

多信道无线网状网带宽有效的路由机制设计*

项 慨^{1a,2}, 曾园园^{1b}

(1. 武汉大学 a. 计算机学院; b. 电子信息学院, 武汉 430079; 2. 湖北经济学院 信息管理学院, 武汉 430205)

摘要: 针对基于 IEEE 802.11 标准的多信道无线网状网中采用接纳控制方案, 设计出一种分布式的低干扰且带宽保证的最短路径路由协议; 该协议通过分布式免干扰的链路调度机制, 并根据带宽要求为链路分配相应时槽数, 以实现带宽保证的链路流。NS-2 模拟实验结果显示, 该协议能为通信链路提供有效的带宽保证, 对于有带宽保证要求的业务, 可实现较高的通信连接成功概率, 具有良好的性能。

关键词: 无线网状网; 路由协议; 带宽有效; 多信道

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)08-3081-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.073

Routing design for bandwidth-aware multi-channel wireless mesh networks

XIANG Kai^{1a,2}, ZENG Yuan-yuan^{1b}

(1. a. Computer School, b. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. School of Information Management, Hubei University of Economics, Wuhan 430205, China)

Abstract: This paper presented a distributed bandwidth-aware routing protocol based on multi-channel wireless mesh networks by utilizing admission control. The protocol used distributed link schedule to prevent interference and guaranteed enough bandwidth for link flow by slot assignment schemes. It made NS-2 simulations to test the protocol. The results show that this protocol achieves much better performance, it can effectively provide bandwidth guaranteed path according to connection requests.

Key words: wireless mesh network; routing protocol; bandwidth-aware; multi-channel

0 引言

随着无线用户对于高速宽带接入的要求, 无线网状网 (wireless mesh networks) 技术应运而生。无线网状网可以动态地自组织和自配置, 节点自动建立与维护其间的网状连接^[1,2]。无线网状网由节点组成, 节点分为网状网路由器和网状网客户机, 每个节点都可以转发分组, 既能由网状网路由器提供相对稳定的网络骨干结构, 又允许其客户机节点以灵活的 Ad hoc 自组织方式进行组网。无线网状网是一项非常有前途的无线技术, 在宽带家居网络、小区网络、企业网络和楼宇自动化等领域有着广泛的应用前景。学术界已经开始从无线网状网的角度重新思考现有无线网络, 特别是 IEEE 802.11 网络、移动自组织网络和无线传感器网络等的协议设计。

大多数的无线网状网应用为用户提供了具有一定 QoS 要求的宽带服务。带宽问题是无线网状网需要考虑的一个重要问题。网状网路由器通常可以提供多个天线、多个信道, 因此可以有效缓解网络带宽和网络能力下降的问题。使用多个信道传输, 节点可以同时多个不同的信道上发送或接收数据。使用多信道的传输技术, 改善了网络系统的健壮性、连通性和性能。然而节点可使用的信道数是有限的, 即使是在多信道的无

线网状网中, 使用同一信道通信的两个相近的传输对之间仍然可能存在着相互干扰的问题。针对上述问题, 本文提出一种适合无线网状网的带宽保证的最短路径路由协议。

传统的无线 Ad hoc 网络的路由协议不适合多天线、多信道的无线网状网, 因此必须针对性地设计有效的路由协议, 在节点对之间选择路径和选择在该路径上合适的信道、天线进行通信。无线网状网的 QoS 路由设计也是一个极具挑战性的研究热点。文献[3]提出基于图论方法的多天线无线网状网中的信道分配方法和减少干扰的机制。目前关于无线网络的许多研究将避免干扰的调度和路由设计问题进行综合考虑以提高网络性能。文献[4]提出了一种基于网状网节点的嵌入 RSSI 信息进行处理、转换, 以及综合到路由过程中的机制可优化路由算法性能。文献[5]提出一种基于丢包自私行为的跨层路由方法, 利用包投递率属性描述链路质量, 并据此选择可靠性好的高性能路径。

本文采用了融合链路调度和跨层路由的设计思想, 通过运用分布式免干扰链路调度方式, 为网络链路分配满足带宽要求的免干扰的时槽进行数据通信, 即保证同一时槽内活动的传输之间没有干扰的产生; 由此预留了节点对间可以调度的通信流。在此基础上提出最短路径路由协议, 采用接纳控制来保证端到端之间的带宽要求。

收稿日期: 2011-11-06; **修回日期:** 2011-12-13 **基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项基金青年教师资助项目(111093); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(61103218)

