集中式无线 Mesh 网络信道分配策略研究*

符 琦[1,2]，陈志刚[1]，蒋云霞[1]
(1. 中南大学 信息科学与工程学院，长沙 410083；2. 湖南科技大学 计算机科学与工程学院，湖南 湘潭 411201)

摘 要：针对无线 Mesh 网的部署特点，对其信道分配策略的设计难点进行了阐述，将集中式信道分配策略分为基于图论、基于网络流理论和基于网络分区的三种类型，并对上述各类方法的现状和进展进行了介绍、分析和探讨。最后对集中式信道分配策略的研究进行了总结和展望。

关键词：多信道；无线 Mesh 网络；集中式信道分配；信道干扰
中图分类号：TP393 **文献标志码**：A **文章编号**：1001-3695(2012)08-2821-05
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.005

Research on centralized channel assignment strategies of wireless Mesh networks

FU Qi[1,2], CHEN Zhi-gang[1], JIANG Yun-xia[1]
(1. *Institute of Information Science & Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *China*; 2. *School of Computer Science & Engineering*, *Hunan University of Science & Technology*, *Xiangtan Hunan* 411201, *China*)

Abstract: Aimed to deployment of wireless Mesh networks with some problems in design of CA, there were three categories including methods based on graph, network flow and network patition theories. This paper introduced, analyzed and discussed the status and overview of these categories. Finally, it drew the future research directions and ideas of potential solutions for CA.
Key words: multi-channel; wireless Mesh network; centralized channel assignment(CA); channel interference

无线 Mesh 网络(WMNs)因其低成本、易维护和可靠的服务覆盖等特点而成为了近年来的研究热点[1]。由于流间干扰和流内干扰的存在，使得传统的单射频单信道的多跳 WMNs 的节点容量随着网络规模的增大而急剧下降，严重影响了网络的性能[2~4]；而单射频多信道的方案又因其需要将无线接口在信道间频繁地切换，以充分利用多信道方案的优势而导致了毫秒级的切换延时[5]，且不能保证良好的网络连通性，无法对网络传输所需的容错和节点同步功能提供很好的支持，因而同样也不适应 WMNs 发展需求。因此，目前几乎所有的 WMNs 网络部署都采用了多射频多信道的体系结构[6,7]，如图 1 所示，使得节点的多个无线接口可以同时工作在无重叠的多个信道中，如 IEEE 802.11a 支持 12 个频带中心间隔为 20 MHz 的无重叠的信道；IEEE 802.16b 支持 3 个频带中心间隔为 25 MHz 的无重叠的信道；IEEE 802.16 则因为能灵活地使用 2 ~ 66 GHz 范围中所有许可和未许可的信道频率，而能提供比 IEEE 802.11 更多可用的无重叠信道数[8~10]。WMNs 网络中的节点均可通过多个传输/接收硬件接口同时进行数据的收发行为，在极大地减少了链路层延迟的同时，获得了较高的网络吞吐量。与此同时，一些普遍存在的问题(如节点部署、信道分配、链路调度、路由机制等)仍然有待进一步研究，其中必须解决的一个 NP 难问题——信道分配(CA)问题已经成为了 MR-MC 无线 Mesh 网络研究的一个新的热点。若能有效地解决该问题，将更好地为每个节点的无线接口合理有效地分配可用的无重叠信道，进一步提升整个网络的性能。

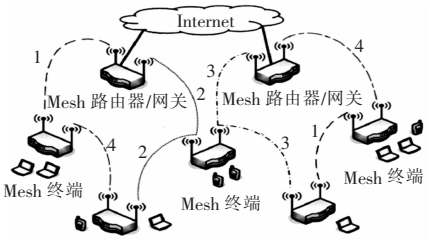

图 1 MR-MC 无线 Mesh 网络体系结构

1 CA 策略设计相关问题

在 CA 策略的设计中，需要综合考虑信道干扰与网络吞吐量、网络延时之间的关系、数据路由与公平性之间的关系，以及对网络的稳定性、连通性影响等诸多因素，比如较少的信道干扰虽然可以增加网络的吞吐量，但同时也可能导致网络的低连通性，降低网络的容错能力，从而影响了网络的稳定性。因此，在设计具体的 CA 策略时，需要针对应用的具体要求来平衡相互影响的多个因素，寻求使网络系统到达最佳状态的折中方案。具体而言，CA 策略的设计需要考虑以下几个关键问题：

