

双网卡多信道无线 MAC 协议

赵蕴龙^{1,2} 康世龙¹ 高振国¹ 杨 飞¹

(哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001)¹

(东京大学空间情报科学研究中心 东京 153-8505)²

摘 要 多收发器多信道技术能够有效提高无线多跳网络的带宽和吞吐量,成为学术界的研究热点。多收发器多信道 MAC 协议研究主要涉及信道资源的分配与管理问题。在现有多信道 MAC 协议的研究基础上,提出一种基于 IEEE802.11 标准 WiFi 网卡的双收发器多信道 MAC 协议——DIM(Dual-Interface Management)。协议采用信道冲突模型来分配信道资源,以优化网络的信道分布;同时,DIM 协议在较少的硬件配置下,充分利用 IEEE802.11 标准提供的信道资源,提高了信道利用率。仿真实验表明,DIM 协议具有较大的网络吞吐量和较小的分组传输延迟。

关键词 多收发器多信道,信道冲突模型,WiFi,网络接口卡

中图分类号 TP393

文献标识码 A

Practical Dual WiFi NIC and Multi-channel MAC Protocol

ZHAO Yun-long^{1,2} KANG Shi-long¹ GAO Zhen-guo¹ YANG Fei¹

(College of Computer Science & Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)¹

(Center for Spatial Information Science, University of Tokyo, Tokyo 153-8505, Japan)²

Abstract Multi-radio multi-channel technology can efficiently improve the multi-hop wireless networks' bandwidth and throughput, so that it has been becoming the researching hot spot. Among the so many researching key issues about the multi-radio multi-channel technology, wireless channel assignment and management are more important and difficult. This paper proposed a new dual-radio multi-channel MAC protocol using the standard 802.11 WiFi NIC, named as DIM (Dual-Interface Management MAC protocol). DIM can optimize the channel assignment by applying the channel conflict model, and take full use of the available IEEE802.11 wireless channels with little command on hardware configuration. The simulation results show that DIM has more network throughput and less latency of packets delivery.

Keywords Multi-radio multi-channel, Channel conflict model, WiFi, Network interface card

1 引言

随着移动通信技术和无线网络技术的发展,无线互联网乃至物联网时代正向我们走来。由于对无线网络需求的多样性,无线网络形式也多种多样,其中包括无线局域网 WLAN、移动自组网、无线传感器网络、无线 Mesh 网^[1]等等。然而由于无线信道固有的开放性、不稳定性和有限通信带宽等先天缺陷,导致无线网络在数据传输率、网络吞吐量、网络容量和网络扩展能力等方面具有很大的局限性。为此,国内外众多学者致力于提高无线网络性能技术的研究,其中对多信道技术的研究已成为世界范围内的热点。

2 相关工作

现有的无线通信技术大多数采用单信道技术,这种技术限制了整个网络的数据传输速率与网络容量。节点通信时,由于信道冲突,因此在信道干扰区域内的节点都无法传送数

据,从而网络吞吐量会大幅下降。IEEE 802.11a/b/g 标准分别提供了 12/3/3 个正交信道,因此无线网络中的节点同时使用多个信道进行数据传输,就可以有效减少信道的冲突和干扰,提高网络吞吐量。

目前在国内外的多信道研究领域,根据不同的硬件平台,可以将多信道 MAC 协议分为单收发器多信道和多收发器多信道两类。

单收发器多信道 MAC 协议中,每个节点配置一个收发器,它通过信道切换的方式实现多信道的使用,该策略可以在现有网络设备的基础上实施;而多收发器多信道 MAC 协议中为每一个节点配置多个收发器,通过将不同的收发器调频到不同信道,节点根据相应性能指标选取最佳的信道进行数据传输。

当前业界关于多信道的研究已经取得了一定的成果。其中,作为单网卡多信道协议的典型代表,MMAC^[2] (Multi-channel MAC)通过维护一张 PCL (Preferable Channel List)

到稿日期:2011-05-18 返修日期:2011-07-16 本文受国家自然科学基金(61003235),黑龙江省自然科学基金(F200902),黑龙江省教育厅科学技术研究项目(11553047),中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCFZ1105),哈尔滨市科技创新人才研究专项资金项目(2011RFQXG012)资助。

