

文章编号: 1672-2892(2010)06-0733-05

## 基于排队模型的无线 Mesh 网延时分析与优化

汪翔, 徐娜, 倪卫明

(复旦大学 通信科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 在提供无线接入的网格网中, 不同用户因所处地理位置的不同所获得的服务质量(吞吐量、延时)会有较大程度的差异。文中使用排队网络对 Mesh 网建立模型, 从理论上分析了非饱和流量的情况下不同用户获得的延时的差异。分析发现, 通过设置多个缓冲区并调度不同数据流在中间节点上的优先级别, 可以使不同用户的延时趋于均匀从而保证网络的公平性。把优先级的分配问题归结为一个以公平性为目标的组合优化问题并提供了解法。使用 Lorenz 曲线来度量公平性, 仿真结果表明, 使用优化的调度算法可以获得更好的网络公平性。

**关键词:** 无线 Mesh 网; 延时; 公平

**中图分类号:** TN915.02

**文献标识码:** A

## Delay analysis and optimization in wireless mesh networks based on queuing model

WANG Xiang, XU Na, NI Wei-ming

(Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** In Wireless Mesh Networks(WMNs) for Internet access, service quality of different users will vary greatly depending on the locations of users. In this study, WMNs were simulated as queuing networks and the delay variance of different users in unsaturated load case were analyzed. The analytical results indicated that delay fairness could be guaranteed by setting multiple buffers in mid-node and scheduling priorities of all flows. The priority assignment problem was formulated as a combinatorial optimization problem which was targeted to achieve maximal fairness, and a solution was also provided. The fairness was evaluated by using Lorenz curve. Simulation results show that better fairness index can be acquired by using optimal assignment algorithm.

**Key words:** Wireless Mesh Network; delay; fairness

无线网格网(WMN)是一种无线多跳网络, 具有布署简单和良好的可扩展性等优点, 正逐渐成为宽带接入的有效手段<sup>[1]</sup>。WMN 主要由无线路由器和无线客户端组成。无线路由器一般是静止的, 通常安装在屋顶或路灯上, 它们互相连接组成无线骨干网; 直接连接到 Internet 的无线路由器称为网关。客户端则是通过无线路由器接入 Internet 的无线设备。通过使用多个不同的信道(Multi-radio, multi-channel), WMN 的性能可以得到很大提高。在这种情况下, 每个路由器配有多个网卡(Network Interface Card, NIC), 不同的网卡分配不同的信道, 相邻节点如果使用相同的信道则可以互相通信, 通过使用这种方式可以提升 WMN 的网络容量。

WMN 主要用来提供高质量的无线接入服务, 所以高的网络吞吐量和较低的服务延时成为设计 WMN 的主要目标。但是受接入路由器在网络中所处地理位置的不同, 各个用户获得的服务质量会有不同程度的差别, 靠近网关节点的用户会获得较好的服务质量, 而远离网关节点的用户会承受较大的网络延时或较低的吞吐量, 从而导致不公平性的产生。在文献[2]中, 作者以链式的拓扑结构为场景, 用大量的仿真结果表明处于不同地理位置的用户所获得的吞吐量具有严重的不公平性: 靠近网关节点的用户占用了网络的绝大部分流量, 而远离网关节点的用户则只获得了极少的流量。到目前为止, 已有很多文献讨论了 WMN 中的各种优化问题。网络吞吐量和公平性的优化是文献[2-5]讨论的主要问题。为了对不公平性进行定量分析, 采用 Lorenz 曲线<sup>[6]</sup>来描述吞吐量或延时的分布, 从而可以精确评估不同的设计方案对网络公平性的改善程度。

所做的工作主要有以下几点: 1) 使用排队网络(Queuing Network) 对无线 Mesh 网建立模型<sup>[7]</sup>, 从理论上分析了非饱和负载下不同用户的网络延时, 给出了估算延时的数学表达式; 2) 在不同的 Mesh 节点上, 对来自不同用户的数据确定不同的发送优先级, 首次从理论上分析了这种调度方法对网络延时和公平性的影响; 3) 找出了一种优化网络公平性的调度算法。

## 1 系统模型

一个两层的 WMN: 一层是“路由器—路由器”组成的骨干网; 另一层是“路由器—用户”组成的接入层。这两层使用不同的通信协议和信道, 因此不考虑用户的具体接入方式, 而是把一个接入点下面所有的用户流量视为本接入点产生的流量, 这在一定程度上简化了网络的复杂度。

