

无线 Mesh 网络联合信道分配和路由协议研究

刘 峰¹, 张 庆¹, 夏宏飞²

(1. 南京邮电大学 图像处理与图像通信江苏省重点实验室, 江苏 南京 210003;

2. 中兴通讯有限公司, 江苏 南京 210012)

摘 要:设计合理的联合信道分配和路由协议对多信道无线 Mesh 网络的性能至关重要。在分析多网卡多信道无线 Mesh 网络中联合信道分配和路由协议特点和研究现状的基础上,提出了一种与按需路由协议结合的联合信道分配算法,通过选择最小干扰信道来优化信道分配;同时采用了一种适应多信道多网卡网络的路由判据方法,该方法考虑了信道干扰、接口切换以及路径跳数三个关键因素。仿真结果表明,文中所采用的协议能较为明显地提高网络吞吐量及减小分组的端到端时延。

关键词:无线 Mesh 网络;多信道;信道分配;路由协议;网络容量

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2010)08-0029-04

Research on Joint Channel Assignment and Routing Protocols for Wireless Mesh Networks

LIU Feng¹, ZHANG Qing¹, XIA Hong-fei²

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Image Processing and Image Communication,

Nanjing Univ. of Posts and Telecom., Nanjing 210003, China;

2. ZTE Telecom. Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: Joint channel assignment and routing protocol is critical to performance of multi-channel wireless mesh networks. On the basis of analyzing the characteristics and current works of joint channel assignment and routing protocols in multi-NIC multi-channel wireless mesh networks, a joint channel assignment algorithm combined with on-demand routing protocols is proposed, which achieves optimum by selecting channels with minimum of interference; a new routing metric that adapt to multi-channel multi-NIC network is also adopted, which take three key factors(channel interference, interface switching and path hops) into consideration. It is demonstrated in the simulation that the proposed protocol enhances network's throughput and reduces packet's end to end delay.

Key words: wireless mesh networks; multi-channel; channel assignment; routing protocol; network throughput

0 引 言

无线 Mesh 网络的一个重要需求是网络的高容量。由于无线通信的特殊性,单信道和单网卡多信道 MAC 协议无论设计得如何精巧,网络容量始终受限。考虑到 IEEE 802.11 标准中提供了 3 个(11b/g)和 12 个(11a)不混叠信道,以及随着多网卡设备实现技术的成熟和成本的降低,多网卡多信道是无线 Mesh 网络发展的必然趋势,802.11s 也指出了对多信道的支持^[1]。因此有关多网卡多信道协议的研究成为目前研

究的一个热点,而其中需要着力解决的就是联合的信道分配和路由问题^[2,3]。

1 联合信道分配和路由协议的相关研究

当前,已有许多工作对多信道多网卡无线 Mesh 网络的联合信道分配和路由协议进行了分析研究。其中一部分研究是基于集中式算法的^[4~6]。主要可以分为两类:第一类算法将路由和信道分配划分两个独立的处理阶段——即首先找到满足业务需求的路由并获得每条链路的负荷估计,然后根据链路负荷来为链路分配信道。其不足在于现实中业务需求一般是难以事先获知的^[4,5];第二类算法则用整数线性编程(ILP)方法来解决联合信道分配和路由问题,此方法一般可以得到该问题的最优解,但不足在于计算复杂度过高^[6]。

收稿日期:2009-12-11;修回日期:2010-02-27

基金项目:江苏省重大基础研究项目(07KJA51006);中兴基金研究项目(08外45)

作者简介:刘 峰(1964-),男,浙江文成人,硕士生导师,教授,从事图像处理与多媒体通信方面的教学和科研工作。

另一部分是基于分布式算法的研究^[7,8]。但此类协议一般需预先为每个节点分配一个固定的接收信道,以便让邻居节点预知从而建立有效连接。然而这种做法将会导致整个网络传输效率的降低。

综上所述,尽管上述算法能够在一定程度上解决联合信道分配和路由的问题,但仍存在着种种限制和不足。针对现有研究存在的不足,文中完成了以下两方面工作:

(1)提出了一种与按需路由协议结合的联合信道分配改进协议。其中信道分配在按需路由协议的路径建立过程中完成,信道选择的依据是局部信道干扰指数最小。

(2)采用了一种适应多网卡多信道 Mesh 网络的路由判据,将信道干扰、接口切换以及路径跳数三个关键因素同时加以考虑。

与现有方法相比,文中所采用的协议在复杂度相当的情况下在网络容量和端到端延时方面拥有更好的性能。

2 与按需路由协议结合的联合信道分配

文中提出的协议是与按需路由协议(如 AODV)联合实施的,具体实现步骤如下:

步骤 0:各节点周期性广播 HELLO 包来互相识别邻居节点。

步骤 1:路由建立请求到来时,源节点发送携带提议信道列表的路由请求包(RREQ)。

步骤 2:中间节点检查前一跳节点提议信道的可用性并将自己选择的信道加入信道列表并广播至下一跳。

步骤 3:目标节点接收到首个 RREQ 包后,启动一个定时器来接收从各条路径来的 RREQ 包。定时器超时后根据文中提出的路由判据确定最佳路径,并在反向路径上发送至源节点的路由回复包(RREP),RREP 包携带该路由的确认信道列表。

步骤 4:反向路径上的中间节点确认之前提议的信道,直至 RREP 回到源节点。

2.1 接口的工作模式

节点的 $n(n \geq 2)$ 个网络接口(即网卡)中,一个被分配至公共控制信道上,称为控制接口,主要用来传输控制和广播包。其余的为数据接口,被用作在不同的数据信道上传输数据。路由建立请求到来时,数据接口根据传输流的方向切换至发送模式或接收模式。控制接口不会被指派至任何模式,它在公共控制信道上同时具备接收和发送功能。发送模式接口可以切换至不同信道与周围节点进行通信,但不可以进行接收;接

收模式接口仅可以工作在一条信道上负责数据接收。

2.2 信道选择与干扰指数

文中所提出的协议在候选路径上的每一跳基于信道干扰指数来选择最佳信道。该指数用来衡量信道质量,定义如下:

$$I_i = \sum_{j=1}^k \frac{u(i,j)}{j} \quad (1)$$

其中 I_i 为第 i 条信道的干扰指数, k 为干扰范围跳数(一般取 2), $u(i,j)$ 为信道使用表。信道使用表由每个节点维护,负责记录周围节点的信道使用情况,为本地节点的信道选择提供依据。信道使用表定义如下:

$$u(i,j) = \begin{cases} 0 & \text{如果信道 } i \text{ 没有被 } j \text{ 跳内邻居使用} \\ 1 & \text{否则} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $j \in [0, k+1]$, $i \in [0, \text{信道数}-1]$ 。特别地, $u(i, 0)$ 表示本地节点的信道使用情况。信道使用表的第 0 至 k 列内容由 HELLO 包携带周期性广播至邻居节点,接收节点使用该信息更新本地信道使用表的第 1 至 $k+1$ 列。候选路径上的所有节点将选择最小信道干扰指数的信道来实现分配的优化。

2.3 带信道分配的路径建立

信道选择与路由建立同时实施,过程如图 1 所示。假设存在 5 条不重叠的信道(包括控制信道 CH0),每个节点配备 3 个接口,干扰范围跳数 $k=2$ 。节点 A 通过广播 RREQ 包发起至 E 的路由建立, RREQ 包携带一个包含 $k+1$ 项内容的提议信道列表(proposed channel list, P-list)。信道列表用来告知后继节点不要选择已提议信道,以此降低路径内的信道间干扰。经计算各条信道的干扰指数后, A 提议干扰指数最小的信道(若有多条则随机选取一条)CH2 为至 B 的信道,并将信道标识 CH2 写入 P-list。B 接收到 RREQ 包后,根据本地信道使用表检查 A 提议信道的可用性。只有当所提议信道在 B 具有最小干扰指数且 B 还有可用接口允许在所提议信道上进行接收,所提议信道才将被 B 接受。否则将产生信道冲突的情况,此时 B 将根据干扰指数和接口的使用情况代替 A 提议一条更为合适的信道。假设 CH2 在 B 处被接受, B 接着提议信道干扰指数最小的 CH3 在下一跳使用,并把 CH3 写入 P-list,更新后的 RREQ 包继续广播至下一跳。节点 C 和 D 处将进行同样的操作。