赵蕴龙(1975—),男,博士,副教授,CCF 高级会员,主要研究方向为无线网络、移动计算、可信计算等,E-mail:zhaoyunlong@hrbeu.edu.cn。

表获取邻近区域内的各节点的信道使用情况,并选取当前信道冲突最小的来发送数据。

MUP^[3] (Multi-radio Unification Protocol) 协议是典型的多网卡多信道协议,它是在符合 IEEE802.11 标准的硬件上开发的多网卡多信道 MAC 方案。其由于在链路层实现,因此不需要修改现有网络协议栈的上层协议。在 MUP 协议中,各节点维护一张 MUPTable,在 MUPTable 中记录了相邻节点的信息。配置 MUP 协议时,节点上的所有网卡都调谐到相互正交的信道上。信道分配方式不变,网卡一直工作在启动时所分配到的信道上,不能再选择其它信道。所以,MUP 中讨论的切换或选择信道,是指切换或选择在该信道上工作的网卡。每个节点周期性发送探测消息,测量自己和相邻节点间所有可用信道的 RTT(往返时间),按下式算出 SRTT(平滑 RTT):

$$SRTT = \alpha * RTT_{new} + (1 - \alpha) * SRTT \quad (1)$$

式中, α 为加权因子。根据最短 SRTT 选择网卡,并占用该网卡一段随机时间以平衡传输负载。该随机时间过后,MUP 再次比较 SRTT,重新选择网卡。

上述多信道 MAC 协议存在如下一些缺陷:

首先,单收发器多信道 MAC 引入了信道切换时延,由于收发器的半双工特性,数据发送和接收不能并行执行。然而通信节点之间严格要求信道同步,这对于分布式性质明显的多跳无线网络较难实现。

其次,在多收发器多信道 MAC 协议中,节点的多个收发器可以调频到不同信道,因此节点间可以并行地接收和发送数据,这样通信时就无需考虑信道的同步问题,其性能优于单收发器多信道方式。其缺陷是多收发器的结构复杂且网络成本较高。IEEE802.11a/b/g 标准分别提供了 12/3/3 个正交信道,如果完全利用 802.11 标准提供的信道资源,则需要配置的无线网卡数量较多,网络硬件成本较高。

为了缓解上述问题,基于硬件成本和信道利用率这两个因素,本文根据文献[4]中提出的网卡分配思想结合信道冲突模型,提出一种全新的多信道 MAC 协议——DIM(Dual-Interface Management)协议。

3 DIM 协议设计

DIM 协议的设计主要包括以下几方面内容:首先,介绍 DIM 协议中无线网卡的分类方法,这是 DIM 协议的硬件平台。其次,介绍 DIM 协议需要维护的数据结构。最后,介绍 DIM 协议的信道选择算法和信道切换策略。

3.1 WiFi 网卡分类

DIM 协议采用一种混合式无线网卡分类策略,该策略结合文献[4]中所提到的思想进行分配,具体实现过程如下。

假设为每个节点配置 2 个 802.11 标准 WiFi 无线网卡,每个无线网卡的可用信道数为 C ,对无线网卡和可用信道进行如下分类:

1) 固定信道网卡(Fixed Interface)和固定信道(Fixed Channel)。在节点的 2 个无线网卡中,选取 1 个网卡使用静态方式调频到某个信道上。所谓静态方式是指无线网卡在较

长的时间段内在该信上调频,称该无线网卡为固定信道网卡,相应的信道称为固定信道。

2) 可变信道网卡(Switchable Interface)和可变信道(Switchable Channel)。对于另一个无线网卡,根据节点通信需要,动态地在 $C-1$ 个信道内选择信道,称该无线网卡为可变信道网卡,相应的信道称为可变信道。

不同节点的固定信道可能不同,其应用方式如图 1 所示。节点 A、B、C 分别配置双无线网卡,其中一个固定信道网卡、一个可变信道网卡。假设 A、B、C 的固定信道网卡分别侦听信道 3、3、1。A 和 B 通信时,节点 A、B 的固定信道都是 3,两者可直接通信。B 和 C 通信时,B、C 的固定网卡侦听不同信道,B 向 C 发送数据时,B 的可变信道网卡需要将信道切换至 C 的固定信道 1。C 向 B 发送数据时,C 的可变信道网卡需要将信道切换至 B 的固定信道 3。

