \cdot Loss_v^{e2e} \\ + k_v \cdot (1 - Loss_v^{e2e}) \cdot Prob(Delay_v^{e2e} > T_v) \end{array} \right\} \quad (15)$$

$$\text{subject to: } \lambda_{ij} \leq 0.85; \{i,j\} \in L \quad (16)$$

$$R_v \geq R_v^{\min}; v \in V \quad (17)$$

$$\sum_{j: \{i,j\} \in L} x_{ij}^v - \sum_{k: \{k,i\} \in L} x_{ki}^v = \begin{cases} 1, & i = s_v \\ -1, & i = d_v \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$\sum_{j: \{i,j\} \in L} x_{ij}^v \leq 1, i \neq d_v \\ = 0, i = d_v \quad (19)$$

其中不等式(16)代表每条链路的无线带宽约束条件;不等式(17)表示每个视频流的码率大于最低可接收质量对应的码率: R_v^{\min} ;不等式(18)和(19)保证每个视频的传输路径 $\{P_v\}_{v \in V}$ 中不存在环路;最小化目标函数式(15)能够实现多个并发视频序列的加权失真最小,使网络资源得到优化配置使用.两组优化变量:路由矢量的集合 $\{X_v\}_{v \in V}$ 以及视频编码码率的集合 $\{R_v^{enc}\}_{v \in V}$ 构成了可行解空间,求解最优资源配置方案的搜索空间是所有可能的路由路径集合与所有可能的视频码率集合的笛卡尔集;这两组变量的共同作用将影响多跳无线链路网络层的延迟和丢包性能,并最终决定接收端的解码视频失真.

多性能指标的 QoS 路由优化问题是一个 NP 完全问题,而本文表示的优化路由问题以视频失真作为性能指标,其目标函数是一个高度复杂的多变量高阶多项式,因此也是 NP 完全的,下一节将给出一个基于遗传算法的启发式过程来求解该最优路由与视频源码率分配问题,并对算法性能进行分析.

3 启发式算法设计

遗传算法(GA)是一种基于人口理论的启发式算法,在每一次迭代中,都对当前的种群应用特定的遗传操作以产生下一代个体:使用交叉(Crossover)对两个或更多个体进行重新组合以产生新的个体;使用变异(mutation)以实现个体的随机自适应.GA 中的种群进化的驱动力是基于某个适应性指标(即一个目标函数)的优胜劣汰机制.目标函数值低的个体被淘汰;而具有更高适应性值的个体,更有可能被选择作为下一代群体中的个体,通过适者生存,不适者淘汰的自然选择法则,确保随着种群的进化(算法的迭代),种群的整体质量会不断提高.前人的研究工作已经对 GA 算法在求解最优网络传输路径和 QoS 路由问题方面的效率和性能进行了详尽分析,为本文采用 GA 算法求解上一节中定义的复杂应用层多目标优化路由问题提供了有力支撑.首先定义用遗传算法求解上述优化问题所采用的几个关键概念:

个体:即代表问题的一个解决方案,在这里对应于一组视频的传输路径,即每个视频 v 的多跳传输路径:

$P_v; v \in V$.

个体的适应能力:即评价个体质量的指标,这里采用全部视频的总加权视频失真评估个体的适应能力.

基因:即个体的部分特征,本问题中解决方案的部分特性即传输路径的部分特征,对应视频传输的无线多跳路径上的一跳结点.

基因序列:也称为染色体,个体中一个视频的传输路径就是一个染色体,个体有多条染色体对应于多个视频传输路径,每条染色体都由多个基因顺序排列组成.

种群:多个个体的集合,即优化问题的一组可行解决方案;种群中所包含个体的数目称为种群的规模.

种群的存在是遗传算法区别于其它启发式算法的关键之处:因为在每一步迭代都可以产生多个较优的解决方案,而不是仅挑选一个当前最优的个体进入下一轮迭代;这使得遗传算法在求解复杂优化问题时拥有更强适应性,更不容易陷入到局部最优陷阱中.本文提出的基于 GA 的启发式算法执行流程如下:

对于一组给定路径,采用式(15)中定义的全局加权视频失真作为评估个体适应性的指标;算法停止由迭代次数上限和视频质量两个条件共同决定,即:当平均视频质量大于某个阈值或初始种群繁殖代数超过某个最大值时,停止继续迭代,以便将算法时间复杂度限制在可接受的范围内.