a)信道干扰与吞吐量。无线网络中，流间与流内链路的信号干扰是导致网络吞吐量下降的最主要因素，为了使 CA 策略能自适应网络流量的动态变化，CA 的设计必须对不同流量的链路加以区分，流量较大的链路可以考虑分配更多的无重叠信道以减少干扰，提高吞吐量。目前有两种干扰模型被广泛用于 CA 设计，即协议模型和物理模型。在协议模型中，每个无

收稿日期：2012-01-03；**修回日期**：2012-02-19 **基金项目**：国家自然科学基金面上项目(61073186)
作者简介：符琦(1975-)，男，湖南湘潭人，副教授，博士研究生，CCF 会员，主要研究方向为无线传感器网络、无线 Mesh 网络(jackiefq@163.com)；陈志刚(1964-)，男，湖南益阳人，教授，博导，博士，主要研究方向为可信计算、网络与分布式计算、数据库技术；蒋云霞(1975-)，女，湖南衡阳人，副教授，硕士，主要研究方向为计算机网络通信.

线接口拥有一个传输半径和干扰半径(通常是传输半径的 2 ~ 3 倍),只有当两节点在彼此的传输半径之内,且不在其他正在进行数据传输的节点的干扰半径之内时,两者之间的数据传输才会成功;而在物理模型中,只有当接收者收到的传输信号的 SINR 值大于某个阈值时,数据传输才算是成功的,其干扰和噪声信号的能量由其他无线传输信号和环境噪声的相关能量组成。由于物理模型相对复杂,目前的大多数 CA 研究都是针对协议模型进行的。此外,由于政府规定的可用频带和节点配置的无线接口数的限制,设计 CA 时能用的信道和无线接口有限,无法真正消除干扰(虽然可以通过配备频率过滤器对干扰进行过滤以减少干扰[11]),加上节点部署时的几何距离等因素,都导致 CA 问题是一个极具挑战性的 NP 难问题。

b)数据路由与公平性。由于网络节点具有一个或多个无线接口和信道,对它们的选择将改变网络的拓扑,并影响数据的路由;反之,路由的选择又会导致链路流量的分配,从而影响 CA 的选择。因此,目前的 CA 研究通常采用了两种处理方式:(a)将 CA 当做是独立于路由的一种低层机制,不考虑流量负载问题,该问题由作为高层的路由机制来处理,使得 CA 可支持任何一种路由机制;(b)将路由与 CA 相结合,共同优化网络的性能。与此同时,为使节点在数据路由时能公平地使用网络资源(如信道、链路等),CA 策略应该能避免在某些节点的流量部分地占用一些链路的共享信道的时候,其他节点仍然只竞争其他已经拥塞的链路和信道,虽然这种公平性要求会增加 CA 设计的难度,但却是很有必要解决的一个挑战。

c)网络稳定性。目前的研究表明[5],CA 操作引起的波纹效应(RE)和信道振荡(CO)将破坏整个网络的稳定性。RE 是指假设工作在信道 x 的接口 2 想与工作在信道 y 的接口 1 进行通信,为此,接口 2 必须切换到信道 y。与此同时,由于接口 3 正通过信道 x 与接口 2 进行通信,为保持这种通信,接口 3 必须也切换到信道 y。同样的切换还将发生在与通过信道 x 接口 3 进行通信的其他接口上。这种因一个接口信道的改变而引起的连锁反应就称之为波纹效应,这种效应还将引起信道切换时的数据包丢失。CO 则是指信道的选择并不具有倾向性,而是在某些可选择信道之间来回改变。比如两个节点同时发现某个信道空闲,便同时切换到该信道,并进行数据传输,从而导致该信道流量超载,于是两节点又重新切换回原来的信道。这种现象通常是因为 CA 对某个动态度量考量的结果,其所造成的切换开销和流量中断都将严重地削弱网络的性能。因而上述两个现象也是设计 CA 时必须要解决的又一个问题。

