

文章编号:1001-9081(2009)05-1211-03

## 多信道无线网状网自适应路由算法

陈锦源<sup>1</sup>, 彭利民<sup>1,2</sup>

(1. 广州体育学院 计算机应用教研室, 广州 510500; 2. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510641)

(jsjchen@tom.com)

**摘要:** 针对无线网状网的网络容量优化问题, 通过建立无线网状网容量优化的数学模型, 利用线性规划公式对无线网状网的路由问题进行描述, 在此基础上提出了一个自适应路由算法。根据网络的拓扑结构和业务请求特点, 自适应地改变路由扩张因子和负载均衡率进行优化路由, 达到提高无线网状网的网络容量的目的。仿真结果表明, 该算法能明显提高网络容量。

**关键词:** 无线网状网; 自适应路由; 负载均衡; 最短路径路由; 整数线性规划

中图分类号: TP393.03 文献标志码:A

## Adaptive routing algorithm for multi-channel wireless mesh networks

CHEN Jin-yuan<sup>1</sup>, PENG Li-min<sup>1,2</sup>

(1. Computer Teaching-research Section, Guangzhou Sports University, Guangzhou Guangdong 510500, China;  
2. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China)

**Abstract:** Concerning the optimization problem of network capacity in wireless mesh networks, the author proposed an adaptive routing algorithm, based on mathematical model of network capacity optimizing, by formulating routing problem as linear program in the wireless mesh networks. The algorithm routed the communication traffic by changing routing stretch factor and load balancing ratio adaptively based on network topology structure and the characteristic of traffic requests to improve the total networks throughput. Simulation results show that the algorithm can significantly improve network capacity.

**Key words:** Wireless Mesh Network (WMN); adaptive routing; load balancing; shortest path routing; integer linear program

### 0 引言

无线网状网 (Wireless Mesh Network, WMN) 是一种新型无线网络结构<sup>[1]</sup>, 由固定的 Mesh 路由器和可移动的 Mesh 用户按照网状结构构成。WMN 通过自动的节点发现、拓扑维护和多跳的路由转发来实现节点间的互通, Mesh 路由器之间通过无线链接形成无线 Mesh 网络的主干, Mesh 用户则通过 Mesh 路由器接入 Internet。由于 WMN 灵活的网络结构、便利的网络配置、容错能力和网格连通性, 使得 WMN 大大提升了现有网络的性能, 可以作为解决“最后 1 公里”问题的网络接入方案。由于 WMN 的网络容量受到诸多因素的影响, 例如网络结构与拓扑、传输模式、网络节点密度、每个节点所用的信道数量、发送功率等级以及节点的移动性<sup>[1]</sup>, 所以 WMN 的网络容量分析与优化是规划设计无线通信网的基础性工作。

### 1 研究现状

对于 Ad Hoc 网络容量的分析已经取得了一些成果, 但是, 由于 WMN 与 Ad Hoc 网络在拓扑形式上不同, 这些研究结论并不能用于无线 Mesh 网络。同时, 相对于单信道无线 Mesh 网络而言, 多信道无线 Mesh 网络中的路由更加复杂。在节点进行数据包转发时, 不但存在邻居节点的选择, 同时在邻居节点上还存在 Radio 的选择, 这样的特性使得进行路由选择的时候, 需要对 Radio 的特性也进行考虑, 从而使得网络层的路由决策变得异常困难。目前关于多 Radio 多信道

WMN 的研究大都集中于对多 WiFi Radio Mesh 网络的研究。文献[2]对 802.11Mesh 网络中的信道分配、路由算法和网络容量进行了分析, 但是其路由算法仅使用了最短路径进行路由, 容易使无线网络上的某些链路负载过重。文献[3]利用图论对 WMN 进行建模并分析了节点的最大吞吐量, 但是该文献并没有对路由等问题进行实际研究。文献[4]提出了一种新的路由尺度 ETX (Expected Transmission Count), 它是对单跳链路上成功传送一个探测包所需传输次数(包括重传)的预测, 但是 ETX 不能及时反应无线链路质量的变化。文献[5]基于传统的路由步数选择尺度和文献[4]的 ETX, 综合考虑 WMN 多信道环境下链路之间的干扰, 提出了一种基于链路质量的路由选择尺度算法 WCETT, 但是 WCETT 需要获取路径中节点和其相邻链路相关状态信息, 因此 WCETT 实现比较复杂。文献[6]联合 WMN 的逻辑拓扑设计、接口分配、信道分配和路由四个问题, 利用 TiMesh 结构研究 WMN 的网络容量问题, 但是 TiMesh 结构改变了当前网络分层设计的思想, 需要在多个网络协议层中利用跨层设计的方法, 因此实现比较复杂。文献[7]针对 Ad Hoc 网络的节点密度  $\rho$ , 研究了负载均衡率  $\eta$  和路径扩张因子  $c$  的折中关系: 当节点数为  $n$  且使用  $c$  短路径进行路由的时候,  $\eta$  的取值为  $O(\min(\sqrt{\rho n/c}, n/c))$ ; 当使用最短路径进行路由的时候,  $\eta$  的取值最小为  $O(\sqrt{\rho n})$ 。但是文献[7]并没有考虑  $\eta$  和  $c$  的动态关系, 也没有给出实现路由的算法。