作者简介: 项慨(1977-), 男, 湖北武汉人, 讲师, 博士研究生, CCF 会员, 主要研究方向为无线网络计算、多媒体通信技术(xksuckx@gmail.com); 曾园园(1980-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络、无线自组网。

1 干扰模型

无线网状网由静态的网状路由器和移动的网状客户端组成。本文的网络结构和文献[3]相同。无线的网状路由器上安装有一个通信流量集中接入点(traffic aggregation access point),移动的网状客户端通过该接入点接入网状网维持连通。无线网状路由器之间可以自组织成一个多跳 Ad hoc 网络。无线网状网中的每个节点都配备有多个 802.11 标准的网卡(NICs)。每个网卡可以调制提供给某一信道使用,一个节点上的两个网卡可以分别调制到不同的信道上通信。假定系统中总共有 C 个互补重叠的频段信道可供使用,系统中的每个节点配备有 Q 个网卡($Q \leq C$)。设每个节点的通信半径为 r ,干扰半径为 R (通常 R 是 r 的 2~3 倍)。

将无线网状网的骨干结构部分建模为一个平面图 $G=(V, E)$ 。信道分配算法 F 为每个节点 $v \in V$ 分配 Q 个网卡,并分配不同的一组信道 $F(v)$ 。

本文采用文献[3]的信道分配算法,为每个节点分配好一组信道。在完成信道分配之后,可以得到新的拓扑 $G'(V, E')$,图 G' 为一个多图,其中任一条边 $e=(u, v, k)$ 表示在节点 u 和 v 之间可以通过信道 k 进行通信。本文以下定义和协议设计都是基于该拓扑图 G' 的。两个节点之间进行直接通信的条件是:两个节点在彼此通信半径 r 之内,且两个节点可以使用相同的信道。这样的两个节点互称为邻居节点。两个节点如果有共同的邻居节点且可以使用相同的信道通信,这样的两个节点互称为 2 跳邻居节点。这里将节点的干扰模型定义如下:节点 2 跳邻居节点不能同时发送和接收数据,以此保证节点对之间无干扰的传输。定义链路干扰模型如下:通信对 $e_1(u, v, k_1), e_2(x, y, k_2) \in E'$,如果满足:a)两个通信对使用相同的信道 $k_1 = k_2$;b)以下四个节点对 $(u, x), (u, y), (v, x), (v, y)$ 中有一对在彼此通信范围之内且使用与 e_1, e_2 相同的信道,则认为通信对 e_1, e_2 相互干扰。这里用 $I(e_1)$ 表示与 e_1 干扰的通信边集合。

2 低干扰且带宽保证的调度机制

2.1 问题的描述

本文以下部分的讨论采用基于第 1 章提出的信道分配后形成的网络拓扑模型 G' 。假定 G' 上的每一条边上对于分配的信道 i 的通信能力为 $c(e(i))$ bit/s,即表明在边 e 在 1 s 内可以传输的最大数据通信量。设定图 G' 中的每条边 e 上实际分配的网络流量为 $f(e(i))$, $1 \leq i \leq C$;即 $f(e(i))$ 为在边 e 上节点间使用信道 i 通信时的实际通信量大小。本文对于节点对通信采用了周期性 TDMA 调度的方式,对于存在干扰的通信链路将调度不同的时槽完成通信任务。对于图 G' 中的边 $e(u, v; i)$,即节点 u, v 采用信道 i 通信的通信边,将可能会被调度到每个时间槽 $t(t=1, 2, \dots, T)$, T (是一个整数)为一个调度周期的时间槽个数。为了简化问题,这里假定每个时间槽长度为 1 s 的单位时间长度。在进行链路调度时,为了避免产生通信干扰,因此对于互相干扰的链路 $e_1(u, v; i), e_2(x, y; i)$,不能使用相同的时间槽。

根据上述干扰模型,低干扰且带宽保证的调度必须满足以

下条件:a)保证调度本身是可行的,不存在干扰的;b)调度的边上的通信流量应当大于所要求的带宽 B_w ,即 $f(e(i)) \geq B_w$ 。

2.2 调度的充要条件

文献[6]提出了保证避免干扰的可行调度的充分和必要条件,接下来在此基础上考虑带宽保证的可行调度。一般而言,干扰半径 R 是通信半径 r 的 2~3 倍,设 $q=R/r$,在均质的网络中这个值是固定不变的。

定理 1 必要条件。任何有效的带宽保证的、避免干扰的通信链路流量应该满足以下限制:

$$\frac{f(e(i))}{c(e(i))} + \sum_{e' \in I(e)} \frac{f(e'(i))}{c(e'(i))} \leq c(q) \quad (1)$$

