

# 移动 Ad Hoc 网络中 QoS 参数的相关性研究

赵为粮<sup>1,3</sup>, 李 云<sup>1</sup>, 刘占军<sup>1</sup>, 隆克平<sup>1,2</sup>, 刘元安<sup>3</sup>

(1. 重庆邮电学院光互联网及无线信息网络研究中心, 重庆 400065

2. 电子科技大学, 四川成都 610054 3. 北京邮电大学, 北京 100876)

**摘 要:** QoS 参数的相关性研究对多约束条件下的 QoS 路由优化具有重要意义. 本文结合仿真和理论分析, 研究了移动 ad hoc 网络中三个重要的 QoS 参数——业务流的带宽、分组平均延迟、延迟抖动——的相关性问题, 得到了这些参数间关系的解析表达式来. 通过进一步的仿真验证, 结果表明所得到的关系与试验结果相吻合.

**关键词:** 移动 ad hoc 网络; 服务质量; 相关性

**中图分类号:** TN919 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 03-0487-04

## Research on the Pertinence of QoS Metrics in Mobile Ad Hoc Networks

ZHAO Wei-liang<sup>1,2</sup>, LI Yun<sup>1</sup>, LIU Zhan-jun<sup>1</sup>, LONG Ke-Ping<sup>1</sup>, LIU Yuan-an<sup>2</sup>

(1. Chongqing University of Posts & Telecommunications Chongqing 400065, China

2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan 610054, China

3. Beijing University of Posts & Telecommunications Beijing 100876 China)

**Abstract** It is important for multi-constrained QoS routing to study the pertinences of QoS metrics. This paper investigates the pertinence of bandwidth, average packet delay and delay jitter in mobile ad hoc networks by simulation and analysis. The formulations denoting the pertinence of these QoS metrics are obtained and simulations are performed to validate correctness of these formulations. The simulation shows that the analytical results are consistent with simulation results.

**Key words** mobile ad hoc networks; QoS; pertinence

### 1 引言

移动 ad hoc 网络的应用环境以及多媒体业务流在网络中的传输需求要求移动 ad hoc 网络支持 QoS. 然而, 移动 ad hoc 网络自身的特点使得在移动 ad hoc 网络中实现 QoS 具有很大的挑战性.

近年来国内外已经有一些研究涉及到这一课题并且取得了一定的成果, 它们分别从 QoS 体系结构<sup>[1,2]</sup>、QoS 信令<sup>[3]</sup>、QoS 路由<sup>[4-8]</sup>以及支持业务区分和资源预留的 MAC 协议<sup>[9-11]</sup>这四个方出来实现移动 ad hoc 网络中的 QoS<sup>[12]</sup>.

在 QoS 路由方面, 已有的 QoS 路由协议大致分为三类: 第一类是基于 TDMA 的 QoS 路由协议, 对于这类 QoS 路由协议, 要求无线节点采用 TDMA 的多址技术, 且网络中的各移动节点能估计无线链路的可用带宽 (通常以空闲时隙表示) 并预留可用的带宽资源. 文献 [4] 给出的 QoS 路由协议就是一个典型的例子. 第二类是基于 TDMA / CDMA 的 QoS 路由协议. 在基于 TDMA / CDMA 的移动 ad hoc 网络中, 无线链路采用 TDMA 和 CDMA 相结合的多址技术. 文献 [5] 针对基于 TDMA / CDMA 的移动 ad

hoc 网络提出了一种路径带宽估计和路径上各节点发送时隙的调度算法, 基于这一算法, 文献<sup>[6]</sup>进一步给出了一种按需路由协议. 第三类是通用的 QoS 路由协议, 通用的 QoS 路由协议并不针对具体的 MAC 机制, 但它假设 MAC 协议具有本地可用带宽估计、延迟估计和资源预留功能. 文献 [7-8] 给出的 QoS 路由协议就属于这种类型.