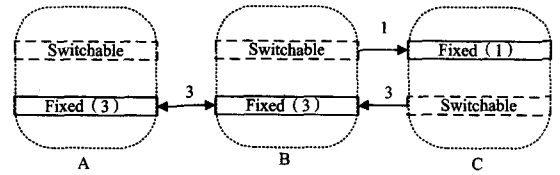


图 1 双无线网卡的信道切换

DIM 协议采用上述网卡分类方式具有如下优势:(1)硬件方面,节点只需配置少量无线网卡,就能充分利用 802.11 标准提供全部信道,提高了信道利用率,降低了网络成本,有利于大规模铺设无线网络。(2)软件方面,在多信道 MAC 协议的信道分配问题中,降低信道冲突和保持连通性是一对矛盾^[5]。采用上述网卡分类方式,节点执行信道选择算法时无需考虑网络的连通性问题,简化了信道选择算法的复杂度,同时简化了通信节点间的信道同步机制。

3.2 DIM 数据结构

DIM 协议是基于 IEEE802.11 标准无线网卡的 MAC 协议。DIM 协议在网络协议栈中的位置和结构如图 2 所示^[3,6]。

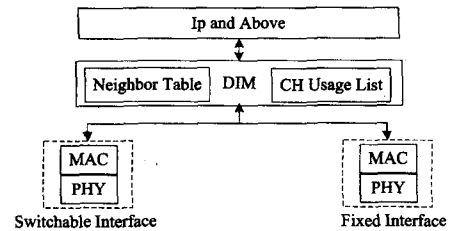


图 2 DIM 网络协议栈

DIM 协议维护邻居信息表(Neighbor Table)和信道使用表(CH Usage List)两个数据结构。其中,邻居信息表用于记录邻居节点的信息。邻居信息表的结构如表 1 所列。

表 1 邻居信息表

域	描述
邻节点	邻节点的 IP 地址
MAC 地址	邻节点固定网卡 MAC 地址
信道	邻节点固定网卡所用固定信道
信道标志	当前固定信道是否可用

DIM 协议在初始时,节点的固定信道网卡在可用信道范

围内随机选择一个信道作为固定信道,节点间周期性地发送和接收 Hello 消息。Hello 消息通过节点的可变信道网卡连续切换信道的方式进行发送,这样调频在不同信道的邻节点的固定信道网卡都能接收到 Hello 消息。Hello 消息中含有节点 IP 和固定信道号。根据邻节点的 Hello 消息,节点填充其邻居信息表的 IP 地址项和固定信道号项。

当节点及其邻居节点进行通信时,将获取的邻节点的 IP 转换为其固定信道网卡的 MAC 地址。因此,该节点启动 ARP 地址解析协议,从而以 IP 获得邻居节点固定网卡的 MAC 地址,以便填充邻居信息表中的 MAC 地址项。信道标志项标识当前邻居节点的固定信道是否可用。

信道使用表用于记录信道干扰区域内的信道使用情况,为固定信道分配算法提供依据。3.3 节将详细介绍信道使用表的结构及其作用。

3.3 固定信道网卡的管理策略

3.3.1 信道冲突模型

DIM 协议中,通信双方所用的信道号是接收方的固定信道号,因此固定信道的选择将成为影响 DIM 性能的关键。固定信道选择算法是 DIM 协议的主要功能,其目标是减少节点间的信道冲突和干扰。