如何选择最佳的路由算法是提高 WMN 的网络容量关

收稿日期: 2008-12-01; 修回日期: 2009-01-13。 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(05011896)。

作者简介: 陈锦源(1965-), 男, 广东澄海人, 工程师, 主要研究方向: 网络通信、路由算法; 彭利民(1976-), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 无线网络、并行分布式计算。

键<sup>[1]</sup>,传统的路由研究方法通常是使用跳步数作为路由选择尺度,现有的路由研究方法一般通过寻找一种路由尺度来衡量各条路由的优劣,然后从中选择一条最佳的路由策略。由于这些路由算法相对较复杂,而且没有考虑 WMN 的信道质量、链路的非对称性以及多信道环境下链路间的干扰,所以不能满足多信道环境下 WMN 的需要,因此,WMN 的路由算法研究必须考虑 WMN 的自身特点。文献[2,4]给出了在 WMN 中进行路由的指导性方法;文献[7]针对 Ad Hoc 网络,指出了不同的网络节点分布和无线环境状态,利用最短路径路由时,网络链路的负载均衡率均不相同;文献[8]在光纤网络中,在负载均衡路由策略的基础上,通过减少业务请求的平均跳步数,达到提高了网络吞吐量的目的。虽然 WMN 不同于光纤网络,但是在进行路由算法设计的时候,也必须同时考虑链路的负载和路由的平均跳步数。对于 WMN 而言,理想的路由算法应为最小的路由跳步数和最小的链路负载,即同时满足最短路径路由和负载均衡路由。然而,这两个目标对于 WMN 在某种程度上是冲突的,因为最短路径路由算法限制了网络资源的使用,使每个业务的路由路径最短,在这种路由策略下,WMN 中某些链路容易成为路由的瓶颈,使 WMN 的网络容量下降;相反,负载均衡路由则企图使用所有可用的网络资源,使网络负载尽可能均匀地分配到 WMN 各链路上,从而使业务请求的路由路径变长,使整个网络路由所需要的无线链路数增多,导致 WMN 的链路信道干扰加重,也使 WMN 的网络容量下降。针对这个问题,本文提出了适合 WMN 的自适应路由算法,根据 WMN 的网络拓扑和业务请求特点,自适应地调整路由策略,达到最大化 WMN 网络容量的目的。

## 2 WMN 线性规划描述

WMN 由无线 Mesh 路由器通过多跳组成,每个无线 Mesh 路由器配置了  $N$  个网卡(Network Interface Card, NIC),WMN 中可以使用  $C$  个正交无线信道进行通信。使用  $G(V, E)$  表示多信道 WMN 的物理拓扑图,其中,  $V$  表示无线 Mesh 网络所有节点集合,  $E$  表示无线 Mesh 网络所有无向边的集合,每个属于  $V$  的顶点  $v$  代表一个静态的无线 Mesh 路由器,对于两个顶点  $m, n$ ,其中  $m, n \in V$ ,如果  $n$  在  $m$  点的通信范围内,则顶点  $m$  和  $n$  之间存在无向边。当 WMN 中的每个节点分配了信道后,WMN 的逻辑拓扑结构即唯一确定,因此,使用  $G' = (V, E')$  表示 WMN 的逻辑拓扑结构。如果网络中两个在通信范围内的节点  $u$  和  $v$  之间有多个可以使用的信道,且节点  $u$  和  $v$  都有多个可用的网卡,则在图  $G' = (V, E')$  中点  $u$  和  $v$  之间可能存在多条边,因此,图  $G' = (V, E')$  可能是多重图。同样,如果在  $u$  和  $v$  之间没有可以使用的信道或者节点  $u$  和  $v$  没有可以使用的网卡,则点  $u$  和  $v$  之间不存在边,即  $x_{uv}^i = 0$  ( $i \in \{1, 2, \dots, C\}$ )。为了提高 WMN 的网络容量,必须采用合适的信道分配策略和路由算法,本文假定信道分配后,网络拓扑  $G' = (V, E')$  每条链路的网络带宽已确定,通过采用自适应的路由算法提高 WMN 的网络容量,下面给出自适应路由的线性规划变量和公式描述。