d)信道干扰与网络连通性。由于 CA 策略在减少信道干扰的同时,其结果通常会改变网络的拓扑结构,从而导致网络出现不连通的情况。而过多地为不同的接口分配相同的信道,虽然可以获得较好的连通性,却又导致了更多的干扰。因此,如何在最小化干扰的同时,满足网络的弱/强连通性已经成为 CA 设计时的又一个 NP 难问题。

2 集中式 CA 策略研究

集中式 CA 策略通常需要一个控制中心,利用网络的全局信息,通过基于图论、网络流理论的方法和网络分区等方法来完成信道分配的全局规划,并将信道分配结果通知网络中的所有节点,同时还要保证信道分配后网络的连通性(如 K-连通[12])和公平性约束的满足[13]。

2.1 基于图论的分配策略

在以图论为基础的 CA 设计中,MR-MC WMNs 通常被建模成具有不同顶点集 V 和边集 E 的图 $G(V,E)$,CA 问题则可归结为对图中的 V 或 E 进行信道分配。目前在 CA 设计中用到的图主要有(其命名在不同的文献中可能不同):UDG (unit disk graph)、网络拓扑(network topology, NT)图、冲突图(conflict graph, CG)和多接口冲突图(multi-radio conflict graph, MCG),其关系如图 2 所示(其中的数字表示信道编号,节点/顶点间的连线表示两者在彼此的通信范围内,或两者间存在干扰)。其中,UDG 是一种被广泛地用来描述基于协议模型的无线网络的无向图,它只关心两节点间的几何距离,只要两节点在彼此的传输范围之内,则两者间存在一条边用于表示两节点是可以相互通信的;而 NT 图除了要考虑两节点间是否可以通信,还描述了该通信链路是否共享了同一个信道,且共享了 n 个信道的两节点间存在 n 条链路,因此,前者通常作为分析 CA 的基础而独立于 CA,后者则因为规定了 CA 的连通性需求,要在信道分配结束后才能被确定下来;CG 则是在 NT 图的基础上,用一个节点来表示一条冲突链路,同时将相互冲突的链路所对应的节点用边连接起来构成新的 NT 图,以描述整个网络的链路冲突情况;MCG 又在 CG 的基础上,对各节点配置的无线接口间的干扰情况进一步建模,使 CA 问题变成了图的点着色问题,从而可以通过启发式 BFS 算法来处理。

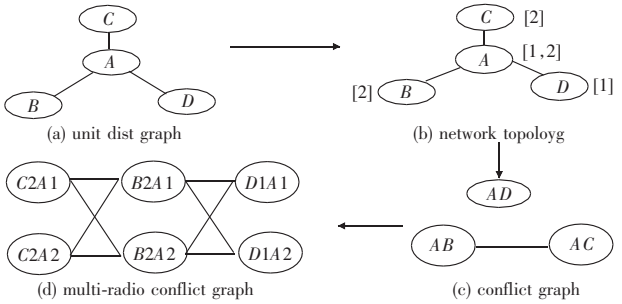

图 2 UDG/NT/CG/MCG 及其关系

目前,基于图论的集中式 CA 策略有以下几个代表成果:

a) connected low interference channel assignment (CLICA)[14]。Marina 等人在文献[14]中提出一个新的概念——基本信道分配(base channel assignment, BCA),并对其进行了公式化定义。BCA 保留了 UDG 中的所有边以构成新的 NT,并对不同的链路分配相关的无重叠信道以减少干扰,同时为任一链路两端的相邻无线接口分配相同的信道以保障网络的连通性,而且 BCA 不针对具体的流量模型以保持通用性。同时 BCA 还结合冲突图来计算每条链路的冲突权值(即冲突图中与每个节点相关的边的数量和),并通过使所有链路中最大冲突权值最小化来达到整个网络的干扰最小化的目的。由于 BCA 属于 NP 难问题,为此,作者提出了一种多项式时间启发算法的解决方案——CLICA(连通低干扰的信道分配)。该策略首先随机选择一节点 v 并分配最高优先级,以节点 v 为起点进行深度优先搜索,同时按优先级递减的顺序为搜索到的节点分配相应的优先级。然后,按节点优先级递减的顺序访问节点,并为该节点的相关链路上的邻节点分配与之相同的信道(该信道为当前局部相邻干扰链路中最大链路冲突值最小的信道),同时根据未被访问到的节点可选信道数对节点优先级进行修正,使得具有较少可选信道的节点具有较高的优先级,以便其尽早

地被访问从而确定信道。实验证明,策略有效地保障了网络的连通性,且便于实现,但缺少信道分配的全局公平性。

b) centralized Tabu-based algorithm(CTA)[15]。Subramanian 等人[15]将 CA 问题规划为如何将信道有效地分配给冲突图中的顶点的问题,同时规定分配给每个节点的信道数不得超过节点的无线接口数,并通过最小化冲突图中连接顶点的边的总数来达到网络干扰最小化的目地。为了实现上述方案,CTA 又将其转换为最大化 K-割集问题(max K-cut problem),即将冲突图中的顶点分成 K 个集合,同一个集合中的顶点分配相同的信道,则最大化连接不同集合的边(该边的两端分别位于不同的集合中)的数量即为最大化 K-cut 问题,而整个网络的干扰情况则可以用端点均位于同一个集合中的边的数量来描述。显然,同一个集合中的边数越少,网络中的干扰链路就越少。由于具有接口数量约束的最大化 K-cut 问题仍然是一个 NP 难问题,研究人员为此利用智能优化算法中的禁忌算法(Tabu search,TS)来为其求解,并获得了整个网络干扰下界值的一个近似解,其主要不足在于未能考虑对多链路的信道分配问题,只对冲突图中顶点间的单个链路进行建模分析。

c) breadth first search channel assignment(BFS-CA)[16]。由于在 UDG 和 CG 图中,难以对节点(顶点)的无线接口情况进行建模,Ramachan 等人[16]提出了一种冲突图的扩展图——多接口冲突图(multi-radio conflict graph,MCG),对顶点的各无线接口间链路的连接和干扰情况进行了有效的建模,并在此基础上提出了一种广度优先搜索信道分配方案(BFS-CA)。该方案假定网络中有一个用于进行全局信道分配的网关节点,并约定靠近网关的 Mesh 节点具有较多的无线接口,距离较远的则相对不多,以此来满足网关附近流量较大的通信需求。同时还约定每个 Mesh 节点至少有一个无线接口工作在缺省的公共信道上,进行控制信息和数据包的传输,以保证网络的连通性。在此前提下,每个接口通过测量当前有哪些接口在哪个信道上与之通信及其拥塞程度,对它所知的相关信道进行信道上工作的接口数量和信道的拥塞程度两类排名,并将该排名情况通告给网关节点。网关节点根据此排名信息,通过广度优先搜索方式,在尽量不干扰邻居节点的原则下,由近及远地对每个无线接口进行信道分配;如果满足不了该原则,就为接口随机地选择信道。BFS-CA 易于实现,但只适用于具有一个网关节点作为网络流量汇入(出)中心的情况,在整个网络的负载均衡方面缺少可扩展性。

