



专题:异构网络

# 基于多终端协同的高清视频多流并发自适应传输控制方法

罗小琴,朱晓荣

(南京邮电大学通信与信息工程学院 南京 210003)

**摘要:**针对高清视频在异构无线网络中以多流并发的方式进行传输,以提高传输速率,从而增强用户体验的问题,以最小化系统传输时延以及各路径间时延差为优化目标,联合考虑了视频发送端和接收端,自适应调整视频发送速率和接收端缓存大小以提高用户体验,建立了异构无线网络中视频多流并发传输的控制模型,并基于 Pareto 分布和 P/P/1 排队理论对具有自相似性和长相关性的视频流进行了研究,推导了并发传输系统的时延统计特性,并在此基础上提出了一种异构无线网络视频流自适应分流决策方法。仿真结果表明,与一般的负载均衡分流决策方法相比,提出的异构网络多流并发自适应传输控制方法在时延和分组丢失率方面都有一定的优越性。

**关键词:**异构无线网络;流量分配;自相似流;Pareto 分布;传输时延

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-0801.2015244

## An Adaptive Concurrent Control Method for High Definition Video Transmission Based on Multi-Terminal Cooperation

Luo Xiaoqin, Zhu Xiaorong

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** For the purpose of solving the problem of controlling video traffic concurrent transmission in heterogeneous wireless networks to improve quality of experience (QoE), a video traffic concurrent transmission control model in heterogeneous wireless networks was built, which aimed at the minimization of the system transmission delay and the jitters. Then to solve the optimization problem, an explicit adaptive traffic allocation scheme was proposed. In order to closely simulate the network traffic, the video traffic with self-similarity and long-range dependence was modeled by using Pareto distribution and P/P/1 queue theory to obtain the delay of concurrent transmission system. At the same time, this model jointly considered the sender and receiver for adaptive adjusting buffer size and send rate in order to improve the user's experience. Simulation results show that, compared with commonly used traffic allocation scheme for load balancing, the proposed scheme has some advantages in aspects of delay and packet loss rate.

**Key words:** heterogeneous wireless network, traffic allocation, self-similar traffic, Pareto distribution, transmission delay

收稿日期:2015-08-25;修回日期:2015-09-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No. 2015AA01A705),国家自然科学基金资助项目(No.61372125)

**Foundation Items:** The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program)(No.2015AA01A705), The Natural Science Foundation of China (No.61372125)

论文引用格式:罗小琴,朱晓荣.基于多终端协同的高清视频多流并发自适应传输控制方法.电信科学,2015244

Luo X Q, Zhu X R. An adaptive concurrent control method for high definition video transmission based on multi-terminal cooperation. Telecommunications Science, 2015244

## 1 引言

随着 Internet 技术的飞速发展, 视频业务流逐渐成为互联网中的主要数据流量, 比较典型的有在线电影、视频会议等。移动数据和视频业务正成为人们生活中至关重要的一部分, 2012 年移动视频流量已超出其他数据流量的 50%, 思科最新公布的一份报告显示了 2014 年视频流量占全球网络流量的 90% 以上<sup>[1,2]</sup>。各种视频流媒体应用不断出现, 能够使用 3G/4G 无线移动连接到互联网的智能手机和平板设备快速增加, 都是视频流量快速增长的原因。

实时多媒体传输通常具有很高的网络带宽要求, 尤其是实时高清视频业务需要严格的端到端时延和时延抖动要求, 而单一的无线接入技术由于有限的通信能力和不同的工作方式无法为用户提供较好的用户体验。无线异构网络环境是下一代无线网络的一个重要特征, 存在多种不同的异构无线网络, 例如 3G、LTE、WLAN 等, 多径并行传输系统, 通过聚合多条链路的传输性能, 可以有效提升网络资源利用率, 提高业务传输速率及负载均衡能力。

参考文献[3]提出了一种无线广域网和无线个域网协作下的自适应流量分配策略, 该策略通过网络间的负载均衡实现了最小化系统传输时延, 并且扩展了单模终端的通信功能以支持高速率数据流, 该参考文献假设了网络流量到达服从泊松过程, 根据排队论将不同链路中数据传输建模为 M/M/1 队列, 而参考文献[4]提出的大量对网络流量的研究表明数据分组到达不服从指数分布、不具有泊松性, 而是具有自相似性和长相关性。参考文献[5]也提出数据分组到达和分组长度服从指数分布不适合用来建立不同种类的网络流量模型, 并且指出重尾分布更加适合数据分组到达和数据分组长度。在网络性能分析中, 服从重尾分布 (heavy-tailed distribution) 与服从泊松分布的数据流有明显不同的特征。参考文献[6]指出理解流量的性质对无线网络和无线服务的设计至关重要, 传统的网络流量 (泊松流量) 模型导致低估或者高估无线网络性能, 并且仿真结果表明与泊松流量相比, 自相似流量的实时轮询服务和尽力而为服务的时延增加, 尽力而为服务的请求碰撞概率增大。此外参考文献[3]的优化目标是系统时延总和最小, 而针对视频流, 需要综合考虑各路径时延、各路径时延差 (即路径间抖动) 以及播放缓冲区长度。参考文献[7]提出的不同类型的网络流量表现出自相似特性, 其性能特征和服从典型的泊松分布或者指数分布的流量有显著区别。参考文