### 2.1 变量

为了实现 WMN 的路由计算,定义了线性规划中的相关变量。 $\lambda_k^{s,d}$  表示节点对  $(s, d)$  之间的第  $k$  个业务流量请求, $\lambda^{s,d}$  表示节点对  $(s, d)$  之间的业务流量请求总和,则有  $\lambda^{s,d} = \sum_{k=1}^K \lambda_k^{s,d}$ ,其中  $s, d \in V$ ;  $\alpha_{ij,c}^{s,d}$  表示节点对  $(s, d)$  通过网络链路  $(i, j)$

且使用信道为  $c$  的链路,其中,  $s, d, i, j \in V, e_{ij} \in E, c \in \{1, \dots, C\}$ , 当  $\alpha_{ij,c}^{s,d} = 1$  时表示节点对  $(s, d)$  业务通过链路  $(i, j)$  且信道为  $c$  的链路,否则  $\alpha_{ij,c}^{s,d} = 0$ ; 变量  $\lambda_{ij}^c$  表示所有通过  $(i, j)$  且使用信道为  $c$  的逻辑链路的网络流量,其中  $\lambda_{ij}^c = \sum_{s, d \in V} \alpha_{ij,c}^{s,d} \lambda^{s,d}, i, j \in V, e_{ij}^c \in E', c \in \{1, \dots, C\}$ , 当  $\lambda_{\max} = \max \lambda_{ij}^c$ , 则  $\lambda_{\max}$  表示通过  $G'$  中最大的链路负载;  $p_{ij}^c$  表示网络  $G' = (V, E')$  上的逻辑链路上的最大容量,  $i, j \in V, e_{ij}^c \in E', c \in \{1, \dots, C\}$ ; 变量  $h_{G'}^{s,d}$  表示在拓扑  $G'$  上节点对  $(s, d)$  业务请求的路由最小跳步数,其中  $h_{G'}^{s,d} = \sum_{i, j} \lambda_{ij,c}^{s,d}, e_{ij} \in E', \forall c \in C$ 。给定一个路由请求  $r = (s_r, t_r, l_r)$ ,其中  $s_r, t_r, l_r$  分别表示业务请求的源节点、目的节点和请求带宽,那么,对于一组业务请求  $R$ ,当在  $G'$  上可以求得每个业务请求的路由,那么对应  $R$  的一组路由集合表示为  $P$ ,即  $P = \{P_r | r \in R\}$ ,其中  $P_r$  表示  $s_r$  和  $t_r$  之间的路由路径。对于任意路由路径  $P_r$ ,定义路由扩张因子  $\omega_r = |P_r| / h_{G'}^{s,d}$  表示路径  $P_r$  相对最短路径的比值,当  $\omega_r(P) \leq c$  时,称  $P$  为路由扩张因子为  $c$  的短路径路由。对于一组业务请求  $R$ ,当使用负载均衡路由算法时,由于网络上的链路负载不可能相等,因此,使用  $\lambda$  表示对应负载均衡路由算法中链路负载的最大值,则  $\eta = \lambda_{\max} / \lambda$  为负载均衡率。显然,  $\eta$  越大,则 WMN 的链路负载越不均衡;同样,  $c$  越大,则业务请求  $R$  的路由跳步数越大。

### 2.2 优化目标

$$\text{Max } \Phi \quad (1)$$

其中,  $\Phi = \sum_{s, d \in V} \sum_{k=1}^K \lambda_k^{s,d} \cdot \alpha_{ij,c}^{s,d}$ , 式(1)表示 WMN 的网络容量。

### 2.3 约束条件

$$\sum_{c=1}^C \alpha_{ij,c}^{s,d} \leq 1; \forall s, d, i, j \in V, e_{ij} \in E' \quad (2)$$