本文采用信道冲突模型解决固定信道的选择问题^[7,8]。其定义如下:图 3(a)是一个网络拓扑图,其中包括节点和链路。节点中的数字代表该节点的固定信道号,字母代表节点编号,例如 B(1)表示节点 B 的固定信道网卡选择的固定信道号为 1。图 3(b)为图 3(a)的信道冲突模型,图 3(b)的顶点表示图 3(a)的链路,图 3(b)的边表示链路是否有信道干扰。如果图 3(a)中节点固定信道间存在干扰,则图 3(b)中相对应顶点之间相互连接,否则不需要连接。以节点 C 为例,节点 C 有 3 个邻居节点 A、D、E,由于节点 C 的固定信道网卡选取信道 3,因此其邻节点的可变信道网卡也要相应地选取信道 3 作为可变信道,以实现与 C 节点的通信;相应地, F 节点的固定信道也为 3,其邻节点 E 的可变信道号也选取 3,因此会在节点 E 处产生干扰。图 3(b)左下角的两个节点之间有一条边,代表信道干扰。

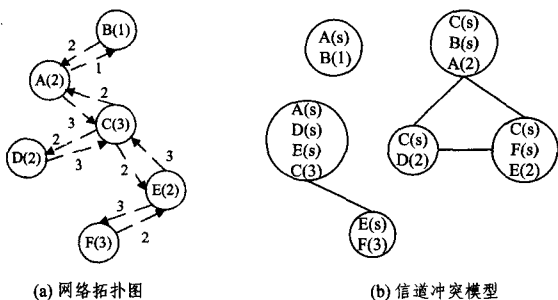


图 3 网络拓扑图和信道冲突模型

对图 3(b)中的节点赋予权值,权值为该节点邻节点数目,则图 3(b)的权值图为图 4(a)。由权值图 4(a)推出固定信道干扰度图,如图 4(b)所示。图 4(b)中节点的权值表示邻节点对该节点的信道干扰程度,通过累加其干扰节点的邻节点数量得到,从而可以得出在图 4(b)中各节点的权值和表示该区域内的信道干扰程度。固定信道选择算法的目标就是使图

4(b)中节点的权值累加和最小,从而使得相互之间的干扰达到最低。

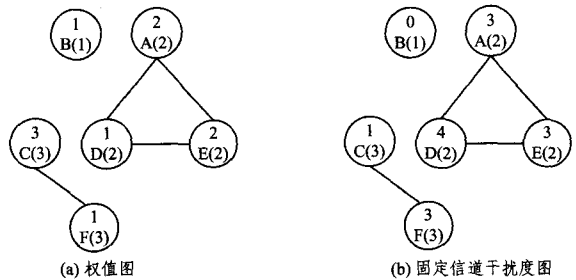


图 4 权值图和固定信道干扰度图

3.3.2 固定信道选择算法

固定信道选择算法的关键是构造网络的信道冲突模型。首先,需要了解整个无线网络的拓扑结构。其次,需要采用集中式调度方式进行节点间的信道分配。在无线多跳网络中,节点的信道干扰区域为两跳范围内的节点。本文使用两跳信道冲突模型解决固定信道的选择问题,通过优化局部区域的固定信道分配,来优化整个网络的固定信道分配。

节点周期性接收 Hello 消息。Hello 消息除了包含 IP 地址和固定信道号外,还包含该节点的邻接点数目及其信道使用表。节点利用邻节点 IP 地址、固定信道号和邻接点数量填充其信道使用表(CH Usage List)。信道使用表的表项结构如表 2 所列。

表 2 信道使用表(CH Usage List)的表项结构

IP	固定信道号	邻节点数
----	-------	------

同时,利用邻接点 Hello 消息中的信道使用表,节点建立两跳冲突模型。根据两跳冲突模型,信道选择算法如下。

```

1 While(get all the CH Usage List of 1-hop neighborhood){
2   if(LCS is null set){
3     Construction of conflict graph for 2-hop neighborhood;
4     Create a graph with each vertex representing fixed channel and its
       degree in the 2-hop neighborhood of node i;
5     Add an edge between two vertices, if fixed channel represented by
       the vertices are the same;
6     Traversing the conflict graph and collect the fixed channel in
       LCS;
7   } //end if
8   if(LCS==ACS)
9     Chosen Channel ← Min(link conflict weight(c)), for all c ∈ LCS;
10  else if(Ci ∈ ACS-LCS) Ci ← Ci;
11  else Ci ← Random chosen Channel from c ∈ ACS-LCS;
12  Clear the LCS;
13 } //end while