其中: $c(q)$ 同文献[6]的定义,为一个依赖于 q 的常量。例如,当 $q=1, 2, 2.5$, 分别有 $c(q)=4, 8, 12$ 。

定理 1 是本文提出的带宽保证的可行调度的必要条件。其证明过程同文献[6]给出的可行调度的必要条件证明,故此处略去。

定理 2 充分条件。如果通信链路满足以下的流量限制条件,则该通信调度是一个有效的带宽保证的、避免干扰的调度。

$$\frac{f(e(i))}{c(e(i))} + \sum_{e' \in I(e)} \frac{f(e'(i))}{c(e'(i))} \leq 1 \quad \text{and} \quad f(e(i)) \geq B_w \quad (2)$$

定理 2 是本文提出的带宽保证的可行调度的充分条件。其证明过程类似文献[6]。显然有流量 $f(e(i)) = a(e(i))c(e(i))$, $a(e(i))$ 为边 e 处于活动通信的时间所占的比例部分。因此边 e 上分配的调度时槽个数表示为 $S(e(i))$, 且有

$$S(e(i)) = Tac(e(i)) \quad (3)$$

因此,由定理 2 可以得出式(4),即如果通信链路 e 调度时槽数满足式中限制条件,则该通信链路的调度是带宽保证且抗干扰。其中 e' 为通信链路 e 的干扰边。

$$S(e(i)) + S(e'(i)) \leq T \quad \text{and} \quad S(e(i)) \geq \frac{B_w}{c(e(i))} T \quad (4)$$

2.3 链路调度机制

以下提出一种分布式的带宽保证且避免干扰的链路调度算法,该算法思想是基于分布式的边着色问题。算法分别为每一条调度的通信链路分配满足流量要求的时槽个数,以保证链路带宽,其伪代码如算法 1 所示。定义 $N(u)$ 为节点 u 的通信半径内的邻居节点集合, $I(u)$ 为节点 u 干扰半径内的邻居节点集合。测试干扰半径内邻居的方法可以采用使节点增大传输功率发出 TEST 消息来覆盖整个干扰半径 R 的区域。 $N(u)$ 集合可以通过节点间相互交换 HELLO 消息来发现;同时邻居节点的干扰邻居也可以通过 HELLO 消息的交换来获取。算法 1 中步骤 1 是收集节点本地信息,包括邻居节点和干扰节点信息。步骤 2~7 为周期性的调度过程。步骤 3 中节点根据路由要求,被选为调度候选者。步骤 4 中节点 u 被选为候选者后,将用较高功率发送一个 CANDIDATE 消息并等待一个 timeout 时间,以防止候选者冲突。步骤 5 和 6 根据式(4)为当前链路 e 分配时间槽。由式(4)进行通信链路 $e(k)$ 的时槽分配可以保证 $S(e(k))$ 满足带宽要求同时与 $S(e'(k))$ 交集为空集,即实现带宽保证且低干扰的调度。根据式(4)若能分配有效带宽给当前链路 e 用于调度,则用分配的时槽进行传输;否则链路调度请求被拒绝。

算法1 分布式带宽保证调度

1 Each node u obtains $N(u)$ and interference neighbor $I(u)$ by sending out original power HELLO and higher power TEST messages. And obtain neighbor's interference neighbor set $I(N(u))$.

2 for each period j do

3 Each node u is elected to become a candidate according to routing

4 If u elects to be a candidate, it sends out CANDIDATE message with higher power, and set a timeout delay. During the timeout, if u receive CANDIDATE message from other node, it will not participate in this cycle.

5 If node u participates in the cycle, it chooses slots greedily for each edge adjacent to node u as $e(u, v; k)$ for which $S(e(k))$ slots needed to be allocated in $T \setminus S(e'(k))$, and $e' \in I(e)$.

6 If has the solution and $S(e(k)) \geq B_w T / c(e(k))$, the schedule is admitted. Otherwise not admitted and defer transmission.