在多信道 WMN 中, 假设每个路由器均配有多个天线, 并可使用多个信道进行通信(见图 1)。在传输距离内如果不同链路使用相同的信道则会产生冲突, 因此假定一个静态的信道分配方法来解决冲突问题<sup>[7]</sup>: 如果两条链路在干扰范围之内则使用不同的信道, 如果在干扰范围之外则可以重复分配相同的信道。完成静态信道分配以后, 相邻链路可以同时进行通信而不会产生冲突。

考虑一个典型的链式拓扑结构, 使用排队网络对 WMN 建模<sup>[7]</sup>。网络共由  $n$  个路由器构成, 在排队网络中称其为节点。流量模型描述如下: 节点  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 上产生的数据流记为流  $i$ , 每个数据流的目的节点均为网关节点, 数据包的产生服从参数为  $\lambda_i$  的泊松分布, 每个数据包的长度服从指数分布, 因此 mesh 路由器发送每个数据包所需的时间也服从指数分布, 记服务速率为  $\mu_i$ , 平均服务时间则为  $1/\mu_i$ 。额外的, 假设所有路由器上的流量产生速率均为  $\lambda_0$ , 且每个路由器的服务速率均为  $\mu_0$ 。

数据需要通过多个中间节点的中继才能最终到达目标节点, 记流  $i$  的数据包(即在节点  $i$  上产生的用户数据包)在节点  $r$  的缓冲队列中的平均等待时间(不包括发送时间)为  $W_i^r$ , 那么  $W_i = \sum_{r=i}^n W_i^r$  即为属于流  $i$  的数据包在整个网络中的平均等待时间。相应的,  $T_i^r$  记为属于流  $i$  的数据包在节点  $r$  上所消耗的平均时间, 包括平均等待时间和发送时间,  $T_i = \sum_{r=i}^n T_i^r$  即为属于流  $i$  的数据包在整个系统中所消耗的平均时间。研究的目的是提高各个用户服务延时  $T_i$  的公平性。

## 2 问题描述

在通常的服务模式中, 数据包在路由器上按照先进先出(First In First Out, FIFO) 的方式进行发送, 通过在路由器上划分不同级别的缓冲区并按一定的优化算法分配给不同的数据流可以优化用户服务延时的公平性。下面具体分析了 3 种不同的缓冲区分配方案并对它们的效果进行了比较。

### 2.1 使用普通的单一缓冲区, 无优先级, 先到先服务(FIFO)的服务模式

在这种服务模式下, 所有流的数据包在某个节点上均进入同一个队列等待发送。假设数据到达间隔  $\lambda$  和数据包的长度均满足指数分布, 由排队论的知识可知, 一个 M/M/1 队列的输出也是一个泊松过程, 速率仍为  $\lambda$ 。又由于泊松过程的可加性, 节点  $i$  上总的的数据到达速率  $\lambda_i'$  可以由  $\lambda_i' = \sum_{k=1}^i \lambda_k = i\lambda_0$  方便地得到。所以

$$T_i^r = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i'} = \frac{1}{\mu_0 - r\lambda_0}。由 T_i = \sum_{r=i}^n T_i^r 可进一步计算得到 T_i。$$