献[8]提出了满足时延约束抖动优化的路径流量分配算法, 该算法根据路径最大容许流入速率按比例分配各路径流量, 同时尽可能减小路径间的时延抖动。参考文献[9]提出了异构网络中一个流量自适应分配策略, 将数据流分解成多个流, 并在终端聚合, 并行数据传输使用 M/M/1 排队理论建模, 并通过拉格朗日乘子法求解最优化问题。但是近年来对网络通信流的测量研究颠覆了传统的以泊松理论为基础的通信模型, 许多文献报告了现代数据通信流具有自相似特性。参考文献[10]建立了异构多接入网络并发传输端到端时延的等效排队论模型, 并由此模型获得了并发传输系统的理论时延界。提出了多接入网间资源联合调度的分流策略, 包括最短等待时延分流策略和统一队列管理分流策略。但是将分组到达看作指数分布, 服务过程看作泊松分布。参考文献[11]针对网络流量的自相似特性, 使用 P/P/1 排队模型研究了在各种无线局域网场景自相似流量的影响。通过对数据分组到达时间间隔和数据分组大小应用更加真实的自相似分布, 结果表明, 在某些情况下, 尤其是单跳网络或者无移动性网络中, 自相似流量对无线局域网的时延有显著影响。具有自相似特性的网络业务对网络设计提出新的挑战, 自相似业务的复用叠加不仅不会使网络业务趋向平滑, 反而增加了它的突发性, 而时间集合的分形业务的突发性减弱速度也远比泊松业务要慢得多, 所以网络设计中就需要分配更多的资源来保证服务质量。

本文针对上述问题, 以最小化系统链路时延和以及各路径间时延差为优化目标, 首先提出了系统模型, 建立了异构无线网络视频多流并发传输控制数学模型, 形成了异构无线网络中一种自适应视频流量分配的最优化问题。本文首次将视频流的自相似特性应用到异构网络多流并发分流策略中, 对数据分组到达时间间隔和数据分组大小采用更加真实的自相似分布进行建模, 数据传输使用 P/P/1 排队模型, 得到更加符合视频流实际的时延, 从而获得更加合理的分流策略, 以保证服务质量。并综合考虑发送端和接收端状况, 将接收端缓冲区长度作为反馈调整发送端速率提高用户体验。为解决此优化问题, 利用了人工萤火虫群优化 (glowworm swarm optimization, GSO) 算法对该优化问题进行了求解。

## 2 系统模型

异构无线网络视频多流并发传输控制系统模型如图 1 所示, 高清视频流在视频源端进行分流, 通过自适应分流

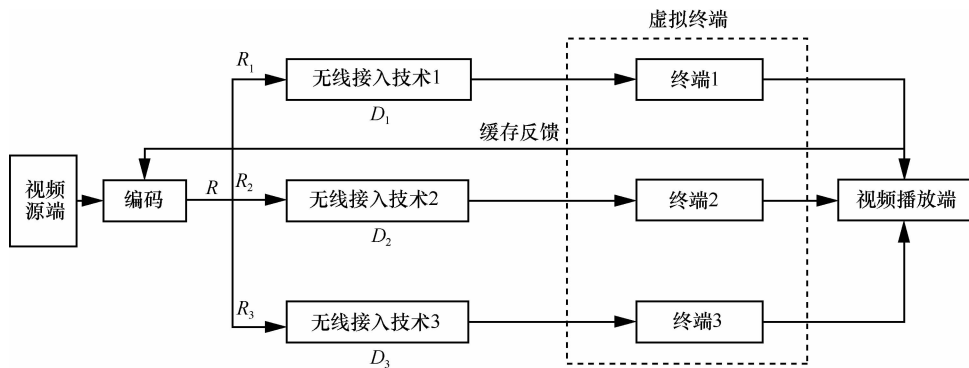


图1 异构无线网络中视频多流并发传输控制模型

决策,将视频流分别通过不同链路进行传输,多个异构无线终端,多种无线网络协同工作,最后在视频播放端缓冲区进行整合后播放。视频源端采用 H.264 对视频进行压缩编码,采用 3G 网络进行传输。多个用户可利用周边可用终端完成多流并发传输的视频业务。来自不同用户的异构单模终端构成虚拟多模终端,这些异构单模移动终端使用不同制式的网络,例如 cdma2000、WCDMA 等,这些协同终端之间通过 Wi-Fi 组网由终端控制器控制聚合成一个能力增强、接口增多、协作对外的有机整体,形成一个以用户为中心的超级终端,即虚拟终端,实现业务多样化和增强用户体验。

假设发送端与接收端之间存在  $K$  条链路,各条传输路径性能存在差异,如不同路径的分组丢失率及传输时延可能各不相同。假设业务传输的最小单位为数据分组,通过合理安排数据分组离开发送的速率来调节业务在各路径上的传输速率。 $R$  是总的流量,  $R_1, R_2, R_3$  分别是分到各个链路的数据流量,  $D_1, D_2, D_3$  是各个链路的时延。

视频播放端设置了一个可动态调整长度的缓冲区,视频播放端接收的视频临时保存在播放缓冲区中,短时间的速率和带宽的不匹配可以被吸收,从而减轻视频中断,并且视频数据分组可以在该播放缓冲区中重新排序,吸收各路径间的时延抖动。该缓冲区构成了视频播放端和视频源端的一个缓存反馈回路,视频源端可以根据视频播放端缓冲区长度调整发送速率  $R$ ,从而使缓冲区长度保持在正常状态,提高用户体验。

