

基于拓扑分割的无线 Mesh 网络信道分配策略

严军荣^① 张顺颐^① 龙 华^② 孙雁飞^①

^①(南京邮电大学信息网络技术研究所 南京 210003)

^②(昆明理工大学信息与自动化学院 昆明 650051)

摘 要: 该文根据无线 Mesh 网络流量呈现树状拓扑汇聚的特点提出基于拓扑分割的信道分配策略。依据无线干扰对不同链路的影响程度,把无线干扰分类为有确定方向的纵向干扰和横向干扰;提出沿着纵向干扰方向逐跳分割网络拓扑算法;提出最少信道隔离纵向干扰和为吞吐量最小的子拓扑增加信道的子拓扑间信道分配策略;提出横向干扰分块的子拓扑内信道使用方法;理论分析子拓扑内的冲突域及网络性能瓶颈,仿真研究子拓扑的吞吐性能及信道分配顺序。仿真结果表明,隔离纵向干扰和增加信道的分配策略能够有效保证和提升网络吞吐量,横向干扰分块的方法优于 802.11s 中定义的公共信道框架多信道机制。

关键词: 无线 Mesh 网络; 信道分配; 拓扑分割; 无线干扰

中图分类号: TP393.17

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)07-1588-06

Channel Assignment Strategy for Wireless Mesh Network Based on Topology-division

Yan Jun-rong^① Zhang Shun-yi^① Long Hua^② Sun Yan-fei^①

^①(Institute of Information Networks technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

^②(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract: According to the characteristics of tree-topology aggregating traffic of wireless mesh network, this paper proposes a channel assignment strategy based on topology-division. Considering the effect of interference on different links, wireless interference is classified into vertical and horizontal interferences with determinate directions. An algorithm is proposed to divide the network topology into hop-by-hop subtopologies along the vertical interference. A channel assignment strategy for subtopologies is proposed including minimum channels to avoid vertical interference and additional channels to enhance the minimum throughput subtopology. A method is proposed based on channels to partition horizontal interference with channels within a subtopology. The collision domains within a subtopology and network performance bottleneck are analyzed, and the throughput and the order of channels assignment are simulated. The simulation results show that the proposed channel assignment strategy could effectively assure and enhance network throughput, and the method of horizontal interference partitioning outperforms the common channel framework multichannel mechanism defined in 802.11s.

Key words: Wireless Mesh Network (WMN); Channel assignment; Topology-division; Wireless interference

1 引言

无线 Mesh 网络^[1]以覆盖范围广、接入便利、鲁棒性等优点受到业界的重视,最近几年在应用需求的推动下成为研究热点。由于无线信号传播的广播特性,导致了同一信道相邻节点间的干扰;基于竞争的 MAC 层接入机制导致多跳传输的不确定,而

Internet 业务要求无线多跳传输的连续和适时; 802.11a 标准和 802.11b/g 标准^[2]分别提供 12 个和 3 个无交迭(正交)信道,正交信道的缺乏成为无线多跳传输的瓶颈。无线多跳节点间的信道分配策略成为无线 Mesh 网络可靠传输和 QoS 保证的关键。

根据信道分配粒度^[3]可以把现有的无线 Mesh 网络信道分配策略分为基于数据包、基于链路和基于数据流等 3 类。基于数据包的信道分配策略^[4,5]往往会因为频繁的信道切换导致较大的时延和吞吐性能下降;基于链路^[6,7]和基于流^[3,8]的信道分配策略通常与路由协议相结合,整个信道分配过程是一个相

2008-06-10 收到, 2009-03-12 改回

国家“863”计划项目(2009AA01Z202, 2009AA01Z212, 2006AA01Z232), 江苏省自然科学基金(BK2007603), 江苏省科技支撑计划(BE2008134)和江苏省高技术研究计划(BG2007045)资助课题