QoS 参数包括带宽、延迟、延迟抖动和分组丢失率等. 然而已有 QoS 路由协议大都只是考虑了这些参数中的某一个, 比如文献 [4] 只是考虑了带宽, 没有考虑延迟、延迟抖动等. 事实上, 在移动 ad hoc 网络中实现同时满足多个 QoS 参数的路由协议是非常困难的. 已有的研究成果表明, 当多个 QoS 路由参数不相关时, 多约束条件下的 QoS 路由问题是 NP 完全的<sup>[13]</sup>. 但是如果能够找出各个参数之间的关系, 使参数之间建立相关性, 就会把这个 NP 完全问题转化为 NP 不完全问题, 从而使得 QoS 问题可以精确求解.

本文正是针对移动 ad hoc 网络中 QoS 参数的相关性, 以移动 ad hoc 网络中带宽、延迟、延迟抖动为主要参数进行了大量的仿真试验, 然后对这些试验结果进行比较分析, 把其中一些规律性的关系找出来, 而后对这些规律

收稿日期: 2004-11-10 修回日期: 2005-11-15

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 90304004); 重庆市教委科学技术研究 (No. KJ050503); 重庆市科委 (No. 8817); 重庆邮电学院博士科研启动基金 (No. A2002-47); 重庆邮电学院青年教师基金 (No. A2005-27)

进行拟合,使其成为一个量化的关系式,从而找到了表示这些 QoS 参数之间的相关性的解析式。这使得移动 ad hoc 网络中满足带宽、延迟、和延迟抖动的 QoS 路由问题可以精确求解。同时,根据这些关系式,我们可以将延迟、延迟抖动折算成带宽,这样在建立 QoS 路由时,便可以仅仅根据折算后的最大带宽,建立满足带宽、延迟和延迟抖动的 QoS 路径。

## 2 QoS 参数的相关性分析

在本节,我们首先通过仿真,得到给定分组长度、不同跳数情况下,平均延迟和带宽的关系曲线,然后理论分析在给定跳数和分组长度的情况下平均延迟和带宽的关系式,最后将该关系式推广到跳数和分组长度均可变的一般情形。

### 2.1 给定分组长度,对不同跳数情况,平均延迟和带宽的关系的仿真

仿真试验使用工具为 NS-2<sup>[14]</sup>,采用的路由协议为 DSR 路由协议。而物理层和 MAC 子层我们采用 IEEE 802.11 协议。相关仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数名	参数值	参数名	参数值	参数名	参数值
时隙长度	20 $\mu$ s	MAC 帧头长度	144 bit	$CW_{max}$	256
SIFS	10 $\mu$ s	RTS 帧长度	160 bit	DSR 初始回退时间	0.05s
DIFS	50 $\mu$ s	CTS 帧长度	112 bit	DSR 最大回退时间	10s
HY 帧头长度	192 bit	$CW_{min}$	16	DSR 回退因子	4

在仿真中,我们采用了简单的线形拓扑结构(如图 1 所示),以表示一条数据流通过的路径。在两端点之间只建立一条数据流,并设置相应的背景流量。我们通过调节相应的背景流量来控制该数据流所能使用的带宽。

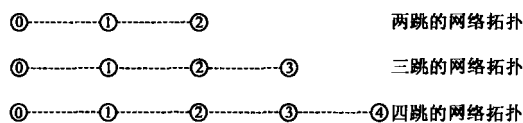


图 1 仿真中的拓扑图

一个数据包的延迟是带有随机性的,我们用式(1)表示该情况下分组的平均延迟:

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

其中,  $D_i$  表示第  $i$  个数据包的延迟。

我们用延迟变量的均方差来表示延迟抖动,即

$$jit = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i - \bar{D}|^2} \quad (2)$$