### 3 异构无线网络视频多流并发传输控制模型

视频流量具有自相似性和长相关性,而长相关流量对网络性能有不利的影响,最重要的结果是自相似流量下队

列长度分布的衰减比短相关业务源(如泊松模型)要缓慢。同时有研究表明,流量的自相似性会导致缓冲溢出率高,时延长和持续周期性拥塞,直接影响到新一代网络的设计、控制、分析和管理的,而使用泊松或马尔可夫业务模型不能准确地反映实际流量的长相关性,会导致分析时低估平均分组时延或最大队列长度。

#### 3.1 截断 Pareto 分布

流量的自相似性直接影响到新一代网络的设计、控制、分析和管理的,在网络性能分析中,数据流的自相似性越来越受到关注。尽管业务自相似过程产生的原因还没有最终定论,但重尾分布是导致自相似过程产生的一个重大原因。通常使用的重尾分布有 Pareto(帕拉图)、Weibull(韦伯)以及 Log-normal(对数正态)等。由参考文献[12]中的表 4.1.6-1 可知,视频数据分组大小服从截尾 Pareto 分布(truncated Pareto distribution),到达时间间隔同样服从截尾 Pareto 分布。通过对数据分组到达时间间隔和数据分组大小应用更加真实的自相似分布,能够得到更加符合视频流实际的时延。

Pareto 分布的尾函数为:

$$P(X > x) = \left(\frac{k}{x}\right)^a \quad (1)$$

其为双曲线函数,其衰减速度要比指数函数缓慢得多。本文使用 Pareto 分布代表视频流充分考虑视频流的自相似性。Pareto 分布为:

$$F(x) = P[X \leq x] = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a, x \geq k \quad (2)$$

因为  $x$  是无限的,因此用截尾 Pareto 分布代替 Pareto 分布,实际使用截尾 Pareto 分布:

$$F(x) = P[X \leq x] = \left[1 - \left(\frac{k}{x}\right)^a\right] / \left[1 - \left(\frac{k}{L}\right)^a\right], k \leq x \leq L \quad (3)$$

其中,  $k > 0$  是位置参数,  $a$  是形状参数, 用以确定均值和方差, 只有当  $1 < a < 2$  时,  $x$  才同时具有有限的均值和方差。截尾 Pareto 分布的均值和方差分别为:

$$E(x) = \frac{a(L^a k - L k^a)}{(a-1)(L^a - k^a)} \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{a}{(L^a - k^a)} \left( \frac{L^a k^2 - L^2 k^a}{(a-2)} - \frac{a(L^a k - L k^a)^2}{(a-1)^2(L^a - k^a)} \right) \quad (5)$$

### 3.2 P/P/1 排队模型

重尾服务分布排队模型和它对网络性能的影响是无线网络领域研究的热点问题<sup>[13]</sup>。自相似流量下队列长度分布的衰减比短相关业务源(如泊松模型)要缓慢, 而且流量的自相似性会导致缓冲溢出率高、时延长和持续周期性拥塞, 而视频流数据流存在明显自相似性和长相关性, Pareto 分布可对到达时间和服务时间特性建模<sup>[14]</sup>。视频流数据分组到达时间间隔服从 Pareto 分布, 服务时间同样服从 Pareto 分布, 因此本文所使用的每条并发链路排队模型为 P/P/1。

### 3.3 异构无线网络视频多流并发传输控制模型

异构无线网络视频多流并发系统中每条并发链路都可以建模为 P/P/1 的排队模型, 则整个系统为并联 P/P/1 排队模型。异构无线网络中单条链路时延为平均等待时间和平均服务时间之和<sup>[15]</sup>。

$$D = t_w + t_s \quad (6)$$

$$t_w = t_s \frac{\rho}{(1-\rho)} \cdot \frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \quad (7)$$

$$t_s = 8M_s/B \quad (8)$$

其中,  $t_w$  为平均等待时间,  $t_s$  为平均服务时间,  $C_a^2$  和  $C_s^2$  分别是视频流数据分组到达时间间隔和数据分组服务时间的方差系数平方值, 由  $x$  的方差和均值定义:

$$C^2 = \frac{\sigma^2}{E^2(x)} \quad (9)$$

$$\rho = N_i \cdot 8M_s/Bt \quad (10)$$

其中,  $N_i$  为传输节点数,  $M_s$  是视频流数据分组平均分组长度,  $B$  为链路带宽,  $M_s$  定义为:

$$M_s = E_s(x) = \frac{a_s(L_s^a k_s - L k_s^a)}{(a_s-1)(L_s^a - k_s^a)} \quad (11)$$

从式(7)中可以看出, 时延  $D_i$  是  $C_{a,i}^2$  的函数。而从式(9)可以看出  $C_{a,i}^2$  是  $\alpha_i$  的函数, 因此  $C_{a,i}^2$  可以表示为  $C_{a,i}^2(\alpha_i)$ 。

实时视频流数据的传输, 需要在较长的时间内传送连续的视频数据, 并在接收方实时播放, 具有严格的端到端时延和时延抖动要求,  $D_i$  是第  $i$  条链路的时延, 而各路径间时延差定义为各路径间时延抖动。因此, 为满足异构

无线网络中多媒体应用的服务质量, 路径流量分配策略必须考虑数据的网络传输时延及各链路时延差别, 各链路时延差别称为抖动, 路径流量分配策略应尽可能优化路径间的时延及其抖动。本文用各路径时延差的方差表示抖动波动的大小, 将网络传输时延及抖动的方差均作为优化目标, 因此, 异构无线网络中视频多流并发传输控制模型可以表述为如下的最优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_i} \quad & \sum_{i=1}^K D_i(\alpha_i) \\ & \min_{\alpha_i} \sigma_{D,i}^2(\alpha_i) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^K R_i = R \\ & R_i < R_{a,i} \end{aligned} \quad (12)$$