由于链路  $(i, j)$  之间可以使用多个信道建立多条逻辑链路,为了避免业务包的无序到达目的地节点,因此使用式(2)对节点对  $(s, d)$  的路由进行约束,使节点对  $(s, d)$  的流量仅能经过一条逻辑链路。

$$\sum_{c=1}^C \lambda_{ij,c}^{s,d} \lambda^{s,d} - \sum_{j \in V} \sum_{c=1}^C \lambda_{j,i,c}^{s,d} \lambda^{s,d} = \begin{cases} \lambda^{s,d}, & s = i \\ -\lambda^{s,d}, & d = i \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)表示通过各节点对  $(s, d)$  的业务流量最小有一条可用的路由路径,同时使通过各路由路径中间节点上的流量满足流量守衡约束。

$$\lambda_{ij}^c \leq \eta \cdot \lambda \quad (4)$$

式(4)使通过网络  $G'$  中每条链路  $e_{ij}^c$  上的流量不大于设置的负载阈值。

$$\lambda_{ij}^c \leq \beta \cdot p_{ij}^c \quad (5)$$

式(5)使通过网络  $G_A$  中每条链路  $e_{ij}^c$  上的流量不大于网络的可用带宽容量,其中  $0 < \beta \leq 1$ , 通过  $\beta$  可以调整网络  $G_A$  中每条链路  $e_{ij}^c$  的带宽利用率,通常  $\beta$  值越大,网络中的队列延迟越长,一般设置  $\beta = 0.8$ 。

$$\sum_{i, j \in V} \sum_{c=1}^C \alpha_{ij,c}^{s,d} \leq c \cdot h_{G'}^{s,d} \quad (6)$$

其中,  $s, d \in V, e_{ij} \in E, c \geq 1$ , 式(6)使节点对  $(s, d)$  的路由跳步数小于设置的阈值。

## 3 自适应路由算法

使用最短路径路由(Shortest Path, SP)算法虽然能减少

路由时延,但是也使 WMN 中的某些链路成为路由的瓶颈,导致网络的吞吐量下降。虽然负载均衡路由 (Load Balancing, LB) 算法尽可能使 WMN 中的业务流量均衡分布到各链路上,但同时也使业务请求的路由跳步数增多,从而使路由所需要的网络链路数增多。由于 WMN 中的无线链路属于共享信道,无线链路之间相互存在干扰,因此,路由所需要的网络链路数越多,网络总的干扰越大,因而,造成了 WMN 的网络容量下降。因此,为了提高 WMN 的网络容量,需要在最短路径路由和负载均衡路由中进行某种折中。本文针对这个问题,通过自动调整路由扩张因子  $c$  和负载均衡率  $\eta$ ,提出了一个适合 WMN 特点的自适应路由算法,即在路由计算时,根据网络的拓扑结构和业务请求的分布特点,自适应地调整  $c$  和  $\eta$ ,应用迭代路由算法进行路由计算,得到给定业务请求  $R$  和网络拓扑  $G' = (V, E')$  的最大吞吐量  $\Phi_a$ ,并返回  $\Phi_a$  对应的路由  $P$ 。自适应路由算法如下所示:

```

输入:业务流量矩阵和网络逻辑拓扑  $G' = (V, E')$ ;
输出:业务请求  $R$  的路由集合  $P$ 。
Adaptive_routing () {
    1) SP_routing(); // 返回每个业务请求的  $h_{G'}^{s,d}$ 
    2) LB_routing(); // 返回链路负载  $\lambda$ 
    3) For ( $c = 1; c \leq 4; c += 0.5$ ) {
        4) dim  $\Phi_a$ ; // 定义 WMN 的网络容量
        5) For ( $\eta = 1; \eta \leq 2; \eta += 0.5$ ) {
            6) Routing ( $c, \eta$ );
                // 返回此时  $c$  和  $\eta$  对应的网络容量  $\Phi^*$ 
            7) if ( $\Phi^* > \Phi_a$ )
            8)  $\Phi_a = \Phi^*$ ; }
        9) Return  $P$ ; //  $P$  为吞吐量最大值  $\Phi_a$  对应的路由集合
}

```

算法第 1) 行表示通过使用最短路径路由算法(如 Dijkstra 算法),返回业务请求  $R$  对应的每个业务路由的最短路径长度  $h_{G'}^{s,d}$ ;算法第 2) 行表示通过使用的负载均衡路由算法返回负载均衡的链路负载值  $\lambda$ ;算法第 3) ~8) 行通过调整路由扩张因子  $c$  和负载均衡率  $\eta$ ,应用迭代方法求出 WMN 最大的网络容量  $\Phi_a$ ;算法第 9) 行表示返回最大的网络容量  $\Phi_a$  对应的路由集合  $P$ 。