### 2.2 使用单独缓冲区, 有优先级, 数据流源节点越远, 优先级越高的服务模式

为了给不同流的数据不同的优先级, 首先假设在任意节点上存在优先级别不同的缓冲区, 缓冲区的标号为  $i$

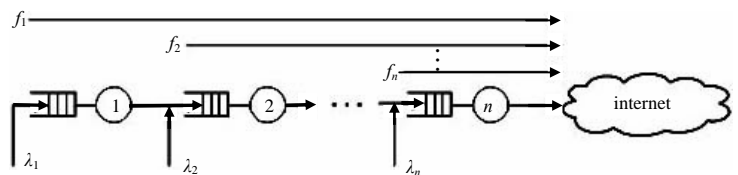


Fig.1 Chain topology of WMN  
图 1 WMN 的链式拓扑结构

( $i=1\sim r$ ), 不同缓冲区的优先级按标号从 1 到  $r$  依次降低, 如图 2 所示。

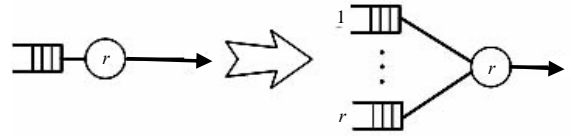


Fig.2 Illustration of multi-buffer bpproach  
图 2 多缓冲区方案示意图

对链式的拓扑结构来说, 离网关节点越远的节点所传输的数据经历的跳数越多, 从而使得延时越长, 因此从直观的角度出发, 应该减少这些节点的数据在缓冲队列中的等待时间, 这样可能会在一定程度上提高整个网络的公平性。根据以上分析, 缓冲队列的分配按如下方法确定: 标号为  $i(i=1\sim r)$  的数据流进入相应标号为  $i$  的缓冲区等待发送,  $i$  越小, 数据流的源节点离网关节点越远, 给予的优先级越高。用数学语言描述如下: 不同的数据流  $i(i=1\sim N)$  在节点  $r$  分别进入标号为  $b_{r,i}$  的缓冲区, 有  $b_{r,i} = i$ 。

在这部分所假设的服务模型中, 节点每次从具有最高优先级的缓冲区中取出一个数据包并发送出去, 如果有高优先级的数据在缓冲区中等待, 则绝对不发送低优先级的缓冲区中的数据。但是, 如果在发送一个低优先级的数据包时有一个高优先级的数据包进入缓冲区, 假定低优先级的数据包继续发送直到发送完成。因此, 采用的是带有优先级别的非抢占式的服务模型。

按照这样的模型, 每个节点可以抽象为有  $r$  种类型的顾客(不同类型的顾客具有不同的优先级别)、一个服务台的排队系统。根据排队论的知识<sup>[8]</sup>, 不同类型顾客在队列中的平均等待时间  $W_i^r$  可以由公式

$$W_i^r = \frac{\lambda_1 E[S_1^2] + \dots + \lambda_r E[S_r^2]}{2 \prod_{j=i-1}^r (1 - \lambda_j E[S_j])}, \quad i=1, \dots, r \quad (1)$$

计算得到。

整个排队网络是一个稳定系统, 对应不同数据流( $0\sim r$ )的缓冲区的平均数据到达速率等于  $\lambda_i(i=1\sim r)$ 。进而可以估算出  $W_i$  和  $T_i$ 。

### 2.3 使用单独缓冲区, 有优先级, 以服务公平性为目标进行优化的服务模式

在(2.2)节中, 使用了数据流源节点离网关越远优先级越高的服务模式, 这种模式可以在一定程度上提高网络的公平性, 但从仿真结果看出, 这种优先级的分配方式并不能使网络的公平性达到最优化, 在这部分将找出一种优先级的分配方法, 从而最优化网络的公平性。

使用 Min-Max 公平原则<sup>[3]</sup>, 优化目标为  $\min \max(T_i)$ , 其中  $T_i = \sum_{r=i}^n T_i^r$ , 目的是给数据流在每个节点上分配不同的优先级, 从而达到延时优化的目的。

不同的数据流  $i(i=1\sim N)$  在节点  $r$  分别进入标号为  $b$  的缓冲区, 此时各缓冲区的优先级别不同, 用 0~1 变量  $x_{i,r,b}$  表示流  $i$  在节点  $r$  是否分配到标号为  $b$  的缓冲区,  $x_{i,r,b} \in \{0,1\}, b \leq r$ 。

则有如下约束条件:

- 1) 每个缓冲区只可分配给 1 个数据流

$$\sum_{i=0}^r x_{i,r,b} = 1 \quad (2)$$

- 2) 每个数据流在中继节点上必须分配有缓冲区, 而在非中继节点上不分配缓冲区

$$\sum_{b=0}^r x_{i,r,b} = 1, i \leq r \quad (3)$$

$$\sum_{b=0}^r x_{i,r,b} = 0, i > r \quad (4)$$

优化目标为  $\min \max(T_i)$ ,  $T_i = \sum_{r=i}^n T_i^r = \sum_{r=i}^n \sum_{b=1}^r x_{i,r,b} T(r,b)$ , 其中  $T(r,b)$  表示在节点  $r$  上选取标号为  $b$  的缓冲区的平均延时, 是一个常量, 可由(2.2)节中的讨论计算得到。

此问题是一个 NP-Hard 组合优化问题, 为求解这个问题, 提出以下的数值逼近解法:

Step 1: 预先设定一个  $\max(T_i)$  的初始值  $T_{\max}$ ,  $T_{\max}$  表示期望把所有的  $T_i$  都限制在  $T_{\max}$  以下。

Step2:

```

for  $i=1:N$ 
  为流  $i$  在所有节点分配尽可能低的优先级, 但保证  $T_i \leq T_{\max}$ 
  if 找不到分配方案
     $T_{\max}$  的值设定过小; break;
  end
end
Step 3:
调整  $T_{\max}$  的值, 重复步骤 2), 以期望找到最小的  $T_{\max}$ 。

```

### 3 结果分析

对 2 种带优先级分配的方案和 1 种不带优先级分配的方案进行了比较, 使用的场景是带有 9 个路由器节点的链式拓扑, 网络为非饱和和负载。3 种方案下不同用户获得的延时分布如图 3 所示, 结果表明, 使用 FIFO 的排队方案, 用户获得的延时有较大程度的差异, 远离网关节点的用户会承受较大的网络延时, 而靠近网关节点的用户会获得较好的服务质量; 直观对比而言, 使用优先级分配的方案使系统公平性有一定程度的提高。

使用 Lorenz 曲线对系统的公平性做进一步的评估。Lorenz 曲线在经济学中用来研究国民收入在国民之间的分配问题, 它先将人口按收入由低到高排队, 然后将人口累计百分比和收入累计百分比的对应关系描绘出来, 它的弯曲程度反映了收入分配的不平等程度。弯曲程度越大, 收入分配程度越不平等; 反之亦然。这里使用 Lorenz 曲线来描述各个用户延时的公平性<sup>[6]</sup>, 类似的, 先将不同数据流的延时从高到低排列, 然后绘制出延时的累积分布曲线, 即延时的 Lorenz 曲线, 如图 4 所示。图中的直线为基准线, 表示完全公平的情况, 即所有用户均获得相同的延时。数据点的分布离这条直线越近, 表示方案越公平; 离得越远, 则越不公平。

### 4 结论

使用基于优先级的排队网络对一种特殊的链式拓扑结构的 Mesh 网建立模型, 从理论上分析了非饱和流量的情况下不同用户获得的延时的差异, 进而给出了计算延时的数学表达式。为解决用户服务的公平性问题, 提出了一种多缓冲区解决方案, 并提供了近似的优化算法, 对无线 Mesh 网的设计和布署具有一定的理论指导意义。后续的研究工作主要关注更为复杂的网状拓扑结构以使模型更具一般性。

#### 参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Wang X. A survey on wireless mesh networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(9): S23-S30.
- [2] Violeta Gambiroza, Bahareh Sadeghi, Edward W Knightly. End-to-end performance and fairness in multihop wireless backhaul networks[C]// Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. Houston: [s.n.], 2004: 287-301.
- [3] Tang J, Xue G L, Zhang W Y. Cross-Layer Design for End-to-End Throughput and Fairness Enhancement in Multi-Channel Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(10): 3482-3486.
- [4] Rad A H M, Wong V W S. Cross-layer fair bandwidth sharing for multi-channel wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(9): 3436-3445.
- [5] Li X Y, Nusairat A, Wu Yanwei, et al. Joint Throughput Optimization for Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2009, 8(7): 895-909.
- [6] Garetto M, Salonidis T, Knightly EW. Modeling per-flow throughput and capturing starvation in CSMA multi-hop wireless networks[J]. IEEE-ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, 2008, 16(4): 864-877.
- [7] Wu X B, Liu J C, Chen G H. Analysis of Bottleneck Delay and Throughput in Wireless Mesh Networks[C]// 2006 IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems. Vancouver: [s.n.], 2006: 745-750.