该最优化问题为多目标优化问题, 使用权函数法将各目标函数乘以各自对应的权系数, 将多目标优化问题转化为如下单目标优化问题。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha_i} \quad & \left( \sum_{i=1}^K 0.5 D_i(\alpha_i) + 0.5 \sigma_{D,i}^2(\alpha_i) \right) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^K R_i = R \\ & R_i < R_{a,i} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $R_i$  是分配给第  $i$  条链路的数据流,  $R_{a,i}$  是第  $i$  条链路可用资源,  $D_i(\alpha_i)$  是第  $i$  条链路时延,  $\sigma_{D,i}^2(\alpha_i)$  是  $K$  条链路时延方差。

由以上的最优化问题可以看出, 本文设计的视频多流并发传输控制模型就是设法找到最佳的分配矢量  $\{\alpha_i, i=1, 2, \dots, K\}$ , 使得在约束条件下, 使式(13)中的时延和时延方差加权和最小。

通过最小化上述系统平均整体时延, 同时最小化个链路时延方差使各路时延差尽可能小, 以获得一套最优的多流并发分流策略。基于系统整体时延和抖动的最优化分流策略可以描述为上述提出的基于等式、不等式约束的多目标非线性优化问题, 这个问题难以得到闭式解。本文采用人工萤火虫算法求解式(13)的最优化问题。

### 3.4 自适应分流决策

本文提出的异构无线网络中视频流自适应分流决策是设计最优的分流策略使得系统的时延最小同时使各链路时延差即时延抖动最小。在并发传输中, 数据分组的时延抖动主要来自于不同无线接入技术之间传输能力的差异。



$D_i$  与  $D_k$  分别是第  $i$  条和第  $k$  条链路的时延,  $D_i$  与  $D_k$  的差异  $|D_i - D_k| (i \neq k)$  即时延抖动, 抖动应尽可能小, 两者差异太大会导致视频图像出现“马赛克”现象, 降低清晰度。

数据分组在不同路径上的传输时延  $D_i$  不仅与路径的传输能力有关系, 还与路径间的流量分配策略有关系。当路径的传输能力较差时, 为其分配较多的流量将导致  $D_i$  急剧增大。当路径的传输能力较好, 适当增加其传输流量对传输时延  $D_i$  的影响不是很大。通过合理分配各路径间的流量, 使路径间时延差异减小, 从而达到减小抖动的目的。

假设发送端与接收端之间存在  $K$  条链路, 各条传输路径性能存在差异, 如不同路径的分组丢失率及传输时延可能各不相同。假设视频业务传输的最小单位为数据分组, 通过合理安排数据分组离开发送的速率来调节视频业务在各路径上的传输速率。

设在  $t_k$  时刻  $N_k$  个数据分组到达发送端, 称  $t_1 < t_2 < \dots < t_k < \dots < t_n$  为到达时间点, 随机变量  $T_k = t_{k+1} - t_k$  称为到达时间间隔。为模拟视频业务流的随机到达过程假设  $T_k$  服从截断 Pareto 分布。 $E_a(x)$  为平均到达时间间隔, 则业务到达速率为  $u = \frac{1}{E_a(x)}$ 。受链路差异影响, 数据分组在各链路上的传输速率处于动态变化过程中, 这正是系统优化的目标, 对于链路  $i$  有:

$$u_i = \frac{1}{E_{a,i}(x)} \quad (14)$$

$$E_{a,i}(x) = \frac{\alpha_{a,i}(L_a^{\alpha_{a,i}} k_a^{\alpha_{a,i}} - L_d^{\alpha_{a,i}} k_a^{\alpha_{a,i}})}{(\alpha_{a,i} - 1)(L_a^{\alpha_{a,i}} - k_a^{\alpha_{a,i}})} \quad (15)$$

$$R_i = \frac{M_s}{E_{a,i}(x)} \quad (16)$$

其中,  $u_i$  为第  $i$  条链路上的业务到达速率,  $E_{a,i}(x)$  为第  $i$  条链路上的到达时间间隔,  $R_i$  为第  $i$  条链路上的传输速率,  $M_s$  为数据分组长度。

本文提出的自适应分流决策使用人工萤火虫群优化算法求解式(13)中最优化问题。人工萤火虫群优化算法源于对自然界中萤火虫发光求偶、沟通等行为的研究。它是一种群智能优化算法, 该算法广泛地使用在资源调度方面, 其仿生学原理是: 用自然界中的萤火虫个体模拟搜索空间中的点, 将萤火虫个体相互吸引和移动的过程模拟成目标寻优的过程, 用萤火虫个体所处位置的优劣来衡量求解问题的目标函数, 萤火虫个体的优胜劣汰过程即目标函数优化过程中函数可行解的迭代过程。

在 GSO 算法中, 人工萤火虫亮度是与所在位置的目标函数适应度值有关。设在  $m$  维的目标搜索空间有  $n$  个萤火虫组成一群体, 根据荧光素值的相近程度将该群体分成  $n_e$  个邻域, 每个邻域内萤火虫  $i$  以概率  $P_g$  在决策域范围  $R_d (0 < R_d < R_s)$  内向萤火虫  $j$  移动, 其中  $R_s$  是萤火虫的感知范围半径。第  $i$  个萤火虫的位置  $x_i (x_i \in R^m, i=1, 2, \dots, n)$  就是一个潜在的解, 将  $x_i$  带入目标函数算出其适应度函数值  $J(x_i)$ , 同时得到荧光素值  $l_i$ , 根据荧光素值的大小衡量解得优劣。