7 end for

3 带宽保证的最短路径路由设计

3.1 问题描述

本文提出的带宽保证的最短路径路由是:在网络图中的源节点 s 和目标节点 d 之间,对于具有流量要求的通信请求 (s, d, B_w) ,为其计算寻找一条满足带宽且最短的路径 $p = (s, i, j, \dots, m, d)$,根据流量要求,显然最短路径上的每一条通信链路的通信流量不能小于 B_w ,而不在路径上的链路上不分配流量。

3.2 路由设计

为了保证得到的是满足带宽的最短路径,在路由过程中对每一跳节点分布式地采用一种接纳控制的方法。本文提出的路由过程包括路由发现和路由响应两个阶段。网络中的竞争(即干扰)包括流内竞争和流间竞争两种。流间竞争是由路径 p 上的无线链路和非 p 上的无线链路之间产生的干扰;流内竞争是由路径 p 上的无线链路之间所产生的干扰。

路由发现采用的是类似源路径路由协议的按需路由发现机制。为了建立连接请求,源节点广播一个路由请求消息 Rt-Req 用于发起路由。Rt-Req 消息包括了源节点的 ID 号、目的节点 ID 号、经过路径信息 Path、路径带宽 B_w 。图1列出了 Rt-Req 的消息格式。

Msg flag	Seqno	SrcID	DstID	Path	B_w	...
----------	-------	-------	-------	------	-------	-----

图1 Rt-Req 消息格式

路由过程中,当节点 u 收到来自节点 v 的 Rt-Req 消息,由 Rt-Req 消息提取出相应的 SrcID、DstID、Path、 B_w 等信息,节点 u 可更新路径信息表示为 $r(u)$,即 $r(u) = (\text{SrcID}, \text{Path} \cup \{u\}, \text{length}(\text{Path}) + 1, B_w')$ 。其中, B_w' 取决于 $bw(v, u)$ 的计算,即链路 (v, u) 的带宽分配采用接纳控制来实现。具体的做法是:根据算法1,如果从 v 到 u 的部分路径上的带宽保证的可行调度是存在的,则当前 u 的接纳控制成功,节点 u 将维护当前从源节点到 u 的路径 $r(u) = (\text{SrcID}, \text{Path} \cup \{u\}, \text{length}(\text{Path}) + 1, \min\{B_w, bw(v, u)\})$ 。

若 u 不是目的节点,则更新后的路径信息将重新封装到 Rq-Req 消息中并转发。每个节点根据消息的 Seqno 仅转发第一次收到的 Rq-Req 消息。如果 u 的接纳控制失败,则从源节点

到 u 的当前路径不满足带宽要求,节点 u 将丢弃 Rt-Req 消息。

如果路由发现过程中出现了回环或者发现过程超过最大允许跳数 MAX_HOP,则丢弃当前通信请求的 Rt-Req 消息。

当目的节点 d 收到一个 Rt-Req 消息,且到 d 的路径上的流量满足带宽保证的调度是可行时,就产生了一条从源节点到目的节点的完整的满足带宽要求的路径。在路由发现的过程中,可能存在有从源节点到目的节点的多条路径。收到第一条 Rt-Req 消息开始,等待一定时间,从多条路径中选择一条最短路径,并沿着这条路径发送 Rt-Reply 消息返回到源节点。对于收到 Rt-Reply 的节点则形成确认后的路径信息,而其他节点如果在一定时间内没有收到 Rt-Reply 消息,则到时间后清空存储在节点的路由信息以及相应路径上的拟分配时槽信息。当源节点 s 收到了来自路径上转发回的 Rt-Reply 消息,则保证带宽的请求连接即可建立。

在通信的过程中,如有路径上的链路断开时,即该链路的下行或上行链路发现超过预定时间接收不到该节点的数据包,这时需要启动重新路由的过程。对于端到端的数据传输,如果源节点在较长的一段时间内,一直没有收到来自目的节点的数据包,则认为该路径上的链路断开,路径失效。当发现这种情况,由源节点重新发出一个 Rt-Req 消息到其邻居节点,重新开始路由发现和响应的过程。

4 模拟结果和分析

本章将对本文提出的带宽保证的最短路径路由进行模拟。在网络模拟软件 NS-2 中建立的模拟场景如下:无线网状网由 n 个静态的骨干节点随意放置在 $900 \text{ m} \times 900 \text{ m}^2$ 的区域。模拟实验开始时,使用文献[3]提出的信道分配算法事先形成一个连通的网络拓扑结构,每个节点具有固定的通信半径 250 m 和干扰半径 500 m。模拟网络中共有 1 000 个随机选取源和目的节点且带宽标准也随机,但满足 $B \leq B_{\max}$ 的通信连接请求。每个连接持续的时间为 1~200 的随机时间单位。模拟中采用连接请求失败率作为评价路由协议的主要性能标准。失败率的计算方法是:连接请求失败的个数与总的连接请求个数的比值。在采用网络规模(n)、可分配信道数(C)、网络 NIC 个数(Q)和信道能力(CAP)等不同网络参数的情况下,将带宽保证路由协议(BGSR)与最小跳数路由协议(SPR)进行性能对比。