```

其中,ACS(available channel set)表示可用信道集;LCS(local channel set)表示节点 i 两跳范围内的信道集,每一次信道选择后将其置空; C_i 表示节点 i 当前的固定信道。

图 3 中,如果节点 D 进行固定信道选择,设可用信道集 $ACS=\{1,2,3\}$,首先构造两跳信道冲突模型,节点 D 信道选择前的冲突模型和信道干扰度图如图 5(a)所示,则可推出 $LCS=\{2,3\}$ 。执行上述算法, D 选择信道 1 为固定信道,此

时固定信道干扰度图的权值和较信道选择前减小了。节点 D 执行算法后的冲突模型以及信道干扰度图如图 5(b)所示。

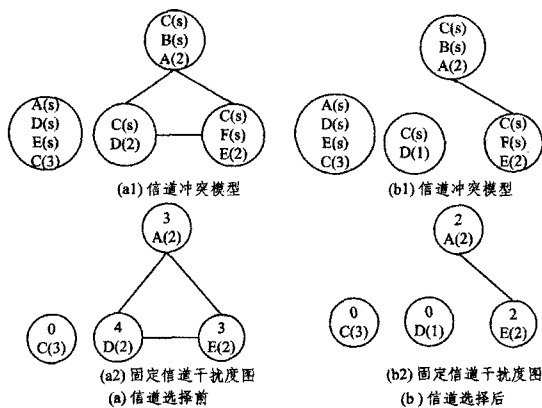


图 5 节点 D 的冲突模型和固定信道干扰度图

3.4 可变信道网卡的管理策略

在 DIM 协议中,对邻居信息表中不同的固定信道项建立信道队列,信道队列的结构如图 6 所示。当节点发送数据分组时,根据下一跳节点的 IP 地址,查询邻居信息表中对应的固定信道和固定信道网卡的 MAC 地址,并把数据包插入相应信道队列中。固定信道队列中等待发送的数据分组由固定信道网卡直接发送,其余信道队列的数据由可变信道网卡信道切换后发送。由于可变信道网卡需要在不同的信道间切换,因此 DIM 协议需要判断何时进行信道切换以及切换至哪个信道。

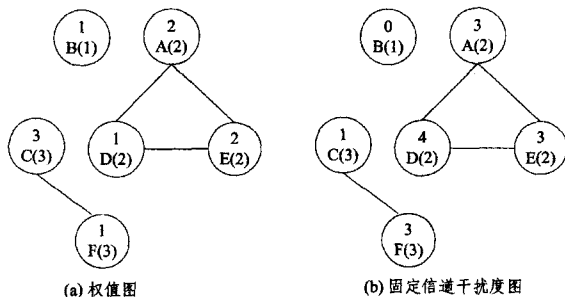


图 6 信道队列结构

DIM 协议中,可变信道网卡的信道切换采取如下原则:

(1)公平性原则:可变信道网卡总是选择等待时间最久的信道队列进行切换。

(2)服务时间有限性原则:可变信道网卡将单个信道队列的发送时间设为上限,该时间上限称为 $MaxServiceTime$,以防止其他信道队列发生饿死现象。

(3)空闲信道队列不切换原则:对于当前信道队列为空的信道,可变信道网卡不切换至该信道,以减少不必要的信道切换时延。

可变信道网卡服务时间上限 $MaxServiceTime$ 的设置较为重要。如果设置过小,则可变信道网卡信道切换的频率会增大,使得信道切换时延影响网络性能。如果设置过大,则会增加信道队列的等待时间,增大数据包发送的端到端的时延。本文的仿真试验中,设置 $MaxServiceTime$ 不少于 5 倍信道切换时延。

节点的可变信道网卡在信道间切换时,会产生多信道隐

藏终端问题。节点的可变信道网卡从一个信道切换至另一个信道时,可能没有接收到该新切换信道早期的 RTS(Request To Send)、CTS(Clear To Send)信息,因此该节点的网络分配矢量 NAV(Network Allocation Vector)可能没有正确设置信道的占用时间。如果此时发送数据,可能会发生冲突。为了避免上述多信道隐藏终端问题,本文规定节点的可变信道网卡在切换信道后的前期,推迟一个数据包的发送时间^[9]。