GSO 算法主要通过式(17)荧光素值更新方程、式(18)概率分布方程、式(19)位置更新方程和式(20)局部决策域范围更新方程对萤火虫进行操作来模拟求解函数最优值<sup>[16]</sup>。

$$l_i(t) = \max\{(0, (1-\rho) \cdot l_i(t-1) + \gamma \cdot J(x_i(t)))\} \quad (17)$$

$$P_g(t) = \frac{l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t)} \quad (18)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + s \left( \frac{x_j(t-1) - x_i(t-1)}{\|x_j(t-1) - x_i(t-1)\|} \right) \quad (19)$$

$$R_d^j(t+1) = \frac{R_s}{1 + \beta \cdot D_i(t)} \quad (20)$$

式(18)中,  $N_i(t) = \{j: \|x_j(t) - x_i(t)\| < R_d^j(t); l_j(t) < l_i(t)\}$ 。即当萤火虫  $j$  的荧光素值大于萤火虫  $i$  的荧光素, 且萤火虫  $j$  与萤火虫  $i$  之间的距离小于萤火虫  $i$  所在邻域的决策范围时, 将萤火虫  $j$  划分到萤火虫  $i$  所在的邻域。 $D_i(t) = N_i(t) / (\pi \cdot R_s^2)$  是萤火虫  $i$  的邻域密度;  $\beta$  是常数;  $\rho$  是常数, 它决定算法是否呈现记忆性, 当  $\rho=0$  时, 算法呈现无记忆性, 此时每个萤火虫的荧光素值只依赖于萤火虫当前位置的适应度值, 当  $\rho \in (0, 1]$  时, 记下当前位置的荧光素累积值好的路径;  $\gamma$  是常量, 可缩放函数适应度值;  $s$  是萤火虫移动的步长, 能影响目标函数的值域范围。

利用 GSO 算法求解式(13)最优化问题, 得到最佳的分配矢量  $\{\alpha_i, i=1, 2, \dots, K\}$ , 式(15)中  $E_{a,i}(x)$  是  $\alpha_i$  的函数,  $R_i$  同样为  $\alpha_i$  的函数,  $M_s$  在分流过程中不变。因此可以获得链路  $i$  中视频数据分组到达时间间隔服从参数为  $L_a, k_a, \alpha_{a,i}$  的 Pareto 分布, 数据分组长度仍服从参数为  $L_s, k_s, \alpha_s$  的 Pareto 分布, 根据式(16)最后计算出  $R_i$ 。本文中播放端缓冲区构成了视频播放端和视频源端一个缓存反馈回路, 缓冲区长度可动态调整, 当缓冲区长度过长, 可将视频发送端速率  $R$  降低, 缓冲区长度过短, 可将视频发送端速率  $R$  提高, 通过对视频发送速率以及缓存长度进行联合调整来保证缓存队列尽量控制在正常状态, 从而可以有效降低缓

冲区上溢或下溢概率,提高用户体验。通过改变  $R$ ,从而改变各链路上的  $R_i$ 。自适应分流决策伪代码如下。

$$(1) \text{ 确定需要寻优的目标函数 } f(\alpha_i) = \sum_{i=1}^K 0.5 D_i(\alpha_i) + 0.5 \sigma_{D_i}^2(\alpha_i)$$

及  $\alpha_i$  的定义域

(2) 确定惩罚阶数  $b$ 、惩罚系数  $c$ , 在目标函数中添加惩罚函数将式(13)约束优化问题转化为无约束优化问题, 寻优的

$$\text{目标函数为: } F(\alpha_i) = f(\alpha_i) + c \cdot \left( \sum_{i=1}^K (\max(0, R_i - R_{ai}))^b + \left| \sum_{i=1}^K R_i - R \right|^b \right)$$

(3) 随机生成萤火虫初始种群  $\alpha_i (i=1, 2, \dots, n)$

(4) 根据  $f(\alpha_i)$  计算每个萤火虫的荧光亮度  $l_i$

(5) 确定光吸收因子等参数

(6) while( $k < M$ )

(7) for  $i=1$  to  $n$ //遍历所有萤火虫

(8) for  $j=1$  to  $i$

(9) if( $l_i < l_j$ )

(10) 按照式(19) 更新萤火虫  $i$  向萤火虫  $j$  移动

(11) end if

(12) 按照新位置更新萤火虫的吸引度及荧光亮度

(13) end for

(14) end for

(15) 对所有萤火虫亮度进行排序并找到当前最优值

(16) end while

(17) 得到最优值及对应参数, 对应参数即最佳分配矢量

(18) 将最佳分配矢量  $\{\alpha_i, i=1, 2, \dots, K\}$  代入式(15)、式(16), 得到每条链路上分配的流量

由 GSO 算法原理可知, 自适应分流决策过程的运行时间主要消耗在萤火虫位置更新上, 其时间复杂度主要由最大迭代次数  $M$  和萤火虫个数  $n$  两个因素决定。在一次迭代过程中, 萤火虫位置更新操作执行的频度为  $f=1+2+3+\dots+n=n \times (n+1)/2$ , 其时间复杂度为  $O(n^2)$ , 所以经过  $M$  次迭代之后, 本文自适应分流决策的总时间复杂度为  $O(M \times n^2)$ , 其中  $M$  为最大迭代次数,  $n$  为萤火虫个数。