当目的节点 E 接收到 RREQ 包后首先检查 D 提议信道的可用性,然后向反向路径发送一个路由回复包(RREP 包)至节点 A。RREP 携带确认信道列表(approved channel list, A-list)来确认之前的信道选择,同时更新信道使用表中相应的内容。D 接收到

RREP 包后将把经确认的 CH4 和至 E 的路由记录在路由表中,然后确认 CH1 并将更新后的 RREP 转发至节点 C。C 和 B 将进行同样的操作,直至 RREP 到达节点 A。至此节点 A 至 E 的路径已经建立,同时路径上每条链路的信道也已分配完成(即 CH2 - CH3 - CH1 - CH4)。

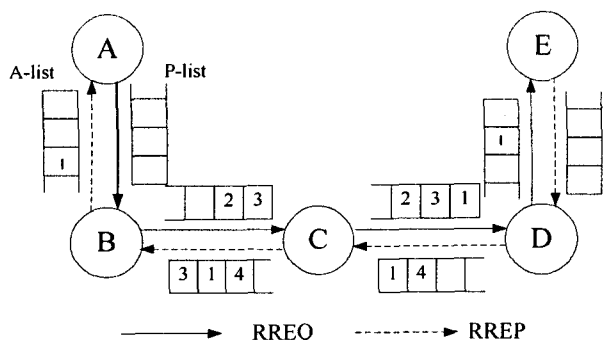


图 1 带信道分配的路由建立过程

3 适应多网卡多信道网络的全新路由判据

传统的一些路由判据(如跳数,期望传输次数 ETT,期望传输时间 ETX, WCETT 等)在多信道多接口环境存在局限性,很少或者几乎没有考虑路径内干扰和路径间干扰,同时也忽视了节点接口切换所造成的影响^[9-11]。

由于全面考虑了以下三个和路径性能密切相关的因素,文中所采用的路由判据比传统路由判据更为适应多信道多接口环境。

首先,所提出的判据考虑到了之前所述信道干扰问题,路径干扰程度由路径上瓶颈链路的信道干扰指数(即最大的信道干扰指数,用 $I_{threshold}$ 来表示)决定。

其次,当发送模式接口工作在多条数据信道上与周围节点通信时,将产生接口切换问题从而导致一定的切换时延(一般为几个毫秒)。这是一笔不可忽视的开销,并且频繁的切换将导致流经该节点的多条流的吞吐量下降及延时增加。为此将路径上需接口切换的节点数量作为文中所采用判据的一部分,用 $switch_num$ 表示。

再次,路径长度也是需要考虑的因素。一般跳数较大的路径发生冲突的可能性更高,并会引发对其他路径更为严重的干扰,且对网络资源也是一种低效的使用。因此将路径的跳数也考虑在内,用 $hops$ 来表示。

路由过程中,瓶颈链路的干扰值、路径上需接口切换的节点数以及跳数都被记录在 RREQ 包中。这样仅仅使得 RREQ 包的大小略有增加,而没有增加协议实现的复杂度。

由于 RREQ 包是广播的,目标节点将会收到多个 RREQ 包(分别对应一条路径)。当首个 RREQ 包到达时,目标节点将启动一个定时器来接收随后到达的 RREQ 包。定时器超时后达到的 RREQ 包由于传输延时过大而将被丢弃。目标节点从 RREQ 包中获取以上三种路径信息。路由判据 RM 由这三类信息通过公式(3)计算:

$$RM = \lambda_1 \times I_{threshold} + \lambda_2 \times switch_num + \lambda_3 \times hops \quad (3)$$