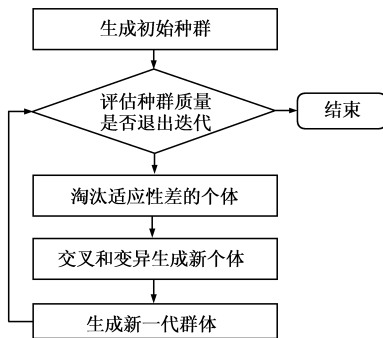


图2 遗传算法流程

以图 3 所示的网络拓扑来示例说明算法执行的具体过程.设此多跳无线局域网中并发 4 路视频流,视频传输的源节点和目的节点分别为:

$[Src_n, Dst_n], n \in \{1, 2, 3, 4\}$

种群规模 S 表示一代个体的数量,一般是拓扑规模的函数.由于 GA 算法最终结果对初始种群的质量并不敏感,因此可以采用最简单的办法生成初始种群:随机在源与目的节点之间生成 S 组可能的路由方案,作为第一代群体,初始个体的随机生成要求满足链路容量限制条件并且不存在环路.图 4 表示了初始种群中一个随机生成的个体,它具有 4 条基因序列,分别对应于 4 路并发视频

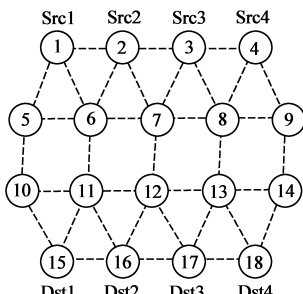


图3 网络拓扑示意

的传输路径.

对于给定个体,即当多个视频序列的路由矢量的集合 $\{X_v\}_{v \in V}$ 确定时,优化问题变为在特定传输路径下确定最佳编码码率以使得视频失真最小的问题,而这个问题是一个具有非线性限速条件的一般规划问题,根据最优化理论给出的集中式求解方法,可以在二项式时间内求出最优解,再把此特定路径对应的最优编码

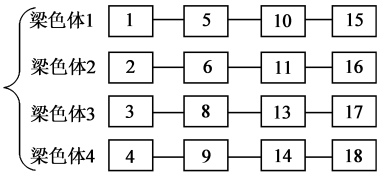


图4 个体示例

码率代入目标函数中求出总加权视频质量即可作为评价此个体适应性的指标.在自然选择过程中,每次迭代都从上一代群体中随机选择出 m 个适应性最好的个体进入下一代群体.同时,以一定概率进行交叉与变异以生成新的个体,将搜索空间扩展到新的区域中.

交叉与变异的使用是 GA 算法的重要参数,它们使算法对问题解空间的搜索能够不断扩展到新的领域,确保迭代过程不陷入局部最优解中.图 5 显示由 2 个个体交叉而产生 2 个新个体的过程:选择 2 个双亲个体的某一条染色体(如第 3 条),将其上存在共同基因的两段染色体交换,就形成了新的个体,该个体同时具备双亲的基因特征.

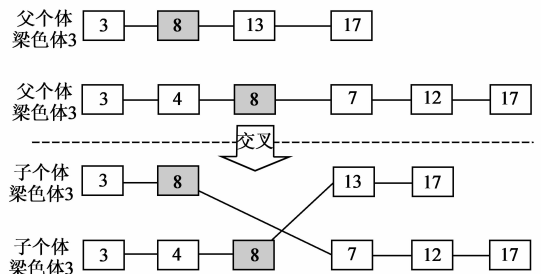


图5 交叉

图 6 显示某个体的第 3 条染色体上第 4 个基因变异产生新个体的过程:随机等概率地在变异个体中选择一条染色体上的一个基因作为变异基因,从该变异基因节点出发,生成一条到达目的结点的新路径,要求不重复原有路径中的任意一个结点,如果不存在这条路径,则保持原路径不变,否则而连接变异结点之前的旧路径与变异结点之后的新路径以生成一条新染色体,这样就产生了一个新的路径以替换旧路径,即变异产生了新一代的个体:

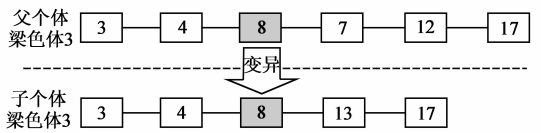


图6 变异

对于固定结点数目的多跳无线网络,选择合适的种群规模大小、交叉与变异概率,重复进行基于上述遗传算法的迭代,当某次迭代后,种群的视频质量达到阈值或者迭代次数到达指定值,则停止计算,此时种群中适应性最好的个体就即为能使视频失真最小的传输路径,而在这一路径下的使失真取最小值的视频流源码率就是最佳传输码率。