## 4 仿真结果

本文通过大量 MATLAB 仿真实验来评估所提出的自适应分流策略的性能。仿真参数见表 1。假设并行传输数据为 3 条, 传输能力分别 4 Mbit/s、2 Mbit/s、3 Mbit/s, 人工萤火虫群优化算法初始种群大小为 20, 最大迭代次数为 300。

表 1 仿真参数

| 参数                | 数值          |
|-------------------|-------------|
| 总的速率 $R$          | 2~6 Mbit/s  |
| $R_{a,1}$         | 4 Mbit/s    |
| $R_{a,2}$         | 2 Mbit/s    |
| $R_{a,3}$         | 3 Mbit/s    |
| 种群大小 $N$          | 20          |
| 最大迭代次数 $M$        | 300         |
| 荧光素挥发因子 $\rho$    | 0.4         |
| 适应度提取比 $r$        | 0.6         |
| 邻域变化率 $\beta$     | 0.08        |
| 邻域阈值(邻域萤火虫数) $nt$ | 5           |
| 步长 $s$            | 0.03        |
| 荧光素浓度 $iot0$      | 5           |
| 决策半径 $ro$         | 2.048       |
| 数据分组长度 $M_s$      | 512 byte    |
| $L_a$             | 18 900 byte |
| $k_a$             | 189 byte    |
| $\alpha_a$        | 1.5         |

在本仿真中, 视频发送端速率从 2 Mbit/s 变化到 6 Mbit/s。本文所提出的自适应分流决策与一般的负载均衡分流决策进行比较。一般的负载均衡分流决策如式(21):

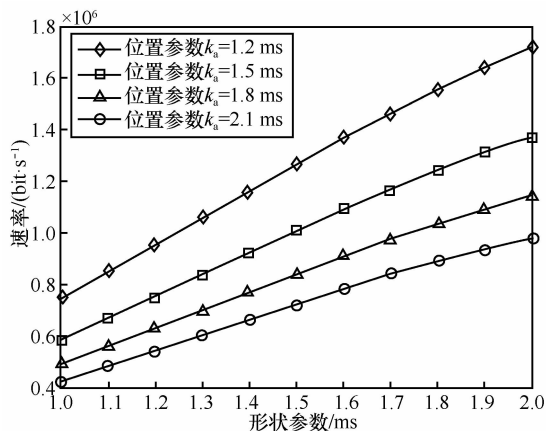
$$R_i = R \frac{R_{a,i}}{\sum_{j=1}^3 R_{a,j}} (i=1, 2, 3) \quad (21)$$

参考文献[4]中指出到达时间间隔  $SCV(C_a^2)$  和数据分组长度  $SCV(C_s^2)$  对分组丢失率有不同程度的重大影响, 本文仿真中分组丢失率为<sup>[4]</sup>:

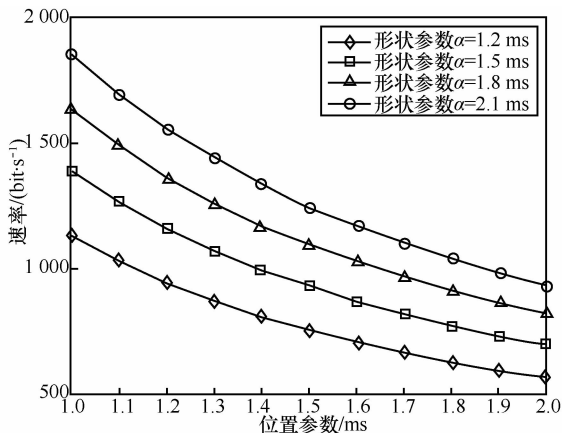
$$P_{LP}^T = \frac{1-\rho}{1-\rho^{\frac{2Q}{C_a^2+C_s^2}+1}} \rho^{\frac{2Q}{C_a^2+C_s^2}} \quad (22)$$

式(22)中  $Q$  为传输节点缓存分组的长度, 仿真中  $Q$  设为 20 个分组。

图 2(a)显示了速率随形状参数  $\alpha_a$  的变化。可以看出当数据分组长度和位置参数  $k_a$  不变时, 速率随着形状  $\alpha_a$  增大, 图 2(b)显示了速率随位置参数  $k_a$  的变化。可以看出当数据分组长度和形状  $\alpha_a$  不变时, 速率随着位置参数  $k_a$  的增大而逐渐减小。仿真中发送速率  $R = M_s / E_{a,i}(x) = M_s / \frac{\alpha_{a,i}(L_a^{\alpha_{a,i}} k_a - L_a k_a^{\alpha_{a,i}})}{(\alpha_{a,i}-1)(L_a^{\alpha_{a,i}} - k_a^{\alpha_{a,i}})}$ , 通过改变  $\alpha_a, k_a, L_a$  来模拟发送速率  $R$ , 同一发送速率下分流时, 各条链路上的 Pareto 分布参数  $k_a, L_a$  相同, 通过人工萤火虫群优化算法获得最佳的分配矢量  $\{\alpha_i, i=1, 2, 3\}$ 。



(a) 形状参数对速度的影响



(b) 位置参数对速度的影响

图2 形状、位置参数对速度的影响

图3显示了系统分组丢失率随发送速率的变化。可以看出本文提出的基于时延和时延抖动的分流策略比一般负载均衡分流策略分组丢失率要低,但是随着网络负载增加,两者差别逐渐减小,当发送端速率增大到 5.5 Mbit/s 和 6 Mbit/s 时,两者分组丢失率接近。这是因为网络负载较大,优化效果降低。在发送端速率为 3 Mbit/s 时,本文提出的分流策略