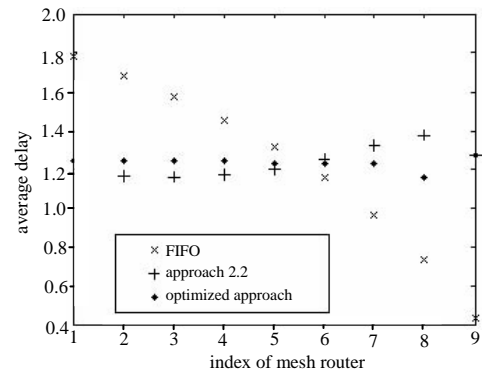


Fig.3 Delay distribution of 3 approaches  
图3 三种方案下不同用户的延时分布

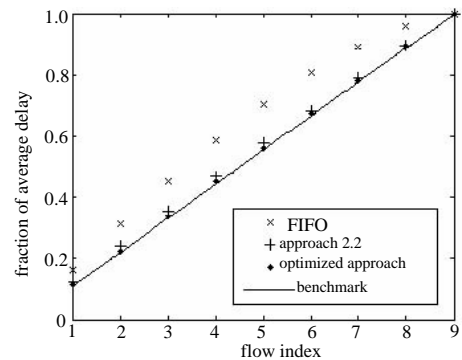


Fig.4 Lorenz curves of 3 approaches  
图4 三种方案的 Lorenz 曲线

[ 8 ] Sheldon M Ros. 概率模型导论[M]. 北京:人民邮电出版社, 2007.

#### 作者简介:



汪 翔(1986-), 男, 江苏省海安县人, 在读硕士研究生, 研究方向为网络与数据通信.email: wangx86@hotmail.com.

徐 娜(1986-), 女, 江西省高安市人, 在读硕士研究生, 研究方向为网络与数据通信.

倪卫明(1970-), 男, 上海市人, 副教授, 研究方向为信号处理、编码、无线通信和无线网络.

(上接第 715 页)

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张翼飞,陈晓光,崔立成. 四阶双模介质滤波器的设计和分析[J]. 信息与电子工程, 2009,7(3):187-199. (ZHANG Yi fei,CHEN Xiaoguang,CUI Licheng. Structure design and analysis of a 4th-degree dielectric dual-mode filter[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(3):187-199.)
- [ 2 ] Lin R C,Chen Y C,Kao K S,et al. Dual band filter based on film bulk acoustic resonator[J]. IEEE Ultrason. Symp., 2008, 185(5):195-198.
- [ 3 ] Uehara K,Yang C M,Kim S K. Fabrication of 5-GHz-Band SAW Filter with Atomically-Flat-Surface AlN on Sapphire[J]. IEEE Ultrasonic Symp., 2004,174(1):203-206.
- [ 4 ] Giraud S,Bila S,Chatras M,et al. Bulk acoustic wave filter synthesis and optimization for UMTS applications[J]. Freq. Contr. Symp., 2009,157(4):890-893.
- [ 5 ] Zhang X,Xu W C,Chae J S. Temperature effects on a high Q FBAR in liquid[J]. Sens. Actuators A:phys, 2009,158(5):466-469.
- [ 6 ] RE C L,KUO S K,CHIEN C C. Deposition and structural properties of RF magnetron-sputtered ZnO thin films on Pt/Ti/SiNx/Si substrate for TFR device[J]. Thin Solid Films, 2008,516(8):5262-5265.
- [ 7 ] Sundaram M,Prasad N. A Novel Electronically Tunable Active Duplexer for Wireless Transceiver Applications[J]. IEEE Trans. Microw. Theory. Tech, 2006,54(6):2584-2592.
- [ 8 ] Hara M,Kuyppers J. Surface micromachined AlN thin film 2 GHz resonator for CMOS integration[J]. Sens. Actuators A, 2005, 117(2):211-216.
- [ 9 ] MARTIN F,JAN M E,MURALT P. Shear mode coupling and properties dispersion in 8 GHz range AlN thin film bulk acoustic wave(BAW) resonator[J]. Thin Solid Films, 2006,514(6):341-343.
- [10] KIM Y D,SUNWOO K H,SUL S C. Highly miniaturized RF bandpass filter based on thin-film bulk acoustic wave resonator for 5-GHz-band application[J]. IEEE Trans. Microw. Theory. Tech., 2006,54(2):1218-1228.
- [11] Hu B,SONG I,PARK Y K. Novel 1-chip TFR filter for wireless handsets[J]. Sens. Actuators A, 2006,130(2):247-252.
- [12] Larson J D,Bradley P D,Wartenberg S. Modified Butterworth-Van Dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement system[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 2000,154(2):863-868.
- [13] NAM K W,PARK Y K. Monolithic 1-Chip TFR duplexer for W-CDMA handsets[J]. Sens. Actuators A, 2008,1431(2):162-168.

#### 作者简介:



顾 立(1987-), 男, 武汉市人, 本科生, 主要从事射频无源器件及 IC 电路分析与仿真. email:gulitx@whut.edu.cn.

钟 毅(1977-), 男, 武汉市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为射频通信系统的设计与实现.