4 DIM 协议仿真与分析

4.1 仿真实验

本文仿真采用 GloMoSim 网络仿真平台。仿真环境设置如下:80 个节点随机分布在 $250m \times 250m$ 区域,节点传输距离设为 $50m$,节点的干扰半径是传输半径的 2 倍。网络中每个节点配置 2 个无线网卡,MAC 协议为 802.11DCF,信道带宽为 $2Mbps$,网络中可用信道为正交信道,无线网卡的信道切换时延设为 $1ms$ 。

在 80 个节点中随机取 20 个节点。源节点和目的节点各半,采用 DSR 路由协议建立源、目的节点之间的路由。源节点发送 CBR 业务,分组大小为 $512B$ 。仿真的持续时间为 $30s$ 。为了分析 DIM 协议的性能,本文选取 MUP 协议作为对比对象的原因在于 DIM 协议的结构在很大程度上参考了 MUP。

4.2 性能分析

(1)吞吐量

多信道技术的目标是增加网络的吞吐量。该指标可以直接反映协议是否达到目的。计算公式如下:

$$\text{吞吐量} = \frac{\text{数据分组的大小} \times \text{成功发送的分组个数}}{\text{仿真时间}} \quad (2)$$

网络中的节点配置 MUP 协议时,由于节点为双网卡结构,根据 MUP 协议特点,整个网络中只能使用 2 个信道。网络中的节点配置 DIM 协议,信道数量分别为 2、5、12。

当节点配置 DIM 协议并且信道数量为 2 时,与 MUP 协议相比,其仿真结果如图 7 所示。DIM 协议在对吞吐量的性能改善上不如 MUP 协议。这是由于配置 DIM 协议的节点在数据传输过程中,可变信道网卡需要信道切换传输数据,而 MUP 协议的网卡则可直接通信;并且 MUP 协议使用 SRTT(平滑 RTT)动态选择质量较好的信道传输数据,但 DIM 协议的信道分配算法是一种静态分配算法,可用信道数量较少,限制了该信道分配算法的作用。因此,当可用信道数量为 2 时,对吞吐量的改善情况,DIM 协议不如 MUP 协议。但随着分组发送率增大,MUP 对吞吐量的改善相对降低。这是由于分组发送率增大时,节点间的信道的冲突和干扰渐渐增大,MUP 虽然使用 SRTT 选择优质信道,但是其可用信道数量较少,并不能降低整个网络的信道干扰。因此,随着分组发送率的增加,MUP 协议对网络性能的改善会下降。可以通过增加节点无线网卡的方式来提高 MUP 的性能,但是网络的硬件成本会上升。节点配置 DIM 协议,网络的可用信道分别为 5 和 12,当分组发送率较小时,与 MUP 协议相比,这两者对吞吐量的性能改善并不明显。但是随着分组发送率的增大,其在信道数量方面的优势开始显现。虽然信道的冲突和干扰

会随着分组发送率的增大而增大,但是由于可用信道数量较多,DIM协议的固定信道算法对可用信道进行了合理分配,降低了干扰区域内的信道冲突。

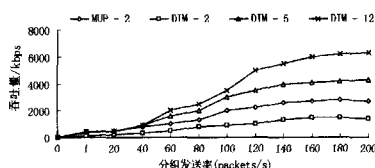


图7 吞吐量

由此可见,在相同硬件配置情况下,通过增加网络可用信道数量,DIM协议大大提高了其吞吐量。

(2) 平均分组延迟

分组延迟是指从发送方发出分组到接收方收到分组的时间,它是排队时延、退避时延和发送时延之和。平均分组时延是分组时延的平均值,也是衡量上述协议性能优劣的重要指标,可根据下式计算:

$$\text{平均分组延迟} = \frac{\sum \text{成功接收的分组延迟}}{\text{成功接收的分组个数}} \quad (3)$$

网络可用信道数为2时,如图8所示,DIM协议数据分组的平均分组延迟始终大于MUP协议。这是由于DIM协议除了排队延迟、退避延迟和发送延迟等因素外,还要加上信道切换时延。但随着分组发送率的增大,节点间信道冲突增大,数据分组的排列延迟、退避延迟会进一步增大。如图8所示,平均分组延迟和分组发送率成正比。

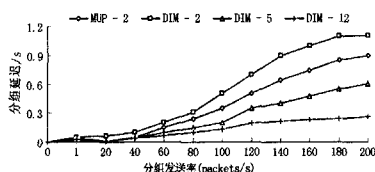


图8 平均分组延迟

节点配置DIM协议,网络可用信道数量分别为5、12,当分组发送率较小时,信道冲突对分组延迟的影响并不显著。虽然DIM协议具有信道数量方面的优势,但是与MUP协议相比,其对分组延迟的改善并不明显。但随着分组发送率的增大,信道冲突对网络性能的影响开始增大。此时,DIM协议在信道数量方面的优势开始显现。由于DIM协议的固定信道选择算法在冲突区域内合理分布了信道,因此整个网络的信道冲突相对较少,降低了分组的排队延迟、退避延迟,平均分组延迟得到明显改善。

结束语 本文针对无线信道资源利用率和硬件成本这对

矛盾,提出了一种低成本、高利用率的多信道MAC协议——DIM协议。DIM协议基于标准的IEEE 802.11双无线网卡,并且使用信道冲突模型来解决其信道分配问题,优化了网络的信道分布,提高了信道利用率,并在网络吞吐量和分组传输延迟方面有较好的性能改善。实际无线网络应用中,节点可能会配置更多数目的无线网卡,DIM协议若增加无线网卡分配算法,便能得到有效扩展。无线网卡分配算法能够根据当前和未来一段时间内节点数据发送和接收的情况,合理地设定固定信道网卡和可变信道网卡的数目。这是本文下一步的研究工作。

参考文献

- [1] 赵蕴龙,马延龙,李香. 无线 Mesh 网链路不相交多路径路由策略[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(9):967-972
- [2] Jungmin S, Nitin V. Multi-channel MAC for Ad-hoc Networks: Handling Multi-channel Hidden Terminals Using A Single Transceiver[C]//Proc. ACM MobiHoc'04. Tokyo Japan, 2004: 222-233
- [3] Adya A, Bahl P, Padhye J, et al. A Multi-radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks[C]//First International Conference on Broadband Network. California, USA, 2004: 344-354
- [4] Kyasanur P, Vaidya N H. Routing and Interface Assignment in Multi-channel Multi-interface Wireless Networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. USA, 2005: 2051-2056
- [5] Raniwala A, Gopalan K, Chiueh T. Centralized Channel Assignment and Routing Algorithms for Multi-channel Wireless Mesh Networks [J]. ACM Mobile Computing and Communications Review, 2004, 8(2): 50-65
- [6] Zhu Jing, Roy S. 802.11 Mesh Networks with Two Radio Access Points[C]//IEEE International Conference on Communications. USA, 2005: 3609-3615
- [7] 束永安,洪佩琳,覃振权. 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
- [8] Cho S, Kim C-K. Interference-Aware Multi-channel Assignment in Multi-radio Wireless Mesh Networks [J]. IEICE Transactions on Communications, 2010, E91. B(5): 1436-1445
- [9] 黄志杰,李峰,高强. 无线多媒体传感器网络MAC协议[J]. 计算机科学, 2010, 37(11): 81-85
- [5] Halfond W G J, Choudhary S R, Orso A. Penetration testing with improved input vector identification [C]//International Conference on Software Testing Verification and Validation. Denver, CO, April 2009: 346-355
- [6] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000
- [7] 王文圣,金菊良,丁晶,等. 水资源系统评价新方法——集对评价法[J]. 中国科学, 2009, 39(9): 1529-1534

(上接第55页)

- [2] 侯一凡. 抗攻击能力评价指标体系的构建与评价方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2007
- [3] 王会梅, 鲜明, 王国玉. 网络抗攻击性能的遗传投影寻踪评估[J]. 计算机科学, 2010, 37(6): 43-45
- [4] Sachdeva M, Kumar K, Singh G, et al. Performance analysis of Web service under DDoS attacks[C]//IEEE International Advanced Computing Conference. Patiala, India, March 2009: 1002-1007