当复杂的迭代过程,而且网络上业务流量的变化会影响路由的选择和接口的信道分配,从而带来信道分配方案的频繁改变。

考虑到无线 Mesh 网络拓扑的稳定性和流量呈树状汇聚,最近几年出现了考虑网络拓扑特性的信道分配策略。文献[9]提出 Hyacinth 结构的以网关为根节点的逻辑树拓扑;文献[10-12]提出与拓扑控制相结合的信道分配策略;文献[13]提出节点分层并设定优先级逐层分配信道的策略。研究表明考虑拓扑的信道分配策略更适合于无线 Mesh 网络。

本文根据无线 Mesh 网络流量呈现树状拓扑汇聚的特点,提出一种基于拓扑分割的信道分配策略。论文结构如下:第 2 节主要讨论无线干扰对不同链路的影响程度及分类;第 3 节提出拓扑分割算法和信道分配策略;第 4 节是吞吐性能分析和仿真;第 5 节是结论。

2 链路干扰

首先讨论无线传播模型和干扰模型,然后研究无线 Mesh 网络中的链路干扰。

2.1 无线传播和干扰模型

在理论分析中,通常采用圆盘传播模型(Two-ray Ground 模型)来描述节点的信号传输范围和载波侦听范围。用 R_t 表示数据最大传输距离, R_i 表示载波侦听距离(干扰距离)。为了使得载波侦听区域能够覆盖接收方接收的区域,干扰距离 R_i 通常是数据传输距离 R_t 的两倍多,即 $q = R_i / R_t$ ($q \geq 2$)。

无线信道的广播特性导致了同信道相邻节点间的干扰。文献[14]总结出 PCA(Primary Conflict Avoidance), RCA(Receiver Conflict Avoidance)和 TRCA(Transmitter-Receiver Conflict Avoidance)等 3 种干扰模型。其中,TRCA 是最严格的干扰模型,在发送和接收节点通信期间干扰范围内的所有节点均不能通信。

在方形网格中,假设小正方形边长恰好等于数据传输距离 R_t 。图 1 直观显示在 Two-ray Ground 传播模型($q = 2$)和 TRCA 干扰模型下,任意一对节点通信对同信道邻居节点的干扰情况。节点 A 和节点 B 通信对周围 16 个节点产生干扰,由此可知单信道网络的通信效率很低。图 1 中还显示在同一信道下,节点 C 和 D 通信与节点 A 和节点 B 通信互不干扰所要求的最短距离是 3 倍 R_t ,也就是说要实现无线 Mesh 网络中间节点能够并发地接收和发送数据流,至少需要使用 4 个正交的信道。

2.2 链路干扰分类

在圆盘传播模型中,无线节点干扰是全向的。

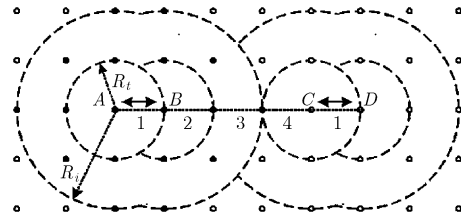


图 1 TRCA 干扰模型和 Two-ray Ground 传播模型

但是在流量呈现树状拓扑汇聚的无线 Mesh 网络中,无线链路干扰却表现出明显的方向性。图 2 是一个典型的无线 Mesh 网络骨干网拓扑,图中节点 S 为与 Internet 相连的根节点,相邻两个节点间虚线长度恰好为单跳最大数据传输距离 R_t 。在同一信道下,假设其中任意节点对 A 和 B 通信,即链路 AB 占用信道,此时周围的链路受到干扰而不能再占用信道。但是干扰对不同链路造成的后果却是不一样的,由此可以把干扰分类为纵向干扰和横向干扰。

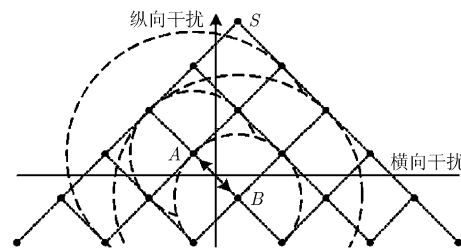


图 2 无线 mesh 网络中纵向干扰和横向干扰

纵向干扰是指链路 AB 占用信道时,对其上一跳和下一跳链路造成的干扰,又可称为多跳干扰。多跳干扰可认为是同一业务流内干扰。因为 MAC 层采用竞争接入机制,纵向干扰会给多跳网络带来比单跳网络更为严重的节点传输不确定,关系到整个网络能否正常工作。