当数据流发送分组的长度为 600 字节,间隔为 0.036 秒时,在不同的跳数情况下,仿真得到平均延迟随带宽变化曲线如图 2 所示。

### 2.2 平均延迟、延迟抖动和带宽的关系

从图 2 中可以看出,随着带宽的增加,平均延迟和延迟抖动都有一个陡然降低的阶段,而且这个陡降过程有很

好的相似性。改变数据分组的大小,比如改换为每隔 0.036 秒发送一个大小为 675 字节或者 750 字节的数据包,所得到的平均延迟、延迟抖动随带宽变化曲线也都是相似图形。

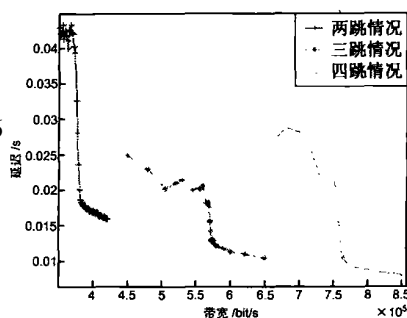


图 2 数据分组长度为 600 字节不同跳数下的平均延迟情况

当跳数为两跳,数据分组长度不同时,平均延迟随着带宽的变化的曲线如图 3 所示:

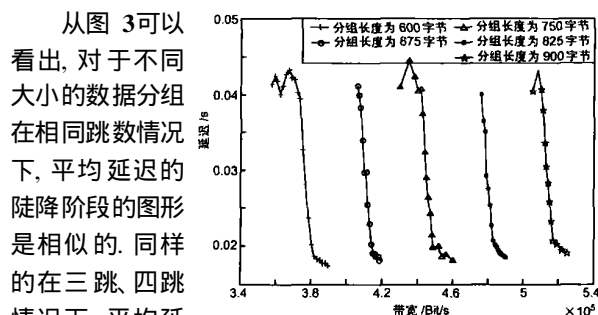


图 3 当跳数为两跳,对不同的数据分组长度,平均延迟随着带宽的变化曲线

如此的相似性。这就是说在不同数据分组大小、不同跳数下,数据包的平均延迟随着带宽的变化规律是相似的,只是需要一定的平移。

利用 MATLAB 中数值分析工具对数据分组长度 600 字节情况下平均延迟与带宽的关系进行拟合,因为只有在随着带宽的变化而平均延迟陡然降低并且趋向平缓的区间的变化是不同跳数下是相似的,同时在移动 ad hoc 网络中对于 QoS 来说,如果没有达到这段区间,说明根本无法满足 QoS 要求,而如果超过这段区间是已经满足 QoS 要求的,所以我们所关心的也正是这一区间。

在数据分组长度为 600 字节,两跳情况下,取带宽从 372000 bit/s 到 421600 bit/s 之间(相对于图 3 的陡降区间)的数据用多项式进行拟合,拟合中带宽的最高次项取 12 次方,则得到在该条件下带宽和平均延迟的关系:

$$d = \sum_{i=0}^{12} a_i b^i \quad (3)$$

其中  $d$  表示平均延迟,  $b$  表示带宽,  $a_i$  为带宽不同次幂的系数,具体数值如下表示:

$$\begin{aligned} a_0 &= -1.064231184593432e+10 & a_1 &= 2.394215979351943e+5 \\ a_2 &= -2.380248801817922 & a_3 &= 1.370594945125158e-5 \\ a_4 &= -5.039987449263705e-11 & a_5 &= 1.239519741283594e-16 \\ a_6 &= -2.140353257840884e-22 & a_7 &= 2.985929012573956e-28 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_8 &= -4.389621939096148e-34 & a_9 &= 6.801196294521055e-40 \\ a_{10} &= -8.031382906831589e-46 \\ a_{11} &= 5.573115490953602e-52 \\ a_{12} &= -1.666444956219575e-58 \end{aligned}$$

