

## 无线 mesh 网中时延约束抖动优化的多路径流量分配算法

陈志刚<sup>1</sup>, 曾锋<sup>1</sup>, 李庆华<sup>1,2</sup>

(1.中南大学 软件学院, 湖南 长沙 410083; 2.宜春学院 计算机系, 江西 宜春 336000)

**摘 要:** 针对无线 mesh 网中多媒体应用的特点, 研究多路径传输中路径时延满足约束且路径间抖动最小化的路径流量分配问题。首先, 基于网络演算理论分析了数据分组在无线 mesh 网单路径传输中产生的队列时延, 推导出单路径传输的时延上界以及多路径传输中的路径间时延抖动上界, 并得到满足时延约束的路径最大容许流入速率; 然后, 基于时延及其抖动上界, 提出满足时延约束抖动优化的路径流量分配算法 DCJOTA, 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; 最后, 分析了算法 DCJOTA 的可行性及其实现方法, 并在 NS2 网络模拟器中验证了该算法的有效性。仿真实验表明, 与 AOMDV 协议相比, 集成了 DCJOTA 算法的多路径路由协议 DCJO-AOMDV 协议在时延及其抖动方面具有更好的表现: 端到端平均时延降低 3.9%, 端到端平均时延抖动减小 24.5%。另外, DCJOTA 算法带来协议复杂性略微增加, DCJO-AOMDV 协议下的网络吞吐量下降 1.7%。

**关键词:** 无线 mesh 网; 多路径路由协议; 流量分配算法; 网络演算

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2011)01-0001-08

## Delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation for multipath routing in wireless mesh networks

CHEN Zhi-gang<sup>1</sup>, ZENG Feng<sup>1</sup>, LI Qing-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Software, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Department of Computer, Yichun University, Yichun 336000, China)

**Abstract:** In order to improve the QoS for multimedia application, which focused on the delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation problem in multipath routing. First of all, based on the network calculus theory, a deep analysis on the upper bound of delay in the single route transmission was done, and deduce the upper bound formulation of delay and jitter in multiple route transmission, and find out the maximum income rate satisfying the delay constraint for a route. Then, based on the upper bound of delay and jitter, a delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation algorithm DCJOTA was proposed, which distributes the traffic to a route in proportion to its maximum income rate, and does some adjustment to optimize the jitter. At last, the implement methods of DCJOTA were given to run in NS2, and simulation is done. Experimental results show that the DCJOTA embedded multipath routing protocol DCJO-AOMDV outperforms AOMDV at the term of end-to-end delay and jitter. Compared with AOMDV, DCJO-AOMDV has made the end-to-end delay and jitter decreased by 3.9% and 24.5% respectively. But, DCJOTA puts a litter complexity on the routing protocol, which leads to the network throughput decreased by 1.7% in DCJO-AOMDV.

**Key words:** wireless mesh network; multipath routing; traffic allocation; network calculus

收稿日期: 2009-08-18; 修回日期: 2010-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873082); 湖南省科技计划基金资助项目 (2008FJ3185); 湖南省教育厅基金资助项目 (08C510)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60873082); The Science and Technology Program in Hunan Province (2008FJ3185); The Scientific Research Fund of Hunan Provincial Education Department (08C510)

## 1 引言

无线 mesh 网络(WMN, wireless mesh network)是重要的无线宽带接入技术,其体系结构由三层构成<sup>[1]</sup>,即 Internet 接入层、无线骨干层和终端接入层。无线骨干层介于 Internet 与终端用户之间,由 mesh 路由器组成,其中有一些节点与 Internet 通过有线电缆相连,称之为网关节点,是连通无线 mesh 网与 Internet 的桥梁。无线骨干层为终端用户提供无线多跳传输以及接入 Internet 服务,其网络特点与 ad hoc 网络相似。与 ad hoc 网络相比,无线骨干层中的节点移动性较弱,一般没有能量限制,拓扑变化较小。无线骨干层是影响无线 mesh 网性能的关键,本文关注无线 mesh 网中的无线骨干层的网络服务质量,下文提及的无线 mesh 网如未特别说明均指其无线骨干层。

由于无线 mesh 网与 ad hoc 网络存在一定的相似性,ad hoc 网络中的路由协议经过适当修改可以在无线 mesh 网中使用。近年来,国内外专家学者提出了一些适用于无线 mesh 网的路由协议,如文献[2~7]等提出的各具特点的路由协议。在这些路由协议中,根据使用单条还是多条路径,可以分为单路径路由协议和多路径路由协议。单路径路由协议实现简单,易于管理和配置。但是,容易出现过多的流量集中于某条路径,形成网络流量的“热点”区域,从而导致网络性能及其稳定性下降,网络服务质量难于保证。多路径路由协议通过建立多条路径来传输数据流,网络流量分布在多条路径上,实现网络的负载均衡,从而提高网络吞吐量,降低网络传输的分组丢失率、时延和抖动等性能指标,优化网络服务质量。与单路径路由协议相比,多路径路由协议能达到更好的网络服务质量<sup>[8]</sup>。因此,在实时性要求高的网络传输中,使用多路径路由协议是更好的解决方案。