## 4 仿真实验与分析

### 4.1 实验说明

采用 NS2 网络仿真工具建立类似文献[9]的仿真场景,搭建 WMN 的仿真环境。每个无线 Mesh 节点的发射距离和相应的干扰距离分别设为 250 m 和 550 m,在 800 m × 800 m 的场景中随机生成包含 30 个节点的网络结构,每个节点  $u$  均配置  $N$  个 NIC,采用 IEEE802.11b 标准的无线链路,无线链路的传输速率设为 22 Mbps,WMN 可用的正交信道数为  $C$ 。为了有效的实施多跳路由,采用 IEEE802.11 无线局域网的分布式协调功能 (Distributed Coordination Function, DCF) 作为 MAC 层协议,利用 RTS/CTS 机制控制分组将数据分组传输到相邻节点,在每个网络结构下,在业务请求按照均匀和随机两种方式在各节点对之间的进行分布,节点数据传输方式采用连续比特速率 (Continuous Bit Rate, CBR) 的流量模式,分组大小为 512 Byte,发送速率在 [0,2] Mbps 均匀分布。

### 4.2 实验结果分析

为了验证本文提出的自适应路由 (Adaptive Routing, AR) 算法的网络容量,分别将它与最短路径路由算法 (Shortest-Path, SP) 和负载均衡路由算法 (LB) 的网络吞吐量进行实验比较。为了比较三个算法在不同网络状态下的网络

吞吐量,实验分别在  $N = 3, C = 3$  网络状态下,采用文献[9]的信道分配策略,在不同的业务流量负载下进行模拟比较,并使用 A 状态表示业务请求均匀分布模式,使用 B 状态表示业务请求随机分布模式,实验结果分别如图 1、2 所示。

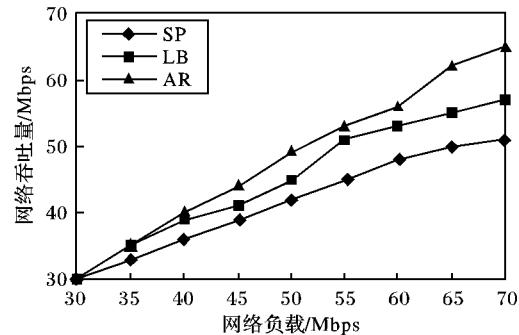


图 1 网络负载和网络吞吐量(A 状态)

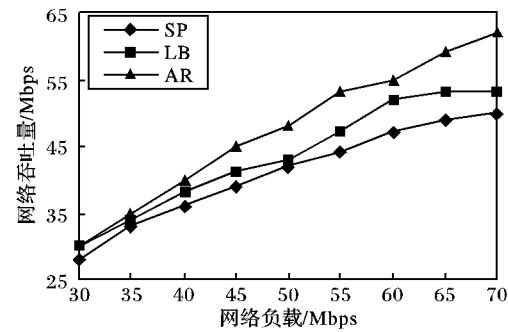


图 2 网络负载和网络吞吐量(B 状态)

从图 1 可以看出,在业务请求均匀分布的条件下,SP 的网络吞吐量在各种负载下均较小,说明在业务请求均匀分布的条件下,LB 算法能根据流量分布特点,使业务请求流量均匀分配到 WMN 各链路上,从而能有效提高 WMN 的网络容量。然而,SP 算法使 WMN 的某些链路成为路由的瓶颈,导致网络容量并不理想。从图 2 可以看出,在业务请求随机分布的条件下,LB 的网络吞吐量在各种负载下均较低,说明在业务请求分布不均匀的条件下,负载均衡路由算法使业务请求路由的平均跳步数增多,从而使 WMN 的无线信道干扰增大,导致了 WMN 的网络容量较小。同时,从图 1、2 还可以看出,在不同的业务流量分布下,LB 和 SP 均表现出不同的网络性能,说明 LB 和 SP 均不能很好地适应流量变化。另外,在不同的网络负载下,AR 算法的网络吞吐量均比其他两个算法大,说明 AR 算法能根据网络的拓扑结构和业务请求特点,自适应地改变路由策略,从而提高了 WMN 的网络吞吐量。

## 5 结语

WMN 将成为下一代无线 Internet 的主要技术,具有广阔的发展前景。为提高 WMN 的网络容量,路由设计是一个关键的因素。本文在 WMN 模型的基础上,通过对 WMN 的路由问题进行分析,应用线性规划公式对 WMN 的路由进行描述,在路由计算的时候,应用迭代的路由算法,求出各种网络结构和业务请求分布条件下最大的网络容量  $\Phi_a$ ,然后返回此最大值  $\Phi_a$  对应的路由  $P$  进行实际路由。仿真实验表明,自适应路由算法较 SP 和 LB 路由算法能提高网络的吞吐量。由于 WMN 有别于有线网络,WMN 各层协议之间相互依赖,因此,下一步的工作是根据 WMN 的特点,对 WMN 的跨层优化问题进行研究。

(下转第 1217 页)