

多射频无线 Mesh 网中的接口分域信道分配

杜振国,洪佩琳,周武 ■,薛开平

(中国科学技术大学无线网络通信安徽省重点实验室,安徽合肥 230027)

摘 要: 在多射频多信道无线 Mesh 网中,是无线宽带接入的重要候选技术之一.为了满足无线宽带接入的容量要求,Mesh 路由器节点常需要配置多个无线接口并使用多个正交信道.已有的信道分配方法虽能减少干扰和碰撞,但不能完全避免.本文提出一种域内中心式调度的接口分域信道分配(ICCA)方案,旨在完全避免干扰与碰撞以提高网络吞吐量,尤其能够降低传输时延,特别适合实时业务传输.

关键词: 无线 Mesh 网络;多射频多信道;接口分域信道分配

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 03-0723-04

ICCA: Interface-Clustered Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks

DU Zhen-guo, HONG Pei-lin, ZHOU Wu-yang, XUE Kai-ping

(Anhui Provincial Key Lab of Wireless Information Network, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract: Wireless mesh network (WMN) is one of the important candidates for wireless broadband access services. In order to meet the requirements of capacity of wireless broadband access, mesh routers in WMN are often needed to equip with several radio interfaces and uses a number of orthogonal channels. Interference and collisions may be reduced in recent channel allocation schemes, but can not be completely avoided. A centralized inter-cluster scheduled interface-clustered channel assignment (ICCA) scheme is designed to completely eliminate interference and collisions in order to enhance network throughput. It can reduce the transmission delay that is especially fit for real-time services.

Key words: wireless mesh network; multiple radio multiple channel; interface-clustered channel assignment

1 引言

由于单射频无线 Mesh 网络难以满足未来通信系统宽带接入的容量要求,多射频多信道 Mesh 技术应运而生.采用多射频多信道能够提高网络容量,其关键在于信道分配.信道分配主要考虑最小化干扰和最大化网络连接两个方面,但这两者之间却往往是彼此制约和相互矛盾的^[1],因而需要综合考虑.另一方面,传统的基于 802.11 的多信道无线 Mesh 网络由于采用随机竞争接入,干扰和碰撞是网络容量和高时延限制的主要因素.避免干扰的一个直观的方法是信道分配采用中心调度策略,并且全网同步,但在实际的大范围布网中,全网同步和中心调度往往难以实现.

多射频多信道无线 Mesh 网络的信道分配方案大致可分为固定、动态^[2,3]和混合信道分配三类.混合信道分配方案兼具前两者的特点,具有较高性能和可操作性,但受限于公共信道.文献[4]则给出了一种节点分簇

信道分配算法.但由于该算法的信道分配结果仍是全连接的,因而并不能完全避免干扰.区别于该方案,并针对传统基于 802.11 的多信道无线 Mesh 网络存在的问题,本文利用节点配置多接口的特点将网络分为多个逻辑域,提出了一种基于接口进行分域的信道分配方案 (Interface-Clustered Channel Assignment, ICCA),从而完全避免干扰和碰撞,以达到提高网络容量的目的. ICCA 方案既可固定实现,也可动态实现,能够有效地降低传输时延,有利于实时业务传输,适合以实时多媒体业务为主的未来通信网络.

2 接口分域信道分配方案

无线 Mesh 网络通常由用户接入网和路由骨干网组成.实际组网时,接入网和骨干网一般使用不同频段.例如,用户接入使用 802.11g,骨干网使用 802.11a.因此,在研究信道分配时,主要考虑路由骨干网的信道分配,接入网的影响可以忽略.后文中的节点都是 Mesh 路由器.

本文提出的 ICCA 方案以接口为操作对象,将接口逻辑分域,以达到完全避免碰撞和干扰的目的.

ICCA 方案首先将网络拓扑按照接口分为若干个逻辑域,如图 1 所示.在每个域中,存在一个中心节点,负责调度域内节点间通信.域间通信依赖于域间公共节点,如图 1 中的 C_x 节点($x:1 \sim 13$).公共节点的多个接口可服务于不同域,从而达到域间连接的目的.中心节点上的中心接口,称为主接口,而公共节点上与该主接口通信的接口则称为从接口.一个主接口可以与多个从接口通信,而每个从接口只能与一个主接口通信.每个主接口与多个从接口间形成类似 WLAN 的中心式架构,并使用同一信道同步通信以避免碰撞,相邻域使用不同信道以避免干扰.从接口之间不能通信,这使得物理邻居节点间可能无法联通,从而导致网络的连接性降低,但好处是完全避免了碰撞和同频干扰.一个节点上可能既有主接口又有从接口,即域间可能发生物理上的重叠.

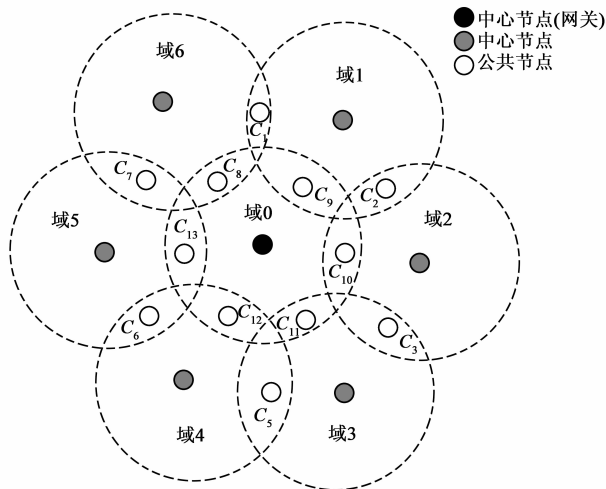


图1 ICCA方案示意图

为了保证网络的连通性以避免出现网络分割,必须有足够数量的正交信道.假设可用正交信道数目为 c ,每个节点配置 r 个接口,若网络拓扑中最大干扰团(任意两个节点间都相互干扰的最大节点集合)的大小为 q ,则当正交信道数 c 满足

$$c \geq q \times r \quad (1)$$

的条件时,ICCA 方案一定可以成功实现.式(1)是 ICCA 方案能够成功实施的充分条件.

3 理论分析与性能评估

3.1 理论分析

以全网节点单位时间内实际接收到流量作为网络的吞吐量,即网络吞吐量 X 定义为

$$X = \sum_{i=1}^N C(i) \quad (2)$$

其中, $C(i)$ 表示节点 i 单位时间内实际接收到的流量, N 为网络中的节点总数.

无线 Mesh 骨干网中的节点 i 发送的流量包括两部分:一部分是节点 i 自身产生的流量,另一部分是来自其它节点的转发流量.假设节点总是优先发送自身产生的流量,仅当还有余力时才转发数据.网关节点不产生流量,而最外层节点没有转发流量.假设网关节点为 0 层节点,自内向外分别为 1、2、 \dots 、 p 层节点,我们将第 i 层节点接收到的由 $i+1$ 层节点产生的流量定义为 i 层局部接收流量,将第 i 层节点接收到的由第 $i+1$ 层节点转发的流量定义为 i 层汇聚接收流量.由此,式(2)可改写为

$$X = F_{\text{loc}} + F_{\text{agg}} \quad (3)$$

其中, F_{loc} 表示全网节点的总局部接收流量, F_{agg} 表示全网节点的总汇聚接收流量.假设每个节点产生流量的速率为 f ,网络中可同时通信的链路数为 L ,则全网局部接收流量为

$$F_{\text{loc}} = fL \quad (4)$$

因此只需求出全网汇聚接收流量 F_{agg} 即可得到网络的理论吞吐量.

在 ICCA 方案中,将包含 n 个从节点的逻辑域定义为 n 从域.假设网络中存在 d_n ($n=1, 2, \dots, D$) 个 n 从域,则网络中每条链路平均每 K 个时隙获得一次传输机会,即

$$K = \frac{\sum_{n=1}^D \frac{nd_n}{\sum_{i=1}^D id_i} n}{\sum_{i=1}^D id_i} = \frac{\sum_{n=1}^D n^2 d_n}{l} \quad (5)$$

其中, $l = \sum_{i=1}^D id_i$ 为网络中的总链路数.

令 N_i 表示第 i 层节点总数, l_i 表示第 i 层和第 $i+1$ 层之间的链路数, S_i 表示第 i 层和第 $i+1$ 层间平均每条链路传输汇聚流量的速率. R 表示所使用传输技术的最大传输速率(如 $R_{802.11b} = 11\text{Mbps}$),则 $f \leq R$.第 $p-2$ 层节点的汇聚流量即为第 p 层节点的局域流量,从而

$$\begin{aligned} s_{p-2} &= \min \left\{ \frac{KTfN_p}{l_{p-2}}, (R-f)T \right\} / KT \\ &= \min \left\{ \frac{fN_p}{l_{p-2}}, \frac{R-f}{K} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, T 为时隙平均间隔.自 $p-2$ 层以内,第 i 层的汇聚流量不仅包括第 $i+2$ 层的局部流量,还包括第 $i+1$ 层的汇聚流量(但受最大发射速率限制),即

$$\begin{aligned} s_i &= \min \left\{ \frac{KT(N_{i+2}f + l_{i+1}s_{i+1})}{l_i}, (R-f)T \right\} / KT \\ &= \min \left\{ \frac{N_{i+2}f + l_{i+1}s_{i+1}}{l_i}, \frac{R-f}{K} \right\} \\ i &= 0, 1, \dots, p-3 \end{aligned} \quad (7)$$

从而全网汇聚接收流量为

$$F_{\text{agg}} = \sum_{i=0}^{c-2} l_i s_i \quad (8)$$

由式(3)、(4)、(8)可得网络理论吞吐量为

$$X = fL + \sum_{i=0}^{c-2} l_i s_i \quad (9)$$

3.2 仿真评估

考虑 7×7 网格拓扑,假设每个节点只能联通且干扰其周围四个节点,且节点均配置双射频.网关节点位于中心,其余节点均以同样的速率 f 产生流量并向网关汇聚.作为对比,考虑基于 802.11DCF 的负载已知信道分配方案(LACA)^[5].假设节点的最大发送速率为 11Mbps,ICCA 方案域内采用 PCF 通信,使用 NS-2^[6] 进行仿真.

3.2.1 理论与仿真吞吐量的比较

考虑可用信道数目为 4、5、6 时的情况,根据 ICCA 方案进行信道分配,将结果代入式(9)即可得到网络的理论吞吐量.ICCA 方案的理论吞吐量与仿真吞吐量的比较如图 2 所示.

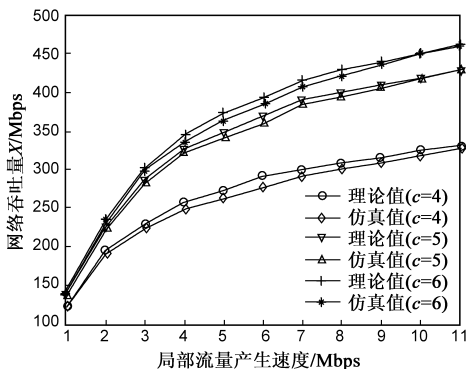


图2 理论和仿真吞吐量的比较

由图 2 可知,理论值总体上大于仿真值.这可能是由于下述原因:首先,在层间汇聚流量传递时,理论分析中总是试图将汇聚流量均匀地分布到各条链路上,这种理想的负载均衡在实际网络中往往难以完全实现;其次,尽管 ICCA 方案消除了干扰,但由于无线链路的不可靠性,传输错误是不可避免的,而理论分析中并未考虑数据出错重传.由图 2 还可以发现,流量较大或较小时仿真值与理论值接近,中间区域两者差异较大.这是因为流量很小时网络总是具有足够的传输能力,流量在链路上是否均匀分布对结果影响不大;而当流量较大时,网络中所有链路均已接近其极限传输速率,这种情况下流量在链路上的分布是近似均匀的.

3.2.2 与 LACA 方案的吞吐量比较

图 3 中的曲线 1 和曲线 2 给出了 4 信道的情况下两种方案的吞吐量.当节点产生流量的速率达到一定

值时,网络的吞吐量将几乎不再变化,此时网络达到饱和.多射频多信道方案能够提供更多的带宽,因而可以达到更高的吞吐量,并且达到饱和吞吐量时的发送速率阈值也有所提高.

图 3 中的曲线 2 和曲线 3、曲线 4 给出了不同可用信道数时 ICCA 方案的吞吐量变化.由图可知,信道数越多,网络吞吐量越大.当信道数由 4 个增加到 5 个时,吞吐量提升极大;但当信道数增加至 6 个时,吞吐量虽有增加,但不如前者明显.因此,从资源的利用率的角度来看,对于本节假设的网络环境,使用 5 个信道时效果最优.

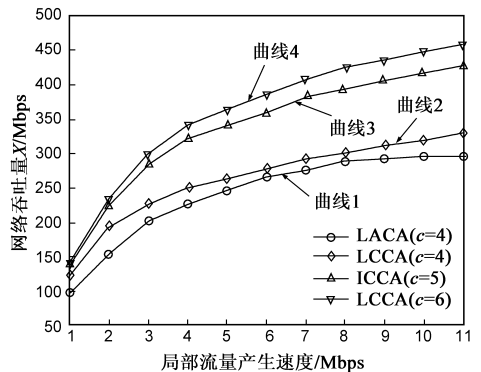


图3 网络吞吐量的比较(双接口)

3.2.3 延时分析

ICCA 方案以损失连接性为代价换取更多无干扰链路,而网络连接性的降低必然影响时延.在 7×7 网格拓扑中,根据 ICCA 方案,可将拓扑自内向外分为 7 层.假设中心网关节点为 0 层节点,编号为 0,一层节点编号为 14,以此类推,6 层节点编号为 45~48.考虑自其它节点至中心网关的端到端传输时延,仿真结果如图 4 所示.

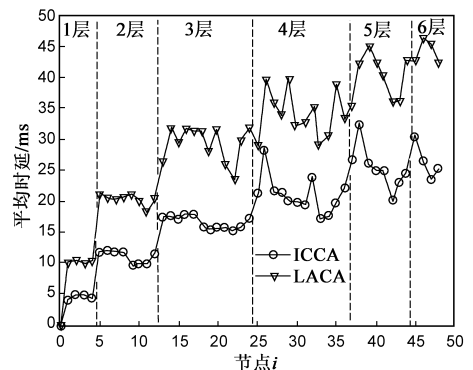


图4 平均时延比较

网络连接性的降低将导致某些节点到中心网关的距离(跳数)增大,这样似乎会使时延增加.然而由图 4 可以发现,事实恰恰相反,ICCA 方案的时延比 LACA 方案更小.这是因为 ICCA 方案中一条链路最多只需要与同一域内的两条同频链路分时共享信道,而 LACA 方案

中一条链路则需要与更多同频链路竞争信道. 因此, 尽管跳数有所增加, 但每跳的等待时延反而减少, 因而总体端到端时延减小. 这一特性归功于 ICCA 方案对于干扰的完全消除.

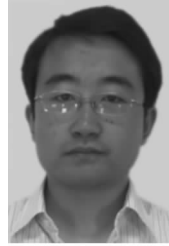
4 总结

本文针对无线 Mesh 骨干网中的信道分配问题, 提出了一种局域中心式调度的无干扰、无碰撞信道分配方案 (ICCA). ICCA 方案将网络分为若干个逻辑域, 域内中心式同频调度通信以避免碰撞, 相邻域间异步不同频以避免干扰. 仿真结果表明, ICCA 方案能够提高网络整体吞吐量, 并且延时更小, 适合实时业务传输.

参考文献

- [1] H Skalli, S Ghosh, S K Das, L Lenzini, M Conti. Channel assignment strategies for multi-radio wireless mesh networks: Issues and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, Special Issue on "Wireless Mesh Networks", 2007, 45(11): 86 - 93.
- [2] Jungmin So, Nitin H Vaidya, Multi-channel MAC for ad hoc networks: Handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[A]. Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (Mobihoc'04)[C]. New York, USA: ACM Press, 2004. 222 - 233.
- [3] 束永安, 洪佩琳, 覃振全. 无线网状网中基于干扰模型的多信道分配策略[J]. 电子学报, 2008, 36(7): 1256 - 1260.
SHU Yong-an, HONG Pei-lin, QIN Zhen-quan. Multi-channel allocation strategy based on interference model in wireless mesh networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(7): 1256 - 1260. (in Chinese)
- [4] S A Makram, M Gunes. Distributed channel assignment for multi-radio wireless mesh networks[A]. IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC'08)[C]. New York, USA: IEEE Press, 2008. 272 - 277.
- [5] A Raniwala, K Gopalan, T Chiueh. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. ACM Mobile Computer Communication Review, 2004, 8(2): 50 - 65.
- [6] Tom Henderson. The Network Simulator ns-2: Documentation [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>, 2009-08-22.

作者简介



杜振国 男, 1984 年 12 月生于陕西铜川, 2007 年在东南大学获工学学士学位, 其后进入中国科技大学, 现为硕博连读生, 研究方向为无线 Mesh 网络、协作通信与网络编码.
E-mail: duduwalt@mail.ustc.edu.cn

洪佩琳 女, 1961 年 5 月出生于浙江宁波, 教授、博士生导师, 研究方向为网络通信与网络安全.
E-mail: plhong@ustc.edu.cn

周武 男, 1972 年 5 月生, 教授、博士生导师, 研究方向为移动通信与无线通信网.
E-mail: wyzhou@ustc.edu.cn

薛开平 男, 1980 年 5 月生于江苏东台, 讲师, 研究方向为下一代 Internet 网络、网络安全与分布式网络.
E-mail: kpxue@ustc.edu.cn