当前,一些专家学者提出了适用于无线 mesh 网的多路径路由协议<sup>[3,6,7]</sup>。这些研究工作侧重于如何实现多路径的发现、如何选择发送路径以及路径的维护机制等问题。但是,在多路径路由协议中,如何分配各路径上的发送流量也是不能忽视的问题,路径间的流量分配对网络传输的服务质量有重要影响。本文研究多路径路由协议中路径间流量分配优化问题,以实现无线 mesh 网中多媒体应用的服务质量保证。多媒体应用实时性高,对网络传输的服务质量有严格的要求。网络时延及其抖动则是

多媒体应用实时性要求的首要服务质量因素。由于无线链路带宽有限、传输可靠性低,无线 mesh 网中实现多媒体应用的服务质量保证面临很大困难。本文尝试基于时延及其抖动提高无线 mesh 网中的多媒体应用服务质量,提出多媒体应用中多路径传输的时延约束及抖动优化问题,应用网络演算理论分析多路径传输中的时延及路径间时延抖动上界,并基于理论分析提出时延约束抖动优化的路径间流量分配算法。

## 2 相关工作及问题描述

在无线 mesh 网的体系结构中,网关节点是无线 mesh 网连接 Internet 的桥梁,网络中大部分流量汇聚于网关。网关常常成为网络性能的瓶颈<sup>[9]</sup>,网关与 mesh 路由器之间的数据传输服务质量是影响终端用户 QoS 的关键<sup>[1]</sup>。

为降低网关与目的 mesh 路由器之间的传输时延及其抖动,保证多媒体应用的服务质量,在无线 mesh 网中使用多路径路由协议是更好的选择。因为与单径路由相比,多径路由能够实现更好的网络服务质量,如提高网络吞吐量、网络流量的负载均衡、降低端到端的传输时延等。鉴于多路径路由协议在提高网络服务质量方面的重要性,无线 mesh 网中多路径路由协议的研究是当前热门的研究课题<sup>[1]</sup>。

### 2.1 相关工作及其分析

近年来,国内外专家学者提出了一些适用于无线 mesh 网的多路径路由协议,这些研究工作强调路由协议的机制和路径选择及维护策略,较少地讨论路径之间流量的分配问题。已有的大部分多路径路由协议采用路径流量等价分配或者根据路径性能按比例分配的策略。

针对多路径路由协议中路径间流量分配问题,一些研究工作提出了如动态拓扑自适应<sup>[10]</sup>、拥塞感知<sup>[11]</sup>、FEC 编码纠错<sup>[12]</sup>等流量分配算法。这些研究工作对流量分配带来的时延及抖动欠缺有效的分析和研究。但是,多路径路由协议中路径流量分配策略对端到端的传输时延及抖动有很大的影响。如图 1 所示,发送端与接收端之间存在 2 条路径,路径 1 和路径 2 具有不同传输能力。如果 2 个背靠背数据分组分别经过 2 条路径到达接收端,它们所经历的时延分别为  $D_1$  和  $D_2$ 。由于多媒体应用实时性要求高,而且对诸如语音、视频图像等有清晰度的要求,因此接收端的多媒体应用对  $D_1$  和  $D_2$  有严格

的要求：1)  $D_1$  和  $D_2$  不能超过时延上限  $\Delta$ ，否则会导致应用的“不流畅”的现象， $\Delta$  的取值与具体的应用系统有关系；2)  $D_1$  与  $D_2$  的差异  $|D_1 - D_2|$  应尽可能的小，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。

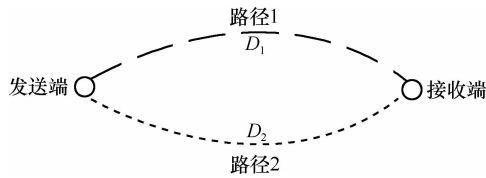


图 1 两路径的流量分配问题

图 1 中，数据分组在两路径上的传输时延  $D_1$  和  $D_2$  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。由于路径 2 的传输能力较差，为其分配较多的流量将导致  $D_2$  急剧增大。但对于传输能力较强的路径 1，适当增加其传输流量对传输时延  $D_1$  的影响不是很大。

因此，为满足无线 mesh 网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时延差别，后者本文称之为抖动。路径流量分配策略应尽可能优化路径间的时延及其抖动。

### 2.2 问题描述

**定义 1** 时延。

对发送端发送的任一数据分组  $P_i$ ，其离开发送端的时间为  $T_s$ ，到达接收端的时间为  $T_r$ ，则其网络传输时延  $D_i = T_r - T_s$ 。为保证多媒体应用的流畅性， $D_i$  不能高于服务质量要求的上界  $\Delta$ 。

**定义 2** 抖动。

假设多路径路由中，发送端与接收端之间有  $m$  条路径可同时传输数据分组，令  $m$  个数据分组同一时刻从发送端出发分别通过各路径到达接收端，时延分别为  $D_1, D_2, \dots, D_m$ ，那么路径间的时延抖动  $J_m$  为这  $m$  个数据分组的网络时延差别的最大值： $J_m = \max_{1 \leq i < j \leq m} |D_i - D_j|$ 。为保证视频图像的清晰度，应降低路径间的时延抖动  $J_m$ 。

本文针对无线 mesh 网中的多媒体应用，研究多路径路由中的路径流量分配问题，以期优化网络传输的时延和抖动。因此，本文研究内容的可描述为一个优化问题：

$$\begin{aligned} & \min J_m \\ & s.t. \\ & D_i \leq \Delta \quad (1 \leq i \leq m) \end{aligned}$$

即在保证数据分组通过任一路径的时延满足应用要求的前提下，尽可能地降低路径间的时延抖动。下文将对无线 mesh 网中多路径传输的网络时延和抖动展开分析，并提出满足时延要求且抖动优化的路径流量分配算法。

### 3 基于网络演算的时延及抖动分析

网络演算(network calculus)是新近发展起来的一种新的网络队列系统性能定量分析的、重要而有效的数学工具，广泛应用于对网络时延及抖动、数据积压等服务质量因素的分析<sup>[13~15]</sup>。最近，网络演算理论在无线网络中的应用也取得了一些研究成果<sup>[16~18]</sup>，为无线 mesh 网中的时延及抖动分析提供了理论基础。

网络演算理论使用到达曲线、服务曲线等工具描述网络数据流动的一系列过程，推导出数据通过节点产生的时延、抖动、数据积压等 QoS 性能的确上界，网络演算理论的详细描述请参考文献[19]。本文应用网络演算理论分析多路径路由协议中各路径的时延及抖动，为多路径数据传输中时延及抖动的优化提供理论基础。

#### 3.1 网络演算基础

网络节点应对进入的通信流进行通信量的管制，使得网络节点缓存空间不溢出以及数据传输的 QoS 得到保证。如图 2 所示，节点通信量的管制如同漏桶一样，在容量为  $\sigma$ ，流出速率为  $\rho$  的漏桶中，必须对通信流入量  $R(t)$  进行管制，使得任意时刻通信储存量  $x(t)$  不会溢出漏桶。如果到达通信量不会导致漏桶溢出，则称通信量  $R(t)$  满足参数为  $(\sigma, \rho)$  的漏桶管制。

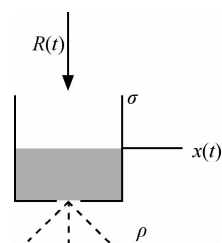


图 2 节点漏桶管制

**定义 3** 累积函数。

累积函数  $R(t)$  定义为一个通信流在时间间隔  $[0, t]$  内所传输的数据量总和。

**定义 4** 到达曲线。

给定一个函数  $\alpha(t)$ ，且为广义递增函数，若通

信流的累积函数  $R(t)$  对任意时刻  $s$  和  $t$  满足以下 2 个等价条件之一: 1)  $R(t) - R(s) \leq \alpha(t-s)$ ; 2)  $R \leq R \otimes \alpha$ , 则称  $\alpha(t)$  为  $R(t)$  的到达曲线,  $\otimes$  为最小加卷积运算。

**定义 5** 最小加卷积。

对任意的广义增函数  $f$  和  $g$ , 它们的最小加卷积  $\otimes$  定义为

$$(f \otimes g)(t) = \inf_{0 \leq s \leq t} [f(t-s) + g(s)]$$

**定理 1** 如果通信流  $R(t)$  受参数为  $(\sigma, \rho)$  的漏桶管制, 则  $R(t)$  受到达曲线  $\alpha(t) = \sigma + \rho t$  的约束。

由于任一数据分组不能无限期停留在某一网络节点上, 其滞留时延存在一上界  $T$ 。对于网络节点的流入通信流  $R(t)$ , 假设其流出量为  $R^*(t)$ , 那么对任意的  $s \geq T$ , 两者必须满足下式:

$$R^*(s) \geq R(s-T)$$

可见, 为了保证通信流的时延要求, 网络节点必须为每一通信流提供必要的服务能力。在网络演算理论中, 以节点服务曲线来描述其服务特性。

**定义 6** 服务曲线。

给定一个通信流的累积函数  $R(t)$ , 对于广义增函数  $\beta(t)$ , 且  $\beta(0)=0$ , 若通信流的输出函数  $R^*(t)$  满足  $R^* \geq R \otimes \beta$ , 则称该系统为通信流提供了服务曲线  $\beta(t)$ 。

端到端的通信流往往经过了多个网络节点, 这些网络节点作为整体提供的服务曲线可由各个网络节点的服务曲线计算得到。

**定理 2** 串联服务曲线。

假设一个通信流依次穿过服务曲线分别为  $\beta_1(t), \beta_2(t), \dots, \beta_n(t)$  的  $n$  个网络节点, 则这  $n$  个网络节点串联后提供的总服务曲线称为串联服务曲线  $\beta(t)$ , 且满足  $\beta = \beta_1 \otimes \beta_2 \otimes \dots \otimes \beta_n$ 。

根据通信流受约束的到达曲线和节点提供的服务曲线, 可计算得到通信数据在节点中的滞留时延。

**定理 3** 延迟上界。

给定一个流, 进入系统时被到达曲线  $\alpha(t)$  约束, 通过系统时系统提供服务曲线  $\beta(t)$ , 那么, 通信流在任意时间  $t$  的时延  $d(t)$  满足式(1), 其中  $h(\alpha, \beta)$  也称作曲线  $\alpha$  和  $\beta$  之间的水平偏差。

$$d(t) \leq \sup_{t \geq 0} \{ \inf_{d \geq 0; \alpha(t) \leq \beta(t+d)} \} = h(\alpha, \beta) \quad (1)$$

### 3.2 路径时延及抖动分析

在多路径路由协议中, 发送端与接收端之间存在多条传输路径。如图 3 所示, 无线 mesh 网中网关  $g$  与目的 mesh 路由器  $d$  之间存在  $m$  条路径, 进入数据流  $R(t)$  受到达曲线  $\alpha(t) = \sigma + \rho t$  的约束,  $\sigma$  为突发通信量,  $\rho$  为数据流长期平均速率。网关节点  $g$  通过调度策略把数据流  $R(t)$  分成  $m$  条细流  $R_1(t), R_2(t), \dots, R_m(t)$ , 且有:

$$R(t) = R_1(t) + R_2(t) + \dots + R_m(t)$$

各细流分别通过  $m$  条路径到达目的 mesh 路由器  $d$ 。为确保数据分组到达接收端的时延满足要求, 假设任一细流  $R_i(t)$  受参数为  $(\sigma_i, \rho_i)$  的漏桶管制, 即其到达曲线为  $\alpha_i(t) = \sigma_i + \rho_i t$ , 且有:

$$\begin{cases} \alpha(t) = \alpha_1(t) + \alpha_2(t) + \dots + \alpha_m(t) \\ \sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \dots + \sigma_m \\ \rho = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_m \end{cases} \quad (2)$$

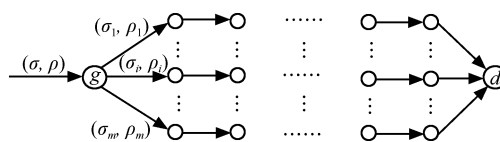


图 3 多路径传输模型

对其中的任一路径  $i$ , 假设路径上有  $n$  个节点, 根据节点间无线链路的状况, 每个节点为数据流提供一定的服务能力。如图 4 所示, 通信流  $R_i(t)$  受到达曲线  $\alpha_i(t) = \sigma_i + \rho_i t$  约束, 各中间节点提供的服务曲线为  $\beta_i^1, \beta_i^2, \dots, \beta_i^n$ 。根据定理 2, 路径  $i$  中  $n$  个中间节点提供的串联服务曲线为  $\beta_i = \beta_i^1 \otimes \beta_i^2 \otimes \dots \otimes \beta_i^n$ 。

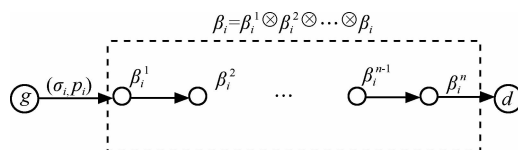


图 4 串联服务曲线

对任一网络节点, 不管采用何种队列调度算法, 都可以假定节点对数据流提供速率-延迟服务曲线作为对数据流的服务保证<sup>[19]</sup>。由此可得, 路径中节点提供的服务曲线为式(3)。其中,  $R_i^j$  为节点所提供的服务速率,  $T_i^j$  为数据分组在节点的服务时延。

$$\beta_i^j(t) = R_i^j [t - T_i^j]^+ = \begin{cases} R_i^j [t - T_i^j], & t > T_i^j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

根据速率—延迟函数的特点, 可以计算出路径  $i$  上中间节点的串联服务曲线  $\beta_i(t)$ 。如式(4)所示。

$$\begin{cases} \beta_i(t) = \beta_i^1 \otimes \beta_i^2 \otimes \cdots \otimes \beta_i^n(t) = R_i[t - T_i]^+ \\ R_i = \min\{R_i^1, R_i^2, \dots, R_i^n\} \\ T_i = T_i^1 + T_i^2 + \cdots + T_i^n \end{cases} \quad (4)$$

数据分组在传输过程中的延迟分为固定延迟和可变延迟, 固定延迟包括发送时延和传播时延, 而可变延迟则就是由节点的数据积压导致的排队时延。对路径  $i$ , 假设其固定时延为  $f_i$ , 可变时延为  $v_i(t)$ , 那么路径时延  $d_i(t)$  可表示为

$$d_i(t) = f_i + v_i(t) \quad (5)$$

对稳定的排队系统, 排队时延上界为其最大繁忙间隔(maximum busy period)<sup>[20, 21]</sup>。因此, 受到达曲线  $\alpha_i(t) = \sigma_i + \rho_i t$  约束的数据流, 其队列时延上界可表示为

$$v_i^{\text{bound}} = \inf\{t \geq 0: \alpha_i(t) - R_i t \leq 0\} = \frac{\sigma_i}{R_i - \rho_i} \quad (6)$$

因此, 路径  $i$  的可变时延满足:

$$v_i(t) \leq \frac{\sigma_i}{R_i - \rho_i} \quad (7)$$

另外, 节点的发送时延与无线链路传播时延是相对不变的, 数据分组在路径  $i$  的固定时延与路径跳数成正比, 可表示为式(8), 其中  $h_i$  为路径跳数, 常数  $c$  为一个节点的发送时延和一条无线链路的传播时延之和。

$$f_i = h_i c \quad (8)$$

由式(5)~式(8), 可得到数据分组在路径  $i$  的传输时延上界  $D_i$  为式(9)。

$$D_i = h_i c + \frac{\sigma_i}{R_i - \rho_i} \quad (9)$$

对任意 2 条路径, 其时延之差满足式(10)。

$$|d_i - d_j| \leq |f_i - f_j| + \max\left(\frac{\sigma_i}{R_i - \rho_i}, \frac{\sigma_j}{R_j - \rho_j}\right) \quad (10)$$

根据时延抖动的定义, 由式(10)可得图 3 中  $m$  条路径的时延抖动上界  $J_m$  为

$$\begin{aligned} J_m &= \max_{1 \leq i < j \leq m} |d_i - d_j| \\ &\leq \max_{1 \leq i, j \leq m \text{ and } i \neq j} |f_i - f_j| + \max_{1 \leq k \leq m} \left(\frac{\sigma_k}{R_k - \rho_k}\right) \\ &= \max_{1 \leq i, j \leq m \text{ and } i \neq j} |h_i - h_j| c + \max_{1 \leq k \leq m} \left(\frac{\sigma_k}{R_k - \rho_k}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

对给定的  $m$  条路径, 路径间时延抖动上界  $J_m$  的前一部分为固定值, 后者为可变值。因此, 降低路径间时延抖动关键在于使后一部分值减小。

## 4 时延约束抖动优化的流量分配算法

### 4.1 算法描述

基于上述分析, 得到了数据分组经过各路径的时延上界以及路径间的抖动上界。对发送端与接收端存在的  $m$  条数据传输路径 (如图 3 所示), 为保证多媒体应用的实时性, 各路径时延必须满足应用要求, 如式(12)所示。其中  $\Delta$  为多媒体应用容许的最大时延。

$$h_i c + \frac{\sigma_i}{R_i - \rho_i} \leq \Delta \quad (1 \leq i \leq m) \quad (12)$$

由式(12)可得:

$$\rho_i \leq R_i - \frac{\sigma_i}{\Delta - h_i c} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (13)$$

其中,  $\rho_i$  为到达流受约束的平均速率, 也即是路径最大容许流入速率。从式中可见, 当路径的服务速率越大, 则满足时延要求的数据流入容许速率就越大。

联立式(2)和式(13)可得:

$$\rho = \sum_{1 \leq i \leq m} \rho_i \leq \sum_{1 \leq i \leq m} R_i - \sum_{1 \leq i \leq m} \frac{\sigma_i}{\Delta - h_i c} \quad (14)$$

式(14)表明, 图 3 中进入节点  $g$  的总数据流受约束的速率不能超过某一阈值, 否则将会造成数据积压在某个节点上, 导致路径时延超过限定值  $\Delta$ 。

本文研究时延及抖动优化的路径流量分配策略, 在满足时延要求的前提下, 尽可能地降低路径间的时延抖动, 以提高多媒体视频图像的清晰度。本文研究的路径流量分配问题可归结为下述规划优化问题。

$$\begin{aligned} &\min \max_{1 \leq k \leq m} \left(\frac{\sigma_k}{R_k - \rho_k}\right) \\ &s.t. \\ &\begin{cases} \rho_i \leq R_i - \frac{\sigma_i}{\Delta - h_i c} & (1 \leq i \leq m) \\ \rho_1 + \rho_2 + \cdots + \rho_m = \rho \\ \sigma_1 + \sigma_2 + \cdots + \sigma_m = \sigma \end{cases} \end{aligned}$$

上述线性规划问题难于求解,而且求解复杂性较高,难于应用到实际中。本文提出一种简单有效的贪婪算法求该问题近似解。为简化问题,本文假设所有节点及无线链路具有相同发送和传播时延,且 $\sigma_1 = \sigma_2 = \dots = \sigma_m = \rho/m$ 。本文提出的时延约束且抖动优化的路径流量分配算法(DCJOTA, delay-constrained and jitter-optimized traffic allocation)可描述如下。

输入:  $\rho$ 、 $\sigma$ 、 $\Delta$ 、 $m$ 、 $R_i(1 \leq i \leq m)$ 等参数;

输出: 各路径进入数据流的受限速率  $\rho_i$ ;

步骤:

1) 计算各路径约束速率  $\rho_i$  的上限值

$$R_i - \frac{\sigma_i}{\Delta - h_i c} \quad (1 \leq i \leq m);$$

2) 各路径约束速率(最大容许流入速率) $\rho_i$  按其上限值按比例取值,即

$$\rho_i = \frac{\left( R_i - \frac{\sigma_i}{\Delta - h_i c} \right) \rho}{\sum_{1 \leq j \leq m} R_j - \frac{\sigma_j}{\Delta - h_j c}} \quad (1 \leq i \leq m) \quad (15)$$

3) 对分配方案( $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m$ ), 根据式(6)计算各路径队列时延上界  $v_i^{\text{bound}}$ ;

4) 对具有最大和最小队列时延上界( $v_{\max}^{\text{bound}}$  和  $v_{\min}^{\text{bound}}$ )的 2 条路径, 调整约束速率  $\rho_{\max}$  和  $\rho_{\min}$ , 在满足式(13)的条件下, 减小  $\rho_{\max}$  增大  $\rho_{\min}$  以减小小路径间的抖动  $\max_{1 \leq k \leq m} \left( \frac{\sigma_k}{R_k - \rho_k} \right)$ ;

5) 反复执行步骤 4) 直至  $\max_{1 \leq k \leq m} \left( \frac{\sigma_k}{R_k - \rho_k} \right)$  不能再减小为止。

#### 4.2 算法实现关键

算法在发送端运行, 所需数据在路由发现及维护中得到, 需要采集的数据及采集方法有:

1) 各路径跳数  $h_i$  ( $1 \leq i \leq m$ ,  $m$  为路径数量), 路由发现阶段可以得到;

2) 发送和传播时延  $c$ , 可以通过测量空闲路径(排队时延几乎可以忽略)的时延, 并除以路径跳数得到;

3) 路径中各节点的最小服务速率  $R_i(1 \leq i \leq m)$ , 给每个节点设置一个速率计算定时器, 每隔一定时间计算无线链路的平均速率, 路由数据分组中只记录节点的最小服务速率, 并通过路由维护机制反馈

给发送端;

4)  $\rho$  为数据流进入发送端的长期平均速率,  $\sigma$  为突发通信量, 在本文实验中为设定参数, 实际中可在发送端上设置定时器采集得到。

发送端收集到上述数据后, 应用 DCJOTA 算法即可计算出各路径数据流的约束速率。最后, 发送端根据数据流约束速率的比例把数据分组调度到各路径, 从而实现路径间的流量分配。算法每隔一定时间运行一次, 以反映网络的最新变化。

## 5 仿真实验

本文应用 NS-2 模拟器<sup>[22]</sup>, 在 AOMDV<sup>[2]</sup>路由协议中实现 DCJOTA 算法, 形成新的多路径路由协议 DCJO-AOMDV 协议。在仿真实验中, 比较 DCJO-AOMDV 协议与 AOMDV 协议的性能, 评价指标包括端到端时延、抖动和吞吐量。

### 5.1 实验环境

模拟实验中, 首先随机生成 50 个节点的网络拓扑, 并创建 10 条 CBR 数据流, 用不同的发送速率来模拟各种网络负载。然后, 分别运行 DCJO-AOMDV 和 AOMDV 协议进行数据传输。最后, 对它们在各种网络负载下的端到端的分组传送时延及其抖动进行比较。

实验通过发送一系列的测试数据分组来计算端到端的时延及其抖动。为了准确得到实验数据, 在数据分组的头部增加一个域 `sendTime_`, 用来记录数据分组的发出时间, 目的端收到后用当前时间减去数据分组的 `sendTime_`, 即可得到该数据分组的传输时延。网络端到端时延为所有数据分组传输时延的平均值。时延抖动则为连续的若干个(实验中设定为 20 个, 假设一个视频帧最多由 20 个数据分组构成)数据分组传输时延的最大差值。NS-2 的仿真参数: 实验场景, 1 500m×1 500m; 节点数, 50; 连接数, 12; 数据分组大小, 512 字节; 接口队列长度, 50; 队列类型, Queue/DropTail/PriQueue; MAC 层协议, 802.11 协议; 节点传输范围, 250m; 信道传输最大速率, 2Mbit/s; 模拟时间, 100s。

### 5.2 实验结果

分别在不同的网络负载下运行 DCJO-AOMDV 和 AOMDV 协议, 测量网络的端到端时延及其抖动均值, 得到的结果如图 5 和图 6 所示。

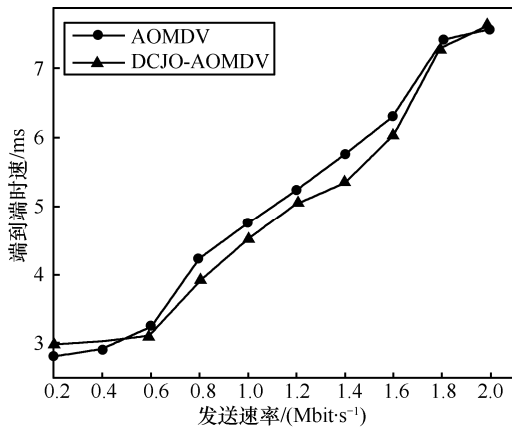


图 5 网络的端到端平均时延

网络端到端时延情况如图 5 所示，在网络低负载时，由于 DCJO-AOMDV 协议需要一些额外的开销，AOMDV 协议表现稍好；但是，随着网络负载的增加，DCJO-AOMDV 协议可以取得较低的网络端到端时延；当发送速率增大到 1.8Mbit/s 和 2.0Mbit/s 时，两协议中取得的端到端时延趋向一致，我们的解释是，此时由于各 CBR 数据流增加到网络能承受的极限，网络负载也达到极限，时延已无优化的空间，DCJOTA 算法不能实现其效果。平均来看，与 AOMDV 协议相比，DCJO-AOMDV 协议取得的端到端时延降低 3.9%。

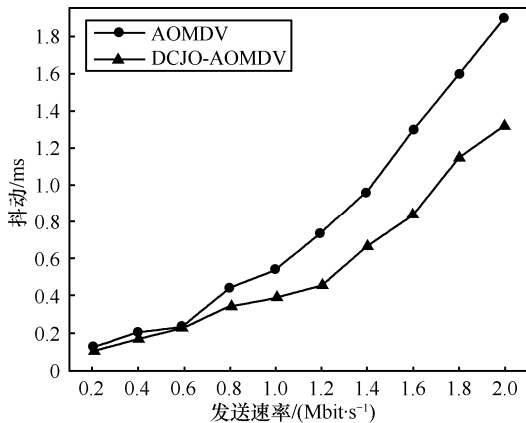


图 6 网络的端到端平均时延抖动

网络端到端时延抖动情况如图 6 所示，在网络低负载时，网络传输具有较好的稳定性，两协议表现几乎一致；随着网络负载的增加，DCJO-AOMDV 协议表现好于 AOMDV 协议；平均来看，与 AOMDV 协议相比，DCJO-AOMDV 协议可以降低端到端时延抖动达到 24.5%。可见，DCJOTA 算法在优化端到端时延抖动方面实现了较好的效果。

由于 DCJO-AOMDV 协议中增加了时延及其抖

动的优化算法 DCJOTA，其复杂性也随之增加，协议控制开销也稍有增加，两协议的端到端吞吐量比较如图 7 所示。

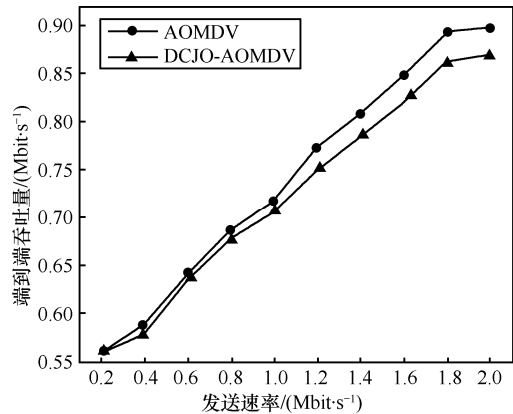


图 7 网络的端到端吞吐量

如图 7 所示，DCJOTA 算法带来的负面影响是可以接受的。图中数据采集自 10 条 CBR 数据流在各种发送速率下总吞吐量的情况，吞吐量定义为单位时间内，分组经过网络传送并成功到达目的端的比特数。如图 7 所示，运行两协议下的网络吞吐量非常接近，从数值统计来看，与 AOMDV 协议相比，DCJO-AOMDV 协议下的网络吞吐量减少 1.7%。

### 6 结束语

本文首先分析了无线 mesh 网中多路径协议及其路径流量分配策略的重要性，基于网络演算理论推算出路径时延上界及路径间时延抖动上界；然后，利用路径时延及路径间时延抖动的上界值，提出满足时延约束、抖动优化的路径流量分配算法 DCJOTA，并分析了算法实现的可行性和方法；最后，把 DCJOTA 算法应用到 AOMDV 路由协议中，并在 NS2 网络模拟器中验证了算法的有效性。仿真实验表明，DCJOTA 算法能实现路径时延及其抖动的优化，在正常的网络负载下，与 AOMDV 路由协议相比，使用了 DCJOTA 算法的路由协议 DCJO-AOMDV 具有更好的网络端到端时延和抖动；另外，由于 DCJOTA 算法带来的复杂性的增加，DCJO-AOMDV 路由协议下的网络吞吐量有所下降。但是，考虑到算法在时延及其抖动方面得到的优化，由此实现对多媒体应用服务质量的提升，我们认为网络吞吐量的稍许下降仍然是可以接受的。

## 参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, WANG X D. A survey on wireless mesh networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 2005, 43(9):23-30.
- [2] MARINA M K, DAS S R. On-demand multipath distance vector routing in ad hoc networks[A]. Ninth International Conference on Network Protocols[C]. 2001. 14-23.
- [3] MOSKO M, GARCIA J J. Multipath routing in wireless mesh networks[A]. WIMESH'05[C]. Santa Clara, CA, 2005.
- [4] DRAVES R, PADHYE J, ZILL B. Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks[A]. ACM Mobicom[C]. 2004.
- [5] 沈强, 方旭明. 无线 mesh 网中一种基于综合准则的 DSR 扩展路由方法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 614-620.  
SHEN Q, FANG X M. An integrated metrics based extended dynamic source routing protocol in wireless mesh networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 35(4):614-620.
- [6] 郭晓峰, 陈跃泉, 陈贵海. 一种累计多路径的移动自组网络路由策略[J]. 软件学报, 2004, 15(4):594-603.  
GUO X F, CHEN Y Q, CHEN G H. An aggregated multipath routing scheme for ad hoc networks[J]. Journal of Software, 2004, 15(4):594-603.
- [7] NANDIRAJU N S, NANDIRAJU D S, AGRAWAL D P. Multipath routing in wireless mesh networks[A]. IEEE International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)[C]. 2006. 741-746.
- [8] BANNER R, ORDA A. Multipath routing algorithms for congestion minimization[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(2):413-424.
- [9] WU X B, LIU J C, CHEN G H. Analysis of bottleneck delay and throughput in wireless mesh networks[A]. IEEE MASS[C]. 2006. 765-770.
- [10] 安辉耀, 卢锡城, 彭伟等. MANET 中基于动态拓扑的多路径自适应流量分配算法[J]. 通信学报, 2006, 27(7):20-26.  
AN H Y, LU X C, PENG W, *et al.* Adaptive traffic distributing based on dynamic topology for multipath routing in MANET[J]. Journal on Communications, 2006, 27(7):20-26.
- [11] 李姗姗, 廖湘科, 朱培栋等. 无线传感器网络中一种拥塞感知的多路径流量分配算法[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(3):86-88.  
LI S S, LIAO X K, ZHU P D, *et al.* Congestion-aware traffic allocation for multi-path routing in wireless sensor networks[J]. Computer Engineering and Science, 2008, 30(3):86-88.
- [12] 王辉, 单剑锋, 俞能海. 一种新的无线 Ad hoc 网络中的多路径路由[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(2):125-131.  
WANG H, SHAN J F, YU N H. A novel multipath routing and traffic distribution algorithm in wireless ad hoc network[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(2):125-131.
- [13] 陈志刚, 张连明, 邓晓衡等. 基于分形漏桶整形器的通用处理器共享系统性能分析[J]. 通信学报, 2006, 27(6):29-35.  
CHEN Z G, ZHANG L M, DENG X H, *et al.* Performance analysis of generalized processor sharing based on fractal leaky bucket regulators[J]. Journal on Communications, 2006, 27(6):29-35.
- [14] 张信明, 陈国良, 顾钧. 基于网络演算的流量整形模型[J]. 软件学报, 2002, 13(12):2225-2230.  
ZHANG X M, CHEN G L, GU J. A traffic shaping framework based on network calculus[J]. Journal of Software, 2002, 13(12):2225-2230.
- [15] 王子君, 许维胜, 王中杰. 控制网络的确定性延迟演算理论研究[J]. 电子学报, 2006, 34(2):380-384.  
WANG Z J, XU W S, WANG Z J. Delay model of network control systems based on network calculus[J]. Chinese Journal of Electronics, 2006, 34(2):380-384.
- [16] AGHAREBPARAST F, LEUNG V C M. Modeling wireless link layer by network calculus for efficient evaluations of multimedia QoS[A]. IEEE International Conference on Communications[C]. 2005. 1256-1260.
- [17] AGHAREBPARAST F, LEUNG V C M. Optimal shaping for transmission over wireless fading channels[A]. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks[C]. 2007. 1-4.
- [18] 李庆华, 陈志刚, 张连明. 基于网络演算的无限自组网 QoS 性能确定上界研究[J]. 通信学报, 2008, 29(9):32-39.  
LI Q H, CHEN Z G, ZHANG L M. The QoS performance upper bounds research about wireless ad hoc network based on network calculus[J]. Journal on Communications, 2008, 29(9):32-39.
- [19] CRUZ R L. A calculus for network delay, part I and II[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1):114-141.
- [20] MAO S W, PANWAR S S, HOU Y T. On minimizing end-to-end delay with optimal traffic partitioning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(2):681-690.
- [21] CHANG C S. Stability, queue length, and delay of deterministic and stochastic queueing networks[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(5):913-931.
- [22] FALL K, VARADHAN K. NS manual[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nasam/ns/doc,2001>.

## 作者简介:



陈志刚 (1964-), 男, 湖南益阳人, 中南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络计算及分布式处理。

曾锋 (1977-), 男, 广东梅州人, 博士, 中南大学讲师, 主要研究方向为无线 mesh 网网络优化技术。

李庆华 (1976-), 男, 湖南湘乡人, 中南大学博士生, 宜春学院讲师, 主要研究方向为网络 QoS 优化。