横向干扰是指链路 AB 占用信道时,对与其平行链路造成的干扰,又可称为单跳干扰。单跳干扰是不同业务流间的平行干扰。比较而言,横向干扰对整个网络性能的影响比纵向干扰要小得多。

3 无线 Mesh 网络信道分配策略

首先在链路干扰分类的基础上提出拓扑分割算法,然后提出信道分配策略。

3.1 网络拓扑分割

由于无线 Mesh 网络流量呈现树状拓扑汇聚,考虑以多跳链路中的单跳作为最小分割单位对无线 Mesh 网络拓扑进行分割。

采用图 $G = \{V, E\}$ 表示无线 Mesh 网络骨干网。其中, V 为 Mesh 节点(顶点)的集合, E 为无线链路

(边)的集合。图 G 中至少有一个与 Internet 相连的根节点(图2中为 S)。由于无线 Mesh 网络的流量主要是往返于节点 S , 考虑以节点 S 为基准点和距离 R_i 为度量标准, 分割无线 Mesh 网络的拓扑图 $G = \{V, E\}$ 。首先把网络节点集 V 分割成子集 $\{V_1, V_2, \dots\} = V$ 且 $V_i \cap V_j = \emptyset, i \neq j$; 然后相邻节点子集形成子拓扑 $\{G_1, G_2, \dots\} = G$ 且 $G_i \cap G_{i+1} = V_i, G_i \cap G_j = \emptyset, |j - i| > 1$, 相应的边子集 $\{E_1, E_2, \dots\} = E$ 。算法1中, x 表示序号, V_x 表示第 x 个节点子集, G_x 表示第 x 个子拓扑, 中间变量 u 表示某节点, 中间变量 N 表示节点集合, X 表示子拓扑的个数。

算法1 无线Mesh网络拓扑分割算法

```

 $x = 0; V_x = \{S\};$ 
While( $V - V_x \neq \emptyset$ ) {
     $N = \{u \mid u \notin V_j, j \leq x, \|u, V_x\| \leq R_i\};$ 
     $x++;$ 
     $V_x = N;$ 
}
 $X = x;$ 
for( $x = 1; x \leq X; x++$ )
     $G_x = ((V_{x-1}, V_x), E_x);$ 

```

图3中子拓扑图 G_1, G_2, G_3, G_4 和 G_5 为拓扑图 G 的有序分解结果。很容易理解, 子拓扑间的干扰就是纵向(多跳)干扰, 子拓扑内干扰就是横向(单跳)干扰。

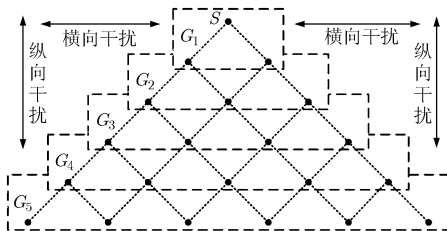


图3 分割后的子拓扑和干扰示意

3.2 信道分配策略

避免纵向干扰的基本思想是多个正交信道隔离, 即以子拓扑(单跳)为单位, 对多跳链路逐跳分配正交信道, 从而避免多跳链路同时处于一个干扰模型中。由于各子拓扑间不存在纵向干扰, 仅为子拓扑内部的横向干扰, 因此信道隔离纵向干扰策略能够有效缓解MAC层竞争接入带来的多跳传输的不确定性。为了节约信道资源, 可进一步采用最少信道隔离策略。如图1所示, 在TRCA干扰模型和Two-ray Ground传播模型($q = 2$)中最少需要4个正交信道就可实现信道隔离。