4 性能评估

在这一节里通过仿真实验将基于遗传算法得出的优化资源分配方案与通过穷举法得到的最优分配方案之间的偏差进行分析比较,以对启发式方案的性能进行评估。使用基于 NS-2 的随机拓扑生成器产生拥有 20 个结点的无线多跳网络,结点之间用 802.11 WLAN 链路特征进行建模,在仿真拓扑上并发 8 路实时视频传输,每个视频序列均采用 Foreman QCIF 视频序列使用 H.264/AVC 编码器进行可变码率编码,所有视频序列的接收端解码时限均设置为 250 毫秒;无线结点之间的可用带宽在 200kbps~800kbps 之间均匀分布,链路的随机报文丢失概率为 5%,遗传算法使用参数如下:群体规模 S 取 10,交叉概率 0.45;变异概率 0.3,最多迭代次数为 50 次。在 20 个结点的小规模网络中,通过穷举法求最优的分配方案是可行的,表 1 记录了在 4 种不同随机拓扑下采用 GA 算法获得的优化方案与使用穷举法获得的最优值的比较结果。

表 1 算法性能比较

随机拓扑	T1	T2	T3	T4
总视频失真				
穷举算法	875.66	350.65	654.34	406.23
遗传算法	870.98	354.87	654.01	402.21
偏差	0.53%	1.2%	0.51%	0.99%
算法执行时间				
穷举算法	1.2h	2.5h	6h	4.5h
遗传算法	321ms	301ms	232ms	354ms

仿真结果证明使用遗传算法得到的解在各种拓扑环境下的性能都非常接近最优方案,而算法执行时间仅为数百毫秒;高效计算最优视频传输路径与视频编码码率对于多跳无线局域网中的实时视频传输是非常重要的,能够允许频繁执行优化算法并避免产生较大计算开销。如:当某个视频序列的内容变化时;某视频流的优先级调整时,或者视频传输开始或者中止时,都可以执行优化路由与码率分配算法对传输行为进行及时调整,以提高视频传输网络的整体服务质量。

5 结束语

本文提出一种在无线多跳局域网中并发传输多路视频流时使用的传输路径选择和视频源码率控制机制,并为解决这个复杂的视频失真优化问题提供一个

基于遗传算法的启发式解决方案。分析结果表明,该算法具有较小运算开销,能够高效求解出视频传输网络的优化资源调配方案,实时调整传输路径并在各条路径上合理分配带宽,使多个视频流的总失真最小。根据实时视频应用带宽需求的动态变化,对网络传输行为做出及时适应和调整,提高了用于视频传输的多跳局域网的整体服务质量。

参考文献:

- [1] H Badis, K A Agha. QOLSR: QoS routing for Ad hoc Wireless Networks using OLSR [A]. Wiley European Transaction on Telecommunications [C]. 2005, 15(4): 427 - 442.
- [2] V Kone, S Das, B Y Zhao, H Zheng. QUORUM: Quality Of service RoUting in Wireless Mesh networks [J]. Mobile Networks and Applications. 2007. 358 - 369.
- [3] C E Perkins, E M Royer, S R Das. Quality of Service for Ad hoc On-Demand Distance Vector Routing [S]. IETF Internet Draft. 2001.
- [4] 李可维,涂来,王芙蓉,王浩. 联合速率控制与功率分配的多信道无线网络跨层优化 [J]. 电子学报. 2009, 36(6): 1203 - 1209.
LI Ke-wei, WANG Fu-rong, TU Lai, WANG Hao. Cross-Layer Rate Control and Power Allocation Optimazation in Multi-Channel Wireless Networks [J]. Acta Electronica Sinica. 2009, 36(6): 1203 - 1209. (in Chinese)
- [5] K Stuhlmuller, N Farber, M Link, B Girod. Analysis of Video Transmission over Lossy Channels [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(6): 1012 - 1032.
- [6] S Kompella, S Mao, Y Hou, H Sherali. On Path Selection and Rate Allocation for Video in Wireless Mesh Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking. 2009, Volume 17: 212 - 224.

作者简介:



李 昕 男, 1979 年 7 月生于湖南长沙。2005 年获得北京理工大学工学硕士学位, 现为北京交通大学电子信息工程学院博士生, 主要从事网络流媒体、视频失真优化、应用层组播、QoS 等方面的研究工作, 在核心刊物上发表论文多篇。 E-mail: 04111028@bjtu.edu.cn

张宏科 男, 1957 年 9 月生于山西大同, 现为北京交通大学电子信息工程学院教授, 博士生导师, 国家 973 项目首席科学家, 国家自然科学基金委信息科学部学科评审专家组专家, 国家“863”计划项目“通信主题 IP 网络技术”任务专家组专家, 高等学校电子信息科学与工程类教学指导委员会委员。主要研究方向: 网络体系结构, 下一代互联网; 一体化网络、普适服务体系结构、移动网络。

E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn