

## Ad hoc 网络中基于时延最小自适应流量分配算法

冯美玉 程胜 张勖 丁炜  
(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 100876)

**摘要:** 由于 Ad hoc 网络带宽有限, 多径传输能提高有效带宽能力, 满足有一定带宽要求的 QoS 服务需求。该文从理论上论证了合理分配流量实现时延最小的可行性, 并提出了基于时延最小自适应流量分配算法(ATDBMD), 目的是科学利用多条路径, 满足 QoS 业务对时延的要求。仿真分析证明, ATDBMD 算法能降低平均时延和时延抖动, 并具有简单、快速自适应性和准确性等优点, 明显优于其它算法。

**关键词:** Ad hoc, 时延, 自适应, 流量分配, 权重

中图分类号: TN915.04

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)02-0277-04

## An Algorithm of Adaptive Traffic Distribution Based on Minimization of Delay in Ad hoc Networks

Feng Mei-yu Cheng Sheng Zhang Xu Ding Wei

(Continuing Education School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract** Because of limited bandwidth capacity in Ad hoc networks, multipath transport is appealing technique to satisfy the requirement of QoS services on bandwidth by improve available bandwidth. In this paper, the feasibility of reasonable distribution for minimization of delay is proved theoretically, and an algorithm of Adaptive Traffic Distribution Based on Minimize Delay(ATDBMD) in Ad hoc networks is proposed, aiming at the minimization of delay and delay jitter, to satisfy another requirement of QoS services on delay. Simulation result shows that ATDBMD wins other algorithm in simpleness, quickly adaptability and precisely control.

**Key words** Ad hoc, Delay, Adaptive, Traffic distribution, Weight

### 1 引言

近几年来, 一种不依赖于任何基础网络设施的移动通信网络—Ad hoc网络, 受到学术界广泛的关注, 主要的研究课题涉及路由, QoS, MAC协议和安全等方面, 为此, IETF设置专门的工作组(MANET)<sup>[1]</sup>负责Ad hoc网络中各种技术的性能分析和标准化工作。MANET设想能在Ad hoc网络中提供有线网络支持的有服务质量保证的各种业务, 但由于带宽有限、拓扑动态变化和无线链路可靠性差等现实因素的影响, 使Ad hoc网络中QoS富有挑战性。一般来讲, QoS问题主要集中在带宽和时延两方面, 到目前为止, 已有大量的研究工作致力于带宽和时延性能的提高。文献[2]提出了多条路径发现方案, 通过一次路由探测过程, 能在源目间发现多条不交叠的(node-disjoined)路径, 如图1所示, 弥补了Ad hoc网络中传统的路由协议(如AODV<sup>[3]</sup>, DSDV<sup>[4]</sup>等)只发现单条

路径的不足。由于多条路径的存在, 总的有效带宽得到提高, 可以将总流量多径分配, 实现负载均衡或降低时延。文献[5]提出了根据路径的拥塞程度(路径上的数据包个数)分配流量算法, 较单径而言, 有效地提高了总流量的平均时延性能。但是在文献[5]的方案中, 将网络的通信状态设想为静态不变的, 实际上网络的带宽能力和流量状况是实时变化的, 因此文献[5]中的静态流量分配算法不具备对实际网络的适应能力。文献[6,7]提出了有线网络中自适应流量工程的概念, 设计能适应根据网络现状的动态流量分配算法, 其性能较静态分配方案优越。但是文献[6]中的算法是面向有线网络的, 其接收和发送链路不会相互影响, 不适合链路共享的Ad hoc网络。本文研究无线链路特点, 建立Ad hoc网络中流量分配分析模型, 论证自适应流量分配可行性, 设计相应的算法, 目标是使总时延最小。文章最后对算法进行了仿真分析, 并与同类算法进行比较。

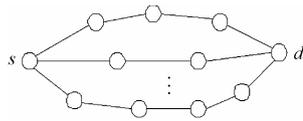


图1 流量分配网络模型

## 2 理论分析

对于Ad hoc网络中单个节点来说，通信时延来源于排队时延、处理时延和传输时延等。对于单个数据包而言，处理时延和传输时延较为固定，而排队时延受网络的拥塞程度影响，变化较大，是本文研究的主要对象。在排队论里，节点的接收和发送可以用马尔可夫M/M/1 服务模型<sup>[8,9]</sup>来分析。根据Little公式可知，数据包的平均时延符合以下关系：

$$D = \lambda / [\mu(\mu - \lambda)] \quad (1)$$

其中  $\lambda$  为数据包到达速率， $\mu$  为数据包发送速率，且  $\mu \geq \lambda$ 。

在有线网络中，路由节点的接收和发送能力固定不变，而且相互不影响。而在 Ad hoc 网络中，节点的接收和发送共享相同的无线信道，相互影响。设节点的带宽能力为  $B$  (接收和发送共享)，那么  $\mu = B - \lambda$ ，所以数据包的平均时延关系式变为

$$D = \frac{\lambda}{(B - \lambda)(B - 2\lambda)}, \quad \lambda \leq B/2 \quad (2)$$

平均时延和网络负载的关系如图2所示，当负载增加时，平均时延以不等的速度增加。从这里可以看出，可以通过控制负载大小来控制平均时延大小。对于一条路径而言，可以将其视为多个M/M/1 服务模型的串连复合，在源目节点间形成一个复合的M/M/1 服务模型。如果路径带宽能力为  $B$ ， $\lambda$  代表源节点在此路径上分配的流量速率， $\mu$  代表目的节点在此路径上的接收速率，那么源目间通信数据的平均时延同样可以用式(2)描述。

根据文献[2]，可以在通信的源端和目的端之间建立例如图1所示的多条路径，并且各条路径间没有交叉节点(源、目节点除外)，将路径表示为  $P_s^d = (P_{s,1}^d, P_{s,2}^d, \dots, P_{s,k}^d)$ 。设源节点

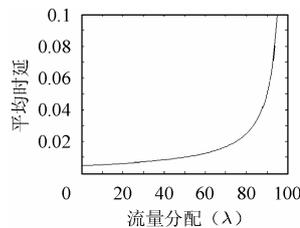


图2 平均时延与流量负载的关系

至目的节点的流量总速率为  $\lambda_s^d$ ，那么可以在各条路径上分配适当速率的流量  $(\lambda_{s,p_1}^d, \lambda_{s,p_2}^d, \dots, \lambda_{s,p_k}^d)$ ， $p_i \in P_s^d$ ，以求总流量的平均时延最小。假设各条路径上的背景流量速率为

$(\tau_{s,p_1}^d, \tau_{s,p_2}^d, \dots, \tau_{s,p_k}^d)$ ，必须在路径的总带宽能力里为其预留相应的  $\lambda$  和等量的  $\mu$ ，那么  $D_{p_i} = \lambda / [(B - 2\tau_{s,p_i}^d - \lambda_{s,p_i}^d)(B - 2\tau_{s,p_i}^d - 2\lambda_{s,p_i}^d)]$ 。如果不考虑接收节点对数据包重排序的影响，仅分析无序数据包序列的时延，那么可以定义总流量的平均时延如下：

$$D(\lambda_{s,p_1}^d, \lambda_{s,p_2}^d, \dots, \lambda_{s,p_k}^d) = \frac{\sum_{p_i \in P_s^d} D_{p_i} \lambda_{s,p_i}^d}{\sum_{p_i \in P_s^d} \lambda_{s,p_i}^d} \quad (3)$$

根据拉格朗日极值条件可知，解以下方程组可得极值点。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dD(\cdot)}{d\lambda_{s,p_1}^d} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{dD(\cdot)}{d\lambda_{s,p_k}^d} &= 0 \\ \lambda_s^d &= \lambda_{s,p_1}^d + \lambda_{s,p_2}^d + \dots + \lambda_{s,p_k}^d \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上方程组有  $k+1$  个方程， $k$  个变量  $(\lambda_{s,p_1}^d, \lambda_{s,p_2}^d, \dots, \lambda_{s,p_k}^d)$ ，所以解存在，即极值平均时延存在。图3为两条路径情况下流量分配实验结果。两条路径的带宽能力分别为 200 和 300，背景流量分别为 20 和 40，总的分配流量速率为 100。从图上可以看出，只要在各条路径上合理分配流量，即可获得较小的平均时延。由此说明，通过流量分配实现平均时延最小是有意义的。不论两条路径上有多少背景流量，只要源目间的两路径上的时延趋同时，即可实现端到端的平均时延最小。

## 3 ATDBMD 算法描述

将流量在多条路径上合理分配以达到平均时延最小目标，是动态规划理论中一般问题。只要建立合理时延数学方程，如式(3)，调整函数中的参数即可得到优化解。但是式(3)依赖于路径的有效带宽和背景流量，在 Ad hoc 网络中，它们都是动态变化且缺乏有效的办法测量，在实际网络中，仅根据式(3)来求优化解是不可行的。另外，式(3)仅可用于从理论

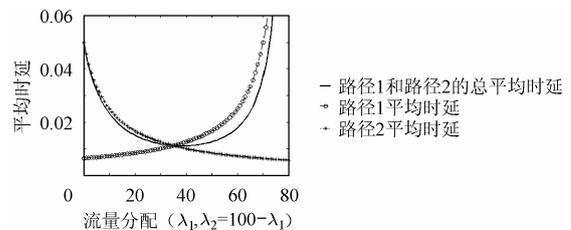


图3 两条路径的平均时延

上分析流量分配问题，实际网络的平均时延往往与式(3)有一定偏差，尤其是端到端的时延受最大时延的影响较大，根据式(3)进行动态规划是不准确的。本文提出可用于实际网络中

自适应流量分配算法, 将最小时延作为直接目标。鉴于路径时延是实际可测的, 我们使用 ICMP 测量路径的往返时间 (RTT: Round Time of Trip), 并将 RTT 作为流量分配唯一外部指示, 实现总流量在  $k$  条路径上动态分配。

为了防止 RTT 测量值的大幅波动引起流量分配的振荡, 我们采用下式对 RTT 进行整形。

$$RTT_{p_i} = (1-\alpha)RTT_{p_i}(t-1) + \alpha RTT_{p_i}(t) \quad (5)$$

算法描述如下:

第 1 步 根据文献[2]中的方法, 在源目间探测多条不交叠的路由路径;

第 2 步 沿各条路径发送 ICMP 探测包, 测量各条路径上的 RTT, 测量时间间隔为  $T$ 。待 ICMP 回应包返回后, 按照式(5)更新各条路径往返时间变量  $RTT_{p_i}$ ;

第 3 步 根据  $RTT_{p_i}$ , 按照式(6)更新各条路径上的流量分配权重  $W_{s,p_i}^d$ ;

第 4 步 根据流量分配权重  $W_{s,p_i}^d$  将总流量按相应速率

$$\lambda_{s,p_i}^d = W_{s,p_i}^d / \sum_{p_i \in P_s^d} W_{s,p_i}^d \text{ 分配到各条路径上, 速率控制方法如}$$

下文所述;

第 5 步 延迟一定时间  $t$  后, 回到第 2 步。

以上步骤重复进行, 直到通信结束。

由于网络通信的最小单元是数据包(packet), 无法用按比特来分配流量。如果仅根据 RTT 将数据包个数按相应比例分配, 势必会引起分配速率的不准确, 因为网络数据包虽然是按独立同分布的方式到达, 单数据包的大小各有不同, 所以按数据包个数计算速率是不可靠的。为了按要求准确地控制分配速率, 我们为每条路径设计一个分配权重  $W_{s,p_i}^d$ , 并为每条路径统计最近  $t$  时间段内分配的流量  $M_{p_i}$ , 那么  $W_{s,p_i}^d$  可按式(6)计算。每当分配一个数据包时, 选择权重最大的路径发送, 随后更新相应的  $M_{p_i}$ 。这样既可以准确控制分配比特速率, 又可保证每条路径上分发的数据包个数在时间上的均匀性, 避免突发。容易看出, 通过权重的引入, 路径上的流量分配速率为  $\lambda_{s,p_i}^d = W_{s,p_i}^d / \sum_{p_i \in P_s^d} W_{s,p_i}^d$ , 与唯一的外部指示

RTT 成反比。

$$W_{s,p_i}^d = \frac{1/(RTT_{p_i})}{\sum_{p_i \in P_s^d} 1/(RTT_{p_i})} \cdot \frac{1/(M_{p_i} + 1)}{\sum_{p_i \in P_s^d} 1/(M_{p_i} + 1)} \quad (6)$$

## 4 仿真分析

为了进一步验证 ATDBMD 算法的有效性, 我们建立仿真

实验进行验证分析。源节点到目的节点的路径为 3 条, 有效带宽均为 2Mbps, 每条路径上的背景流量速率分别为 100kbps, 200kbps 和 300kbps, 待分配流量速率为 500kbps, 如图 4 所示。数据包到达时间服从泊松分布, 数据包大小服从均匀分布, 最大长度为 512 字节。RTT 整形参数  $\alpha=0.2$ , 测量时间间隔  $T=5s$ , 流量统计时间段  $t=1s$ 。

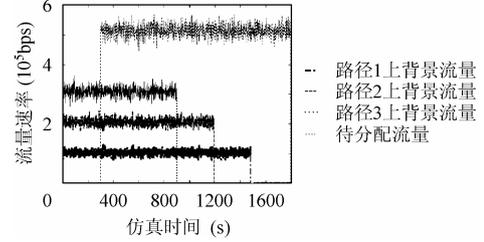


图 4 仿真原始数据流

图 5 为 RTT 整形函数对 RTT 的整形效应。从图中可以看出,  $\alpha=0.2$  时整形效果比较好, 整形后的 RTT 波动比较温和, 因此我们在仿真实验时选用  $\alpha=0.2$ 。

图 6 表现的是权重函数对分配速率的控制效果。实验时 3 条路径的 RTT 分别为  $1/2$ 、 $1/3$  和  $1/5$ 。从图上可以看出, 各条路径上分配流量速率准确地控制为 2:3:5, 而且分配速率随原始速率实时变化, 说明控制粒度比较细。因此, 采用权重方法对分配流量速率进行控制是非常可靠的。

图 6 中的待分配流量在各条路径上的分配速率如图 7 所示。当路径上存在背景流量时, 各条路径上分配的速率不同, 背景流量大的分配速率低, 这是因为较大的背景流量对时延的影响较大, 为此分配较小速率的流量可以降低分配流量的时延。当背景流量为 0 时, 各条路径上分配速率趋同, 这是因为各条路径的有效带宽相同, 相同的分配流量使时延相等, 到达平均时延最小, 符合拉格朗日极值定理, 如图 2 所示, 当时延相等时, 平均时延最小。从图 7 还可以看出, 当背景流量变化时, 分配流量迅速改变, 进一步验证了 ATDBMD 算法的实时特性, 算法收敛性越好, 流量分配效果越佳, 自适应性比较好。

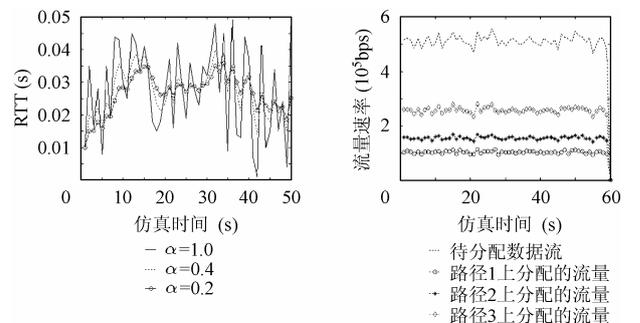


图 5 RTT 整形函数整形效应 图 6 权重对分配速率的控制

ATDBMD 算法的目标是总分配流量的平均时延最小, 为了说明该算法的优越性, 我们将其与平均分配算法进行仿

真比较。图8为两种算法平均时延对比,不难看出,ATDBMD算法的平均时延小于平均分配算法,特别是在有背景流量存在的情况下,优势更为明显。实际网络中总是存在若干背景流量的,所以ATDBMD有明显优势。另外,由于平均不分配算法不考虑路径的时延差异,造成时延抖动比较大。ATDBMD根据不同路径时延的不同来调整各自分配流量,使各条路径的时延均衡,有效降低了时延抖动,这是ATDBMD算法的另一个优势。

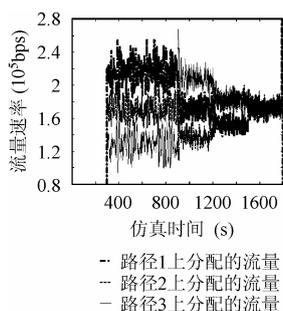


图7 数据流的分配结果

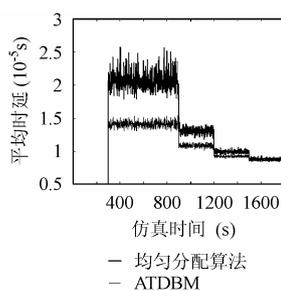


图8 不同算法分配流量  
平均时延比较

从理论分析和仿真结果来看,ATDBMD能使多路分发数据的平均时延最小化,这时,各个路径上的时延趋于相等,对网络通信有重大意义。由于各路时延趋同,ATDBMD有将相邻的数据包分发到不同路径上的特性,因此原始数据系列中相邻的数据包将趋于按原始顺序到达目的节点,有利于降低重排序的时间,提高对顺序敏感的通信方式的性能,TCP协议就是一个典型例子。在分发数据时,ATDBMD对路径上的时延敏感,通过反馈的方式使各路时延趋同,符合最小化理论分析结果。在通信过程中,平均时延动态逼近最小值,时延抖动随之降低,有利于支持对时延抖动敏感的业务,例如语音业务等。

在部署本文算法时,只需要在源节点维护到目的节点的各项路径的时延和流量分配信息即可,算法复杂度较为简单。在运行的过程中,源节点只需间歇探测各条路径上的时延即可,不需要获取网络拓扑和背景流量的信息,因此本文算法有较强的适应性。

## 5 结束语

本文针对Ad hoc网络多径路由中流量分配问题,提出旨在使平均时延最小化的自适应流量分配算法。理论分析证明,在多条路径上合理分配流量可以降低平均时延,但理论

模型需要多个参数,而且与实际网络性能有一定偏差,不能直接用于流量分配控制。本文提出简单易实现的ATDBMD算法,仅需要周期测量RTT作为外部指示即可实现流量的合理分配。仿真结果证明,ATDBMD算法收敛快,对分配速率控制准确,能有效降低分配流量的平均时延和时延抖动,优于同类其它算法。

## 参考文献

- [1] <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>[EB/OL]. 2004.
- [2] Mahesh K M, Das S R. On-demand multipath distance vector routing in Ad hoc networks [C]. Ninth International Conference on Network Protocols, Washington D.C., USA, 2001: 14 - 23.
- [3] RFC 3561. Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing [S]. July 2003.
- [4] RFC 3626. The Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Ad hoc Networks [S]. October 2003.
- [5] Sheng M, Li J, Shi Y. Routing protocol with QoS guarantees for Ad hoc network [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(1): 143 - 145.
- [6] 邵旭, 丁炜. 基于流量总时延最小的并行LSP自适应流量分配[J]. *电子学报*, 2003, 31(1): 4 - 7.
- [7] Elwaid A, Jin C, Low S. MATE: MPLS adaptive traffic engineering [C]. Proc. INFOCOM'01, Alaska, USA, Apr. 2001, 3: 22 - 26.
- [8] David M. Qos and traffic management in IP and ATM networks [M]. California, USA, The McGraw-Hill Companies, Inc, 2000: 203 - 226.
- [9] 陆传赉. 排队论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2000: 45 - 53.
- [10] Zhen Q Y, Srikanth V K, Satish K T. A framework for reliable routing in mobile Ad hoc networks [C]. INFOCOM'03, San Francisco California, USA, 2003, 1: 270 - 280.

冯美玉: 男, 1974年生, 博士生, 研究方向为Ad hoc网络、宽带通信、移动通信和网络安全。

程胜: 男, 1976年生, 讲师, 博士, 研究方向为软交换、Ad hoc网络、WiMax与移动通信。

张勛: 女, 1973年生, 讲师, 博士, 研究方向为Ad hoc网络、移动IP和宽带通信。

丁炜: 男, 1935年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带通信、网络安全、移动通信和NGN技术。