在网络拓扑逐跳分割和信道隔离纵向干扰的基

础上, 整个无线Mesh网络拓扑可以看成是一个双向串行多跳链路。不论业务流从内层流向外层, 还是从外层流向内层, 整个网络端到端的吞吐量很大程度上取决于吞吐量最小的那个子拓扑。因此, 采用对吞吐量最小的子拓扑增加信道的方式来提升网络吞吐量。另外, 由于正交信道数量有限, 对于横向干扰不可能也没有必要采用信道隔离策略。

不妨用数字表示信道号。假设 $\{1, 2, \dots, K\}$ 为可用的正交信道集合, 显然 $K \geq 4$ 。算法2首先把4个正交信道(如1,2,3,4)循环分配给连续子拓扑($G_1, G_2, G_3, G_4, G_5, \dots$), 结果可简单表示为1,2,3,4,1, \dots ; 然后采用对吞吐量最小的子拓扑增加信道的方法分配剩余的信道 $\{5, \dots, K\}$ 。

算法2 无线Mesh网络信道分配算法

```

for( $x = 1; x \leq X; x++$ )
    {信道 mod( $x, 4$ )分配给子拓扑  $G_x$ ;}
for( $i = 5; i \leq K; i++$ )
    {for( $j = 1; j \leq X; j++$ )
        {计算子拓扑  $G_j$ 的吞吐量;}
        确定吞吐量最小的子拓扑;
        信道  $i$ 分配给吞吐量最小的子拓扑;
    }

```

子拓扑内对增加信道的使用方法(即子拓扑内对多个信道的使用方法)有很多, 本文提出子拓扑内横向干扰分块的方法, 即利用多个信道把子拓扑尽可能分块成多个相互间无干扰的冲突域, 具体分割方法可参考第4.1节子拓扑内冲突域的分析, 不再赘述。第4.3节对子拓扑内横向干扰分块方法和802.11s^[15]中定义的公共信道框架(CCF)多信道机制进行仿真比较。

4 性能分析及仿真

4.1 子拓扑内冲突域

假设图2所示无线Mesh网络骨干拓扑中每个Mesh节点至少配置两个射频接口, 由于采用网络拓扑逐跳分割和信道隔离避免纵向干扰的策略, 网络节点的两个射频接口分别处于上下子拓扑的不同信道中。此时, 网络中仅在子拓扑内存在着横向干扰。

在TRCA干扰模型和Two-ray Ground传播模型($q = 2$)中, 当某条链路占有信道时, 对邻近链路产生干扰的区域是有限的, 因此子拓扑内可能同时有多条链路并行传输, 即子拓扑内自然形成多个无干扰的冲突域。以图3中最复杂的子拓扑 G_5 为例。 G_5 中有10条链路, 当链路5占有信道时, 链路2, 3, 4, 6, 7, 8受干扰而不能再使用信道。即使是在同一信道下, 链路1和链路9(或10)还可以占用

信道,此时子拓扑 G_5 中有3个并行传输链路,如图4所示。假设子拓扑中所有链路公平地占用同一个信道,根据排列原理, G_5 中有16种不同的并行传输模式。其中,3条链路并行传输模式有4种,2条链路并行传输模式有12种。利用概率平均可计算出 G_5 中9/4个并行传输链路。同理,可计算出 G_4 中有2个, G_3 中有3/2个, G_2 和 G_1 中有1个并行传输链路。各子拓扑的并行传输数量可用矩阵 $\mathbf{L}=[1\ 1\ 3/2\ 2\ 9/4]$ 简洁表示,其中数值以 $G_1G_2G_3G_4G_5$ 顺序排列。假设所有正交信道的传输速率相同,很容易看出整个网络的传输瓶颈出现在子拓扑 G_1 和 G_2 。