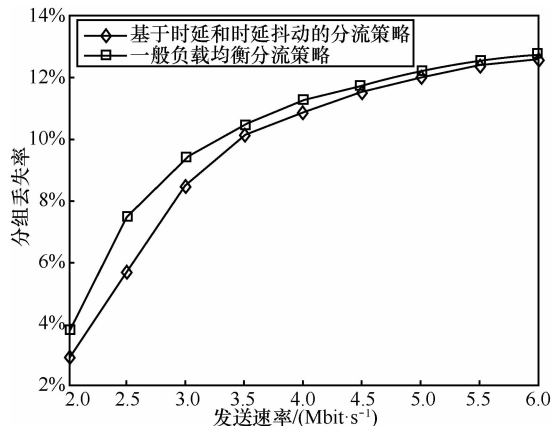
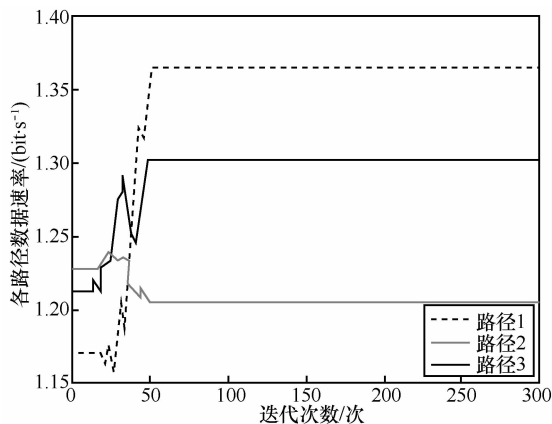


图3 不同分流策略分组丢失率比较

比一般负载均衡分流策略分组丢失率降低 10.6%。

图4(a)显示了在发送端速率为 4 Mbit/s 时,自适应分流决策方法迭代 50 次左右收敛,各路径分得数据流量如图4(a)所示。图4(b)显示了在发送端速率为 4 Mbit/s、萤火虫种群大小为 20、最大迭代次数为 300 时,系统分组丢失率在 50 次左右收敛,系统性能稳定,计算复杂度为  $O(M \times n^2)$ ,其中  $M$  为最大迭代次数,  $n$  为萤火虫个数,计算复杂度低。



(a) 各路径流量分配随迭代次数变化关系

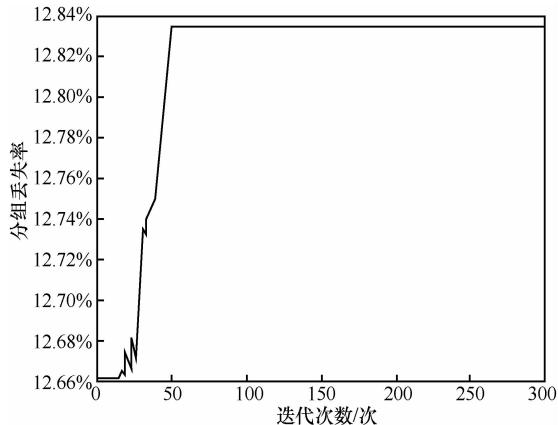
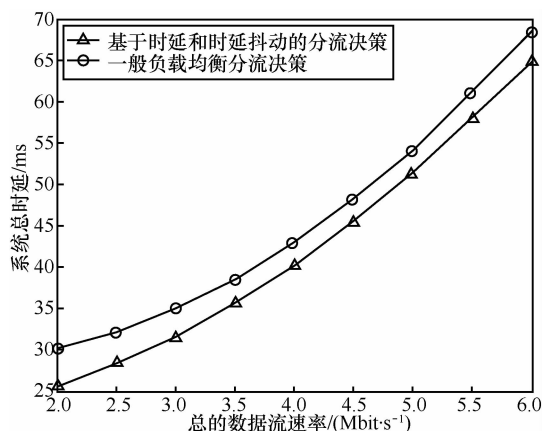
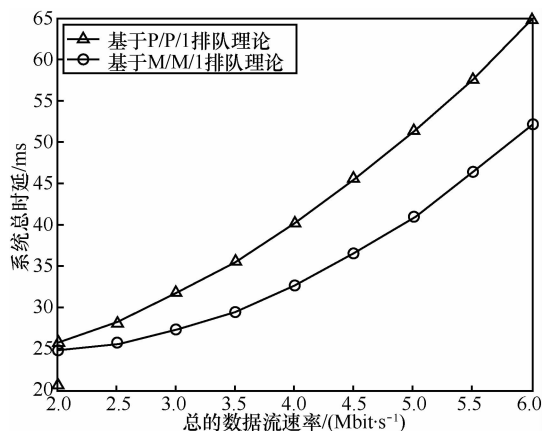
(b) 系统分组丢失率随迭代次数变化关系  
(种群大小  $N=20$ , 最大迭代次数为 300)

图4 各路径流量分配、系统分组丢失率随迭代次数变化关系

图5(a)显示了与一般负载均衡分流策略相比,本文提出的分流策略的时延降低了 4.67%。当发送端速率逐渐增大时,两种分流策略中的时延均大幅增大,因为流量负载已接近可用资源,这将导致系统性能不稳定,尤其是当发送端速率超过 4 Mbit/s 时,单一的无线接入技术因为有限的通信能力已经无法满足要求,因此来自不同用户的单模异构终端通过局域网组网扩展成以用户为中心的能力增强的超级终端,即虚拟终端,可以聚合链路资源,提高用户