其中 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 是可调参数。三种因素中,通常信道干扰对于路径质量的影响是最为关键的,因而将其优先考虑。其次考虑需接口切换的节点数,过多的接口切换将会大大增加传输的延时,因此将它考虑在路径跳数之前。这样可调参数就可以设置为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ 。目标节点计算每条路径的 RM 值,所选的最佳路径即具有最小路由判据的路径。

4 仿真与结果分析

文中使用 ns-2.30 软件进行仿真并与 MCCA-AODV 协议进行对比^[12](同为基于按需路由协议的联合信道分配与路由算法)。50 个节点随机分布在 1000×1000 大小的区域内。使用 TwoRayGround 路径损耗模型。无线电通信距离为 250m,干扰范围为 500m。每个节点装配 4 个接口,其中 1 个为控制接口并工作在公共信道上,其余 3 个为数据接口。网络共有 8 个信道。信道的数据速率设为 4Mbps。每条 UDP 流发送速率为 2Mbps,包大小为 512 Byte。仿真时间为 100 秒。

得到的网络总体吞吐量和平均端到端延时对比如图 2、图 3 所示。可以看出,随着网络中 CBR 流数目的增加,文中所采用协议的优越性得以体现,总体吞吐量平均提高了 20% 左右,而延时则降低了 25% 左右,原因是由于选择信道干扰程度最小的信道进行分配从而实现了分配的优化;此外文中采用的路由判据也比原

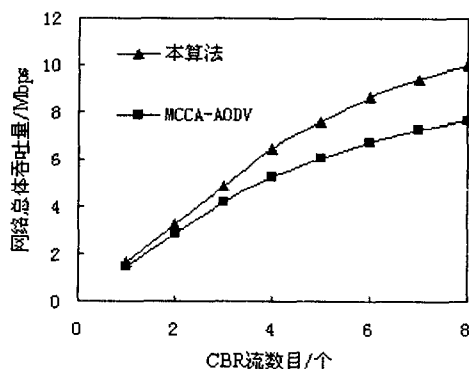


图 2 网络总体吞吐量

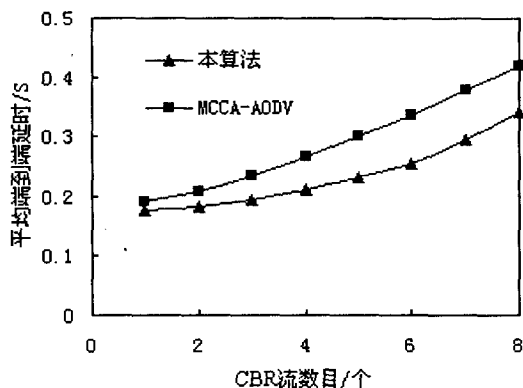


图3 平均端到端延时

有的 AODV 最小跳数判据要好的多。

图4、图5显示了节点的接口数不同时网络总体吞吐量和平均端到端延时的情况。可以看出,当节点只有一个接口时(整个网络就相当于一个单信道网络),此时只能使用控制信道来进行通信。当节点具备两个接口时,网络性能相对于单信道提高并不多,原因在于仅有的一个数据接口都工作在同一信道上因而没有利用到多个信道。当接口数变为3个和4个时,总体吞吐量和延时性能则迅速提高,原因在于节点同时拥有了接收接口和发送接口,具备了工作在不同信道上同时进行收发能力,此外信道分集程度也得到了提高。

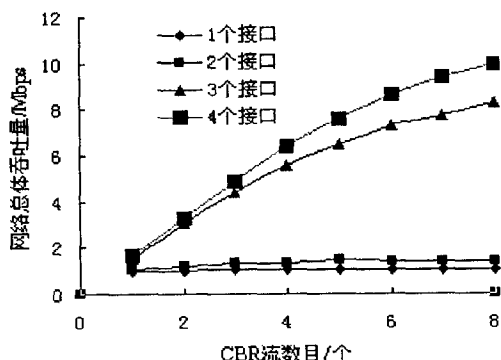


图4 不同接口数情况下的网络总体吞吐量

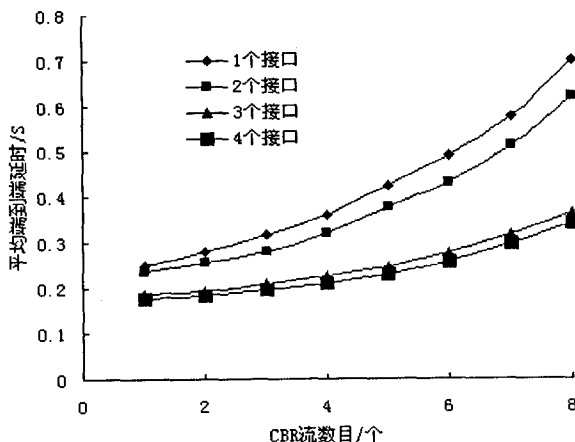


图5 不同接口数情况下的平均端到端延时

5 结束语

多网卡多信道技术是当前有效提高无线 Mesh 网络容量的技术之一。文中对当前存在的联合信道分配和路由协议进行了分析和研究,进而提出一种有效的分布式联合信道分配和路由协议。信道分配在按需路由协议的路径建立过程中实现,通过选择局部信道干扰指数最小的信道实现分配的优化;文中采用的路由判据则全面考虑了多信道多接口环境下影响路径质量的三个关键因素。仿真结果表明文中所采用的协议在不增加复杂度的情况下提高了网络吞吐量和降低了延时。

参考文献:

- [1] 方旭明. 下一代无线因特网技术: 无线 Mesh 网络[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [2] 陈锦源, 魏文红. 多信道无线 Mesh 网络负载均衡路由算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(19): 98-100.
- [3] 任娟, 裴正定. 多信道无线 Mesh 网络中基于路径尺度的负载均衡路由[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(12): 2079-2086.
- [4] Raniwala A, Gopalan K, Chiu T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50-65.
- [5] Fu Weihuang, Xie Bin, Wang Xiaoyuan, et al. Flow-based Channel Assignment in Channel Constrained Wireless Mesh Networks[C]//ICCCN'08. Proceedings of 17th International Conference. Virgin Islands, US: [s. n.], 2008: 1-6.
- [6] Subramanian A P, Gupta H, Das S R. Minimum Interference Channel Assignment in Multi-Radio Wireless Mesh Networks[C]//Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007. SECON'07. 4th Annual IEEE Communications Society Conference. San Diego, CA: [s. n.], 2007: 481-490.
- [7] Mir S, Pirzada A, Portmann M. HOVER: Hybrid On-demand Distance Vector Routing for Wireless Mesh Networks[C]//Thirty-First Australasian Computer Science Conference (ACSC 2008). Wollongong, NSW, Australia: [s. n.], 2008: 63-71.
- [8] Makram S A, Gunes M. Distributed channel assignment for multi-radio wireless mesh networks[C]//ISCC 2008, IEEE Symposium. Marrakech: [s. n.], 2008: 272-277.
- [9] Liu Tehuang, Liao Wanjiun. On Routing in Multichannel Wireless Mesh Networks: Challenges and Solutions[J]. IEEE Network, 2008, 22(1): 13-18.
- [10] 张瑞, 洪佩琳, 卢汉成, 等. MEIL——一种高吞吐量的无线网状网路由协议[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007,

(下转第 36 页)

每一个待插入的记录的关键字都大于或等于有序表中的所有关键字,因此,插入位置均在表尾,并每次都从表头开始查起,因此,时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

改进的表插入排序与表插入排序均不需要额外的空间。

5 实验结果及性能评价

评价排序算法好坏的标准主要有两条:

(1) 执行时间和所需的辅助空间。

(2) 算法本身的复杂程度。

大多数排序算法的时间开销主要是关键字之间的比较和记录的移动。有的排序算法其执行时间不仅依赖于问题的规模,还取决于输入实例中数据的状态。

表 1 为所做实验得出的结果,其中 n 为待排序的记录数, num 为使用表插入排序而进行的查找次数, num_i 为使用改进的表插入排序而进行的查找次数,显然改进后的表插入排序所进行的查找次数比原来的表插入排序减少了 33% 还多。

表 1 实验数据

n	num - i	num	$(\text{num} - \text{num}_i) / \text{num}$
100	1786	2590	0.336
200	6715	10075	0.333
300	14129	22313	0.367
400	26114	39289	0.335
500	38933	60816	0.360
600	63720	95387	0.332
700	76852	117080	0.344
800	106558	157422	0.323
900	132212	203765	0.351
1000	165627	245793	0.326
2000	666252	1005825	0.338
3000	1493332	2259433	0.339
4000	2655362	4003138	0.337
5000	4147730	6200149	0.331
6000	5992237	8970435	0.322
7000	8200124	12341237	0.336
8000	10605537	15941833	0.335
9000	13570373	20542839	0.339
10000	16870318	25032085	0.326
15000	37044718	55910736	0.337
20000	66705112	100033778	0.333
25000	103470578	155023620	0.333
30000	149295347	224185288	0.334
35000	204323224	306600333	0.334
40000	266161371	400216429	0.335
45000	338676644	507561322	0.333

由于表 1 的宽度所限,表中没有列出查找次数与 n 的关系,实验数据得出:表插入排序的查找次数约为 $n^2/4$,与文献[1]一致,而改进的表插入排序的查找次数约为 $n^2/6$ 。

6 结束语

排序算法就是对文件中的记录进行整理的一种方法,使记录按关键字递增(或递减)次序排列起来。文中对表插入排序进行了改进,从理论上来说并没有降低其时间复杂度,然而算法执行的时间却减少了 33%,下一步将继续研究,能否与折半查找相结合,使其复杂度真正降低一个级别。

参考文献:

- [1] 严蔚敏,吴伟民.数据结构(C语言版)[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [2] Baase S, Van Gelder A. Computer Algorithms: Introduction to Design and Analysis[M]. [s.l.]: Addison Wesley, 2000.
- [3] Cormen T H, Leiserson C E, Rivest Ronald L. Introduction to Algorithms[M]. [s.l.]: The MIT Press, 2002.
- [4] 江开忠,吕 钊,孙树峰.基于 0-1 规划的软硬件划分方法研究[J].电子科技大学学报,2007,36(3):594-597.
- [5] Love R. Linux Kernel Development[M]. [s.l.]: Novell Press, 2006.
- [6] Lucier B, Jiang T, Li M. Average-case Analysis of Quicksort and Binary Insertion Tree Height Using Incompressibility[J]. Information Processing Letters, 2007, 103(2): 45-51.
- [7] Cantone D, Cincotti G. QuickHeapsort: an Efficient Mix of Classical Sorting Algorithms[J]. Theoretical Computer Science, 2002, 285: 25-42.
- [8] 杨 磊,宋 涛.基于数组的桶排序算法[J].计算机研究与发展,2007,44(2):341-347.
- [9] van der Linden P. Just Java2[M]. [s.l.]: SunSoft Press, 1998.
- [10] 黄 霞.改进的表插入排序算法[J].现代计算机,2009(9): 64-66.
- [11] 朱怀宏,吴 楠,夏黎春,等.利用优化哈夫曼编码进行数据压缩的探索[J].微机发展(现更名:计算机技术与发展),2002,12(5):1-5.
- [12] 汤亚玲.KMP 算法中 next 数组的计算方法研究[J].计算机技术与发展,2009,19(6):98-101.

(上接第 32 页)

24(4):473-479.

[11] 朱 隽.无线网状网路由判据研究[J].电子工程师,2007,33(8):73-77.

[12] Shui Guo-Jun, Shen Shu-Qun. A cross-layer design for

distributed channel assignment over multi-radio multi-channel wireless mesh networks[C]//ICINIS 2008. Wuhan, China: [s.n.], 2008: 209-212.