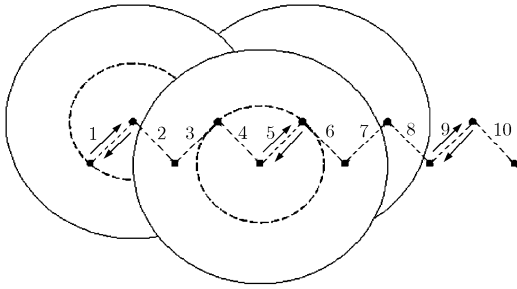


图4 子拓扑 G_5 的并行传输链路示意

4.2 吞吐量分析模型

采用Bianchi^[16]提出的DCF机制二维Markov链模型,分析图2所示网络拓扑端到端的吞吐量。

首先,计算单冲突域内的吞吐量。定义 τ 为Mesh节点在任意时隙发送数据帧的概率。假设单冲突域内无论数据帧发送或重传多少次,发生冲突的概率 p 恒定且相互独立。根据文献[16]的DCF机制发送数据帧时经历的退避、重传、冲突直至成功发送的Markov链状态转移模型和推导过程,可以得到

$$\tau = \frac{2}{1 + (W_0 + 1) + p(W_0 + 1) \sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i} \quad (1)$$

其中,退避级数 $i \in [0, m]$,退避窗口 $W_0 = CW_{\min}$, $W_i = 2^i(W_0 + 1) - 1$ 。

定义 p_{tr} 为一个时隙中至少有一个帧在发送的概率,则 $p_{tr} = 1 - (1 - \tau)^n$,其中 n 为冲突域内Mesh节点个数;定义 p_s 为一个时隙中有帧发送时仅有一个帧在发送的概率,则 $p_s = n\tau(1 - \tau)^{n-1} / p_{tr}$; $p_{tr} \cdot p_s$ 表示一个时隙中仅有一个帧在发送的概率。一个时隙长度的平均值可以分成3部分:信道空闲时间 σ ,概率为 $1 - p_{tr}$;成功发送时间 T_s ,概率为 $p_{tr} \cdot p_s$;冲突时间 T_c 为整个RTS/CTS交互时间,概率为 $p_{tr} \cdot (1 - p_s)$ 。

定义 $E[P]$ 为数据帧有效载荷值, v 为无线(信道)速率,可得到单冲突域内的吞吐量计算公式

$$S = \frac{E[P] \cdot v}{\frac{1 - p_{tr}}{p_s p_{tr}} \cdot \sigma + \frac{1 - p_s}{p_s} \cdot T_c + T_s} \quad (2)$$

然后,计算各子拓扑的吞吐量。观察图3,各子拓扑内的Mesh节点数量可简洁表示为矩阵 $\mathbf{Y}=[3\ 5\ 7\ 9\ 11]$ 。 $\mathbf{N}=\mathbf{Y}/\mathbf{L}=[3\ 5\ 14/3\ 9/2\ 44/9]$,矩阵 \mathbf{N} 表示子拓扑单冲突域内的平均节点数量。采用式(2)可计算出各子拓扑单冲突域内的吞吐量矩阵 $\mathbf{S}=[S_1\ S_2\ S_3\ S_4\ S_5]$ 。式(3)用于计算各子拓扑的吞吐量。其中, $\cdot*$ 和 $/$ 分别为MATLAB中定义的数组乘法和数组除法运算符。

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \end{pmatrix} = [\mathbf{L} \cdot * \mathbf{S}]^T = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ (3/2)S_3 \\ 2S_4 \\ (9/4)S_5 \end{pmatrix} \quad (3)$$

最后,由式(4)可计算出整个无线Mesh网络的吞吐量。

$$T = \min\{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5\} \quad (4)$$

4.3 吞吐量仿真

本文采用C/C++语言开发的仿真平台。由于802.11a标准能够提供的正交信道多于4个,仿真采用802.11a标准中数据,同时涉及802.11s^[15]中与CCF多信道机制相关数据。其中,退避窗口 $W_0=7$,最大退避级数 $m=6$,所采用的数据帧有效载荷是802.11a标准规定的最大载荷。

图5和图6是无线速率分别为54 Mbits/s和24 Mbits/s时各个子拓扑的吞吐量,方框内的数据表示相应信道数量的网络吞吐量。当正交信道仅为4个时,整个网络的吞吐量分别达到18.5847和11.6364(单位为Mbits/s)。此时各子拓扑均处于单个信道状态,离根节点越远子拓扑吞吐量越大(自然形成多个冲突域),离根节点越近子拓扑(图中为 G_1 和 G_2)成为整个网络吞吐量的瓶颈(单冲突域)。因此,为吞吐量最小的子拓扑增加信道的分配策略首先从靠近根节点的子拓扑(G_1 和 G_2)开始。很明显,当子拓扑 G_1 和 G_2 增加信道后,整个网络吞吐量迅速得到提升。

图5(a)和6(a)显示子拓扑内采用横向干扰分块方法能够成倍提高子拓扑的吞吐量,例如图5(a)中 G_2 , G_1 , G_3 增加1个信道后吞吐量变化分别为18.5847→37.8878, 18.8697→37.9976, 27.9416→56.8964;图5(b)和6(b)显示子拓扑内采用802.11s中定义的CCF多信道机制却提高了不足1/3的吞吐量,例如图5(b)中 G_2 增加1个和2个信道后吞吐量变化为18.5847→25.9057→30.0310, G_1 中增加1个信道后吞吐量变化为18.8697→26.3199。很明显,子拓扑内横

子拓扑	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
4 信道 (纵向)	18.8697	18.5847	27.9416	37.2991	41.8478
5 信道 (G_2 加)	18.8697	37.8878	27.9416	37.2991	41.8478
6 信道 (G_1 加)	37.9976	37.8878	27.9416	37.2991	41.8478
7 信道 (G_3 加)	37.9976	37.8878	56.8964	37.2991	41.8478

(a) 横向干扰分块 (54 Mbits/s)

子拓扑	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
4 信道 (纵向)	18.8697	18.5847	27.9416	37.2991	41.8478
5 信道 (G_2 加)	18.8697	25.9057	27.9416	37.2991	41.8478
6 信道 (G_1 加)	26.3199	25.9057	27.9416	37.2991	41.8478
7 信道 (G_2 加)	26.3199	30.0310	27.9416	37.2991	41.8478

(b) CCF 多信道机制 (54 Mbits/s)

图5 信道分配顺序及吞吐量(54 Mbits/s)

子拓扑	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
4 信道 (纵向)	11.7957	11.6364	17.4896	23.3429	26.1995
5 信道 (G_2 加)	11.7957	23.6836	17.4896	23.3429	26.1995
6 信道 (G_1 加)	23.7681	23.6836	17.4896	23.3429	26.1995
7 信道 (G_3 加)	23.7681	23.6836	35.5702	23.3429	26.1995

(a) 横向干扰分块 (24 Mbits/s)

子拓扑	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5
4 信道 (纵向)	11.7957	11.6364	17.4896	23.3429	26.1995
5 信道 (G_2 加)	11.7957	17.4683	17.4896	23.3429	26.1995
6 信道 (G_1 加)	17.7608	17.4683	17.4896	23.3429	26.1995
7 信道 (G_2 加)	17.7608	21.1789	17.4896	23.3429	26.1995

(b) CCF 多信道机制 (24 Mbits/s)

图6 信道分配顺序及吞吐量(24 Mbits/s)

向干扰分块的方法对吞吐量的提升效果要优于CCF多信道机制。

尽管采用相同的信道分配策略,相同无线速率下子拓扑内两种多个信道使用方法产生的具体信道分配顺序却不一样。当54 Mbits/s时,子拓扑内横向干扰分块方法为 $G_2 \rightarrow G_1 \rightarrow G_3 \rightarrow G_4$, CCF为 $G_2 \rightarrow G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow G_1$;当24 Mbits/s时,子拓扑内横向干扰分块方法为 $G_2 \rightarrow G_1 \rightarrow G_3 \rightarrow G_4$, CCF为 $G_2 \rightarrow G_1 \rightarrow G_2 \rightarrow G_3$ 。另外,注意到不同无线速率下相同信道使用方法的信道分配顺序也有些差异。

5 结论

与已有文献不同,本文在分析无线链路干扰的基础上提出一种基于拓扑分割的信道分配策略。由于无线 Mesh 网络流量呈现树状拓扑汇聚,无线干扰依据对不同链路的影响程度而表现出明确的方向

性,从而分类为纵向干扰和横向干扰。以单跳链路为单位分割网络拓扑,纵向干扰成为子拓扑间的干扰,横向干扰成为子拓扑内部的干扰。在此基础上,提出最少信道隔离避免纵向干扰和为吞吐量最小的子拓扑增加信道的子拓扑间信道分配策略,提出横向干扰分块的子拓扑内信道使用方法。

本文为无线 Mesh 网络信道分配研究提出一种新的框架和思想。以解决无线干扰问题为主线,把信道分配策略简化为子拓扑间信道分配和子拓扑内使用多个信道的问题。仿真结果表明,隔离纵向干扰和增加信道的分配策略能够有效保证和提升网络吞吐量,横向干扰分块的方法优于 802.11s 中定义的 CCF 多信道机制。

参考文献

- [1] Zhang Y, Luo J J, and Hu H L. *Wireless Mesh Networking: Architectures, Protocols and Standards*. New York: Auerbach publications, 2007: Part one.
- [2] IEEE 802.11-2007. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. 2007.
- [3] Ye F, Chen Q, and Niu Z S. End-to-end throughput-aware channel assignment in multi-Radio wireless mesh networks. *IEEE GLOBECOM 2007*, Washington D C, USA, Nov. 2007: 1375-1379.
- [4] So J and Vaidya N H. Multi-channel MAC for ad hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver. *MOBIHOC 2004*, Tokyo, Japan, May 2004: 222-233.
- [5] Kyasanur P and Vaidya N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface ad hoc wireless networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2006, 10(1): 31-43.
- [6] Alicherry M, Bhatia R, and Li L. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless mesh networks. *ACM MobiCom*, Cologne, Germany, Sep. 2005: 58-72.
- [7] Raniwala A, Gopalan K, and Chiueh T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 2004, 8(2): 50-65.
- [8] So J and Vaidya N H. A routing protocol for utilizing multiple channels in multi-hop wireless networks with a single transceiver. *UIUC Technical Report*, Oct. 2004.
- [9] Raniwala A and Chiueh T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11-based multi-channel wireless mesh network. *IEEE INFOCOM 2005*, Miami, USA, Mar. 2005: 2223-2234.
- [10] Mohsenian-Rad A H and Wong V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing

- for multi-channel wireless mesh networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(12): 4432-4440.
- [11] Xu L M, Xiong Y, and Shi M L. A novel channel assignment algorithm based on topology simplification in multi-radio wireless mesh networks. IEEE IPCCC 2006, Phoenix, USA, Apr. 2006: 223-230.
- [12] Naveed A, Kanhere S S, and Jha S K. Topology control and channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks. IEEE MASS 2007, Pisa, Italy, Oct. 2007: 1-9.
- [13] 束永安. 无线网状网媒体访问控制及路由协议研究. [博士论文]. 中国科学技术大学, 2007.
- Shu Y A. Wireless mesh network media access control and routing protocols research. [Ph.D.dissertation]. University of Science and Technology of China, 2007.
- [14] Kodialam M and Nandagopal T. The effect of interference on the capacity of multi-hop wireless networks. IEEE Symposium on Information Theory, Chicago, USA, June 2004: 470.
- [15] IEEE P802.11sTM/D0.02. June 2006.
- [16] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000, 18(3): 535-547.
- 严军荣: 男, 1974 年生, 博士生, 研究方向为无线通信与通信网.
- 张顺颐: 男, 1944 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机通信网及 IP 技术.
- 龙 华: 女, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为无线通信与通信网.
- 孙雁飞: 男, 1976 年生, 讲师, 博士, 研究方向为下一代网络性能监测与优化、多媒体网络通信、IP 网络监测、管理与控制.