在得到数据分组长度为 600 字节、两跳情况下平均延迟和带宽的关系式后, 根据图 3 将式 (3) 的自变量  $b$  增加一个平移量,  $343000 \text{ bit/s}$  得到分组长度为 675 字节时平均延迟和带宽的关系式, 根据该关系式做出的平均延迟和带宽曲线同图 3 所示的当分组长度为 675 字节时的曲线在陡降部分能很好吻合。同样, 式 (3) 的自变量  $b$  分别增加一个平移量,  $69000 \text{ bit/s}$ ,  $103500 \text{ bit/s}$  和  $138000 \text{ bit/s}$  可以得到分组长度分别为 750 字节、825 字节和 900 字节时平均延迟和带宽的关系式, 它们能和图 3 中对应曲线的陡降部分很好吻合。

经过进一步分析, 我们发现, 在不同分组长度下, 需要增加的自变量  $b$  的平移量同分组长度之间满足一定的关系式, 即:

$$M = \frac{Q - 600}{75} \times 34300 \tag{4}$$

其中,  $Q$  为数据分组长度,  $M$  为  $b$  的平移量。

采用相同的分析方法 (考虑篇幅受限, 本文不再给出具体的分析过程), 在相同分组长度, 不同的跳数情况下, 我们分析了平均延迟和带宽的关系, 分析结果表明, 对给定的跳数  $n$  将式 (3) 的自变量  $b$  增加一个平移量  $C$  将因变量  $d$  也增加一个平移量  $P$  之后, 可以得到其对应的平均延迟和带宽的关系式, 其中  $C$  与  $n$ ,  $P$  与  $n$  的关系分别如下:

$$c = (n - 2) \times \left[ \frac{Q - 600}{75} \times 17500 + 190000 \right] \tag{5}$$
$$P = \left[ \frac{1}{2^{n-2}} - 1 \right] \times 0.01 \tag{6}$$

综合式 (3)、(4)、(5)、(6) 我们得到对任意长度的数据分组  $Q$  在任意跳数  $n (n \geq 2)$  的情况下在平均延迟陡降阶段带宽和平均延迟的函数表达式:

$$d = P + \sum_{i=0}^{12} a_i [b - M - c]^i \tag{7}$$

其中  $M = \frac{Q - 600}{75} \times 34300$ ,  $c = (n - 2)$

$$\times \left[ \frac{Q - 600}{75} \times 17500 + 190000 \right],$$
$$P = \left[ \frac{1}{2^{n-2}} - 1 \right] \times 0.01, b \text{ 表示带宽, } d \text{ 表示平均延迟。}$$

对抖动做完全相同的分析 (同样考虑篇幅受限, 本文不再给出具体的分析过程), 得到陡降阶段抖动随带宽变化的函数表达式为:

$$jit = 0.0005 + \sum_{i=0}^{12} c_i [b - M - c]^i \tag{8}$$

中  $M = \frac{Q - 600}{75} \times 34300$

$C = (n - 2) \times \left[ \frac{Q - 600}{75} \times 17500 + 190000 \right]$ ,  $b$  表示带宽,  $jit$  表示由式 (2) 定义的抖动。式 (8) 中系数  $c_i$  为:

$$\begin{aligned} c_0 &= 2.009463076882060e+10 & c_1 &= -3.745494565232816e+5 \\ c_2 &= 2.617627224726002 & c_3 &= -5.904599445581058e-6 \\ c_4 &= -2.629029448875360e-11 & c_5 &= 2.202768524419759e-16 \\ c_6 &= -6.114276442595526e-22 & c_7 &= 4.404478581133221e-28 \\ c_8 &= 1.951676370555812e-33 & c_9 &= -6.552414186110817e-39 \\ c_{10} &= 9.309896943306142e-45 \\ c_{11} &= -6.741738094786349e-51 \\ c_{12} &= 2.035770983406711e-057 \end{aligned}$$

式 (7) 和式 (8) 表明, 移动 *ad hoc* 网络中平均延迟和带宽、延迟抖动和带宽之间存在相关性, 通过式 (7) 和式 (8) 我们可以将业务流和平均延迟和延迟抖动请求转换为带宽请求, 从而使多约束 (带宽、平均延迟、延迟抖动) 的  $QoS$  问题转化为单约束 (带宽) 的  $QoS$  问题。