(a) 不同分流策略时延



(b) P/P/1 与 M/M/1 传输时延

图 5 时延比较

体验。图 5(b)显示了与采用 M/M/1 排队理论相比,采用 P/P/1 排队理论的时延大于前者,并且随着发送速率的增大,两者差距增大。这是因为视频流的自相似性对时延影响,需要分配更多的资源来保证服务质量,因此采用更符合视频流自相似特性的 P/P/1 排队论进行分流决策能够给用户提供更好的体验。

## 5 结束语

本文针对异构无线网络中视频多流并发传输控制提出了一种视频自适应分流决策。提出的异构网络高清视频多流并发传输控制包括两个阶段:自适应分流决策;接收缓冲区长度反馈自适应调节发送端速率。自适应分流决策通过使系统时延最小同时使时延抖动最小,获得一种分流决策方法。缓冲区长度反馈自适应调节发送端速率是联合视频源端和视频播放端,通过播放端缓冲区长度自适应调节发送端速率。

仿真结果表明,所提出的视频自适应分流决策与一般

的负载均衡分流决策方法相比,时延减少了 4.67%,基于 P/P/1 排队理论与 M/M/1 排队理论相比时延增加,且随着发送端速率的增加,两者差距增大,说明视频流的自相似性影响时延,需要分配更多的资源来保证服务质量,因此采用更符合视频流自相似特性的 P/P/1 排队论进行分流决策能够给用户提供更好的体验。所提出的视频自适应分流决策与一般的负载均衡分流决策方法相比,在发送速率为 3 Mbit/s 时,分组丢失率降低 7.6%。总的来说,与一般的负载均衡分流决策方法相比,本文提出的分流决策方法在时延和分组丢失率方面均有一定的优越性。

## 参考文献

- De Cicco L, Mascolo S. An adaptive video streaming control system: modeling, validation, and performance evaluation. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2014, 22(2):526~539
- Zanforlin M, Munaretto D, Zanella A, et al. SSIM-based video admission control and resource allocation algorithms. *Proceedings of 12th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks, Hammamet, Tunisia*, 2014: 656~661
- Sun L, Tian H, Sun Q Y, et al. Traffic allocation scheme with cooperation of WWAN and WPAN. *IEEE Communications Letters*, 2010, 14(6):551~553
- Singhai R, Joshi S D, Bhatt R. A novel discrete distribution and process to model self-similar traffic. *Proceedings of the 9th International Conference on Telecommunications, Zagreb, Croatia*, 2007: 167~172
- Fisher M J, Gross D, Masi D, et al. Analyzing the waiting time process in internet queuing systems with the transform approximation method. *The Telecommunication Review*, 2001: 21~32
- Bhandari B N, Raja Kumar R V, Maskara S L. Performance of IEEE 802.16 MAC layer protocol under conditions of self-similar traffic. *Proceedings of IEEE Region 10 Conference TENCON 2008, Hong Kong, China*, 2008:1~4
- Ghani S, Iradat F. Loss probability in networks with pareto distributed traffic. *Proceedings of IEEE 2011 Second International Conference on Intelligent Systems, Modeling and Simulation (ISMS), Kuala Lumpur, Malaysia*, 2011: 355~360
- 陈志刚, 曾峰, 李庆华. 无线 mesh 网中时延约束抖动优化的多路径流量分配算法. *通信学报*, 2011, 32(1):1~8
- Chen Z G, Zeng F, Li Q H. Delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation for multipath routing in wireless mesh networks. *Journal of Communications*, 2011, 32(1): 1~8



- 9 Wang C R, Tian H, Miao J. Dynamic traffic allocation scheme for optimum distribution in heterogeneous networks. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), San Francisco, CA, USA, 2011:1~5
- 10 马骁, 盛敏, 张琰. 异构多接入网并发传输的时延界分析及分流策略. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(2):5~12  
Ma Y, Shen M, Zhang Y. Delay bound analysis and splitting strategies of concurrent transmission in heterogeneous networks. Journal of Xidian University(Natural Science), 2013, 40(2):5~12
- 11 Ghani S. Analysis of Pareto distribution on delay performance in network. Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communications Frontiers (WCF 2010), Chongqing, China, 2010
- 12 3GPP 2C.R1002-0 V1.0.cdma2000 Evaluation Methodology, 2004
- 13 Xu S, Xu B G, Peng D Z. The waiting time distribution of a pareto service self-similar queuing model for wireless network nodes. Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, 2006:1~3
- 14 Galkin A M, Simonina O A, Yanovsky G G. Multiservice IP network QoS parameters estimation in presence of self-similar traffic.Proceedings of 6th International Conference on Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking, St. Petersburg, Russia, 2006:235~245
- 15 Ghani S. The impact of self similar traffic on wireless LAN.

Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC 2010), Caen, France, 2010

- 16 杨艳, 周永权, 罗林等. 人工萤火虫群优化算法求解约束优化问题. 小型微型计算机系统, 2014, 1(35):185~188  
Yang Y, Zhou Y Q, Luo L, *et al.* Artificial glowworm swarm optimization algorithm for solving constrained optimization problems. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 1 (35): 185~188

#### [作者简介]



罗小琴, 女, 南京邮电大学硕士生, 主要研究方向为移动通信、无线传感器网络和异构无线网络视频传输控制。



朱晓荣, 女, 博士, 南京邮电大学教授, 主要研究方向为异构网络融合、泛在网络、无线传感器网络等无线资源管理以及跨层优化算法和协议设计。