图2~5给出了模拟的结果。从结果可以看出,本文提出的 BGSR 总是比 SPR 协议具有更好的连接请求通过率,也更适合有一定 QoS 要求的无线网状网。此外,还可以从图中看到,当最大带宽 B 值增加,失败率也随着增加,这是因为更大的带宽要求增加分配给每个请求的连接,所以带来的请求连接失败的概率也增大。对比图2与图3、图4与图5可以发现当网络规模增大时,失败率也增大,这是因为较大的网络规模引起更多的干扰,使得可提供的带宽资源下降。此外,对比这些图还可以发现,当网络中使用较多信道且信道能力提高时,失败率是下降的,这是因为当网络提供更多的使用信道可以为节点尽可能分配不同的信道通信,从而减少干扰。对比图5与图6可以发现,当增加网络 NIC 个数,也会降低失败率,其原因是当网络 NIC 个数增加,节点具有更大概率来使用不同的信道和不同的节点通信,从而增大了连接请求成功的可能。

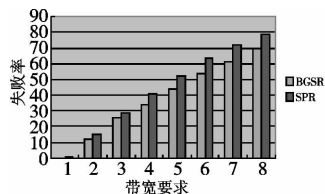


图2 BGSR和SPR协议的失败率 ($n=25$, $C=3$, $Q=2$, $CAP=11$)

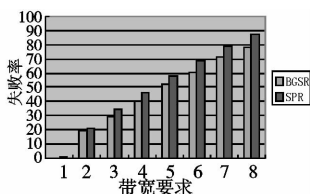


图3 BGSR和SPR协议的失败率 ($n=40$, $C=3$, $Q=2$, $CAP=11$)

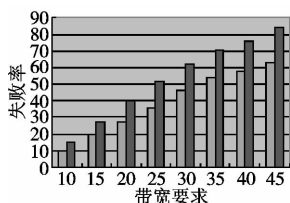


图4 BGSR和SPR协议的失败率 ($n=25$, $C=12$, $Q=2$, $CAP=54$)

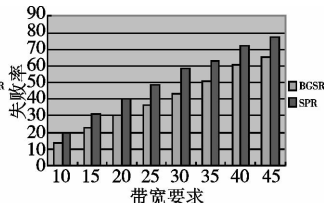


图5 BGSR和SPR协议的失败率 ($n=40$, $C=12$, $Q=2$, $CAP=54$)

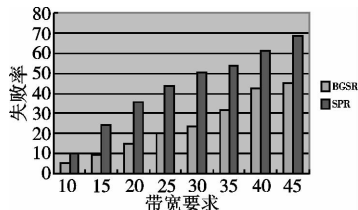


图6 BGSR和SPR协议的失败率 ($n=40$, $C=12$, $Q=3$, $CAP=54$)

5 结束语

多信道无线网状网是下一代无线网络中极具前景的技术,由于受到网络干扰的影响,在面对多用户、实时的多媒体等类型应用场景时,带宽要求和提供带宽保证的通信非常重要。本

文针对多信道网络干扰,提出了无线网状网中带宽保证的分布式链路调度机制和基于该机制的最短路径路由协议。模拟实验结果表明,本文提出的路由协议能显著提高具有带宽要求业务的通信请求成功率,具有良好的性能。今后,笔者将在本文现有的研究基础上,对多信道无线网状网中的带宽保证的多播路由问题进行研究。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, WANG X. A survey on wireless mesh networks [J]. IEEE Communication Magazine, 2005, 43(9): 23-20.
- [2] MASE K. Layer 3 wireless mesh networks; mobility management issues [J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(7): 156-163.
- [3] SRIKRISHNA S, GUO J, JHA S. Channel assignment in multi-radio wireless mesh networks; a graph-theoretic approach [C]//Proc of the 1st International Conference on Communication Systems and Networks. 2009.
- [4] AMUSA E, ADJEI O, ZHANG J, et al. An efficient RSSI-aware metric for wireless mesh networks [C]//Proc of the 9th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad hoc and Wireless Networks. 2011.
- [5] PARIS S, NITA-ROTARU C, MARTIGNON F, et al. EFW: a cross-layer metric for reliable routing in wireless mesh networks with selfish participant [C]//Proc of the 30th IEEE International Conference on Computer Communications. 2011.
- [6] ALICHERY M, BHATIA R, LI L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks [C]//Proc of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2005.