### 3 仿真验证

对于上述所得到的关系式, 我们从两个方面来进行仿真验证: 一方面是在选定的数据分组长度的情况下改变跳数, 通过式 (7) 和式 (8) 分别得到不同跳数下的理论上的平均延迟和延迟抖动随带宽变化的曲线, 而后与仿真所得到的平均延迟和延迟抖动随带宽变化的曲线相比较, 另一方面是在跳数相同的情况下, 对不同数据分组大小做同样比较。

相关仿真参数见表 1 所示, 仿真拓扑采用图 1 所示的线形拓扑。

图 4 是数据分组长度为 675 字节, 跳数分别为二、三、四时, 根据式 (7) 理论计算和仿真得到的平均延迟和带宽的关系曲线。从图 4 可以看出, 不同的跳数下理论上分析所得的曲线和仿真所得到的曲线, 虽然存在着一定的差异, 但是整体上是基本吻合的, 这就证明所得到的函数表达式随着跳数变化的规律是符合实际的。

当跳数为两跳, 数据分组长度分别为 100 字节、200 字

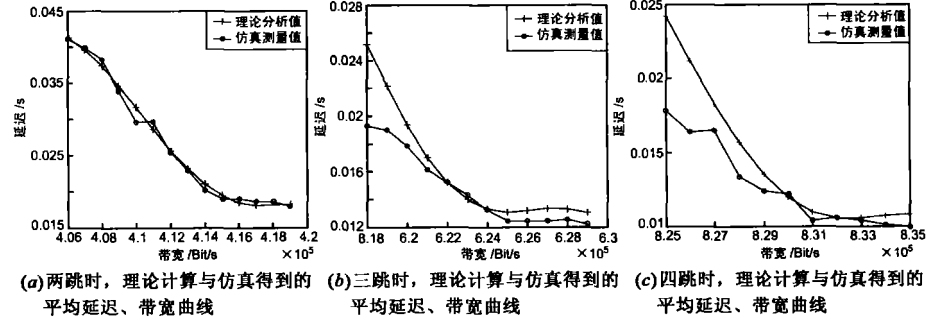
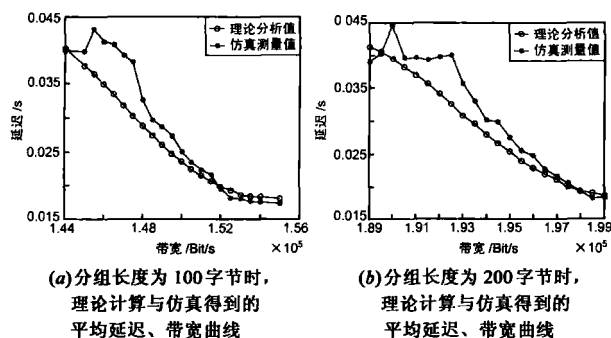


图 4 对给定分组长度, 不同跳数下理论计算与仿真得到的平均延迟、带宽曲线

节、500字节、600字节、700字节、800字节、900字节时,根据式(7)理论计算与仿真得到的平均延迟、带宽曲线如图5所示。



从图5可以看出,对于给定跳数,在不同的数据分组长度下,理论上分析所得的延迟和带宽的关系曲线和仿真所得的平均延迟和带宽的关系曲线能很好地吻合。

对延迟抖动和带宽的关系,同样从上述两个方面作了仿真验证,结果表明分别通过式(8)理论计算和仿真得到的延迟抖动与带宽变化的曲线能较好吻合。由于篇幅原因,本文没有画出相关的曲线。

#### 4 结论

QoS参数的相关性研究对多约束条件下的QoS路由优化具有重要意义。当多个QoS路由参数不相关时,多约束条件下的QoS路由问题是NP完全的。但是,当多个QoS参数间存在相关性时,则多约束的QoS问题可以精确求解。本文结合仿真和理论分析,研究了移动ad hoc网络中三个重要的QoS参数——业务流的带宽、分组延迟、延迟抖动——的相关性问题,得到了这些参数间关系的解析表达式来。通过进一步的仿真验证,结果表明所得到的关系与试验结果相吻合。

进一步的研究是利用本文建立的QoS延迟和带宽之间的关系式,设计满足业务的带宽和延迟要求的移动ad hoc网络的QoS路由协议。

#### 参考文献:

- [1] R Braden, D Clark, S Shenker. Integrated services architecture [S]. Internet Engineering Task Group (ETF), Request for Comment (RFC): 1633 June 1994
- [2] S Blake, D Black, M Carlson, E Davies, Z Wang, W Weiss. An architecture for differentiated services [S]. Internet Engineering Task Group (ETF), Request for Comment (RFC): 2475 December 1998
- [3] S-B Lee, et al. NSIGNIA: An IP-based quality of service framework for mobile ad hoc networks [J]. J Parallel and Dist Comp Special issue on Wireless and Mobile Computing and Communications 2000, 60(4): 374-406
- [4] C Zhu, M S Corson. QoS routing for mobile ad hoc networks [A]. Proceeding of the Twenty First International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. New York, USA, 2002, 2: 958-967.
- [5] C R Lin, J S Liu. QoS routing in ad hoc wireless networks [J]. IEEE J Selected Areas in Communications 1999, 17(8): 1426-1438
- [6] C R Lin. On-demand and QoS routing in multihop mobile networks [A]. Proceeding of Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. 2001, 3: 1735-1744
- [7] S Chen, K Nahrstedt. Distributed quality of service routing in ad-hoc networks [J]. IEEE J Selected Areas in Communications 1999, 17(8): 1488-1505
- [8] C Huang, F Dai, J Wu. On-demand location-aided QoS routing in ad hoc networks [A]. Proceeding of the 2004 International Conference on Parallel Processing (CPP2004) [C]. 2004, 502-509
- [9] C Zhu, M S Corson. A five-phase reservation protocol (FPRP) for mobile ad hoc networks [A]. Proceeding of Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. 1998, San Francisco, CA, USA, Vol 1: 322-331
- [10] A Vereş, A T Campbell, M Barry, L H Sun. Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control [J]. IEEE J of Selected Areas in Communications 2001, 19(10): 2081-2093
- [11] Gahng-Seop Ahn, Andrew T Campbell, Andros Vereş, Li Hsiang Sun. Supporting service differentiation for real-time and best-effort traffic in stateless wireless ad hoc networks (SWAN) [J]. IEEE Transaction on Mobile Computing 2002, 1(3): 192-207
- [12] 李云, 赵为粮, 隆克平, 吴诗其. 无线 Ad Hoc 网络支持 QoS 的研究的进展与展望 [J]. 北京: 软件学报, 2004, 15(12): 1885-1893
- LI Yun, ZHAO WeiLiang, LONG Ke-Ping, WU Shi-Qi. Development and prospect on the supported QoS in wireless ad hoc networks [J]. Chinese Journal of Software, 2004, 15(12): 1885-1893 (in Chinese)
- [13] Kuiwu, Janelle Hams. QoS support in mobile Ad Hoc networks [J]. Crossing Boundaries 2001, 1(1): 92-106
- [14] The networks simulations-2 [EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns.doc.pdf> 2003

#### 作者简介:

赵为粮 男, 1962年生于重庆铜梁, 教授, 博士, 发表论文 60 余篇, 主要研究方向为无线通信、电磁辐射与散射。

E-mail: zhaow@cqupt.edu.cn

李云 男, 1974年生于四川西充, 副教授, 博士, 发表论文 50 余篇, 主要研究方向为宽带无线接入技术、无线自组织网络/传感器网络理论与技术。E-mail: liyun@cqupt.edu.cn