2.2　基于网络流的方案

基于图论的建模方式虽然比较直观,便于 CA 策略的设计,但仅通过顶点和边来建模,难以考量网络的流量负载这一重要设计参数,从而使 CA 结果不能很好地提升系统的性能。为此,研究人员引入了基于网络流的 CA 方案。在基于网络流理论的 CA 设计中,MR-MC 无线 Mesh 网络被建模成有向图 $G(V,E)$,对于 E 中的每条链路 L,其流量速率不能大于其最大容量 $C(C\geqslant 0)$[17],且假定每个源节点产生的流速度(或端到端的流速)是已知的。和基于图论的 CA 策略一样,该类问题亦属于 NP 难问题,需要通过采用启发式或近似算法来获得最优解;不同的是,由于路由算法决定了链路 L 上的流量与流速,从而影响最终的 CA 结果;而 CA 的结果又将决定链路的可用容量,从而左右路由的选择。因此,基于网络流的 CA 策略通常需要和一定的链路调度及路由算法相结合,以寻求满足网络吞吐量最大化或网络干扰最小化的折中方案。另一方面,网络流的方案虽考虑了流量负载的影响,但大都假定流量速率为某个常量,与实际网络中流量由源节点随机突发产生的情况不符,因而在实用性上有待提高。目前,该方向的研究有以下几个代表成果:

a) load aware channel assignment(LA-CA)[18]。作为集中式 CA 策略的研究先驱,Raniwala 等人提出了两种信道分配策略:NPS(neighbor partitioning scheme)和 LA-CA。其中,NPS 的思想相对简单,具体包括邻居节点与接口绑定、接口与信道的绑定两个过程。前者根据节点的无线接口数量 N,将其邻居节点对应地分成 N 组(组内节点数量相对平均),同一个组内的节点可以通过相同的无线接口与之通信;后者则为每个无线接口分配在其干扰半径内的当前最少使用信道,以尽可能地减少组间节点的干扰。LA-CA 则相对复杂,考虑到同一条链路可能分配了 M 个无重叠信道,因此该链路将与其干扰范围内的其他共用了这些信道的链路一起分享信道的部分带宽 C_m(C_m = 信道带宽/共享信道链路数,$m=1,2,\cdots,M$),$\sum C_m$ 则构成了当前链路的总容量。在此环境下,LA-CA 假定每对节点间的端到端数据流的速率是已知的,以便确保 CA 的结果能使每条链路的总容量不小于链路上负载的总和。为了打破 CA 与路由之间的相互制约,LA-CA 首先根据每条链路的端到端数据流的速率来估计其初始负载,从而获得当前每条链路负载临界值(即该链路上所有负载的总和)及其降序排名,然后按此排名通过简单的贪婪算法为链路分配干扰程度最小的信道。此后,根据 CA 的结果重新计算链路的总容量,并决定相关数据路由。如果每条链路的链路容量均大于其链路负载临界值,则结束 CA 迭代;反之,重新执行 CA 过程。具体如图 3 所示。此方案虽然易于实现,但其简单的 CA 贪婪分配算法却导致了 CA 结果的不稳定,从而导致了系统性能的不稳定。

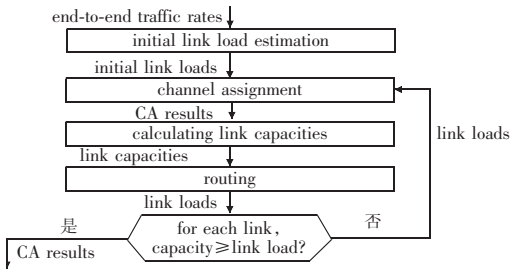

图 3　LA-CA 策略示意

b) balanced static channel assignment & packing dynamic channel assignment(BSCA & PDCA)[19]。Kodianam 等人将无线 Mesh 网络中的路由选择、链路调度及信道分配的联合优化问题规划为网络流中的多物品网络流问题(multi-commodity flow problem),即每一对源、目的节点之间的数据流被看成一种具有一定端到端速率的物品来处理。该方案首先给出了各种输入条件(如具有不同带宽的信道)和线性目标函数(如可用速率向量的决定函数、公平性约束函数等)的相关线性规划定义,然后为网络流图中的各种输入流(即物品)决定满足规划约束的传输路由,并在此基础上通过静态(BSCA)和动态(PDCA)的启发式贪婪算法来进行信道分配和链路调度。其中,BSCA 通过对链路上最大流速率的最小化约束来分配信道,其结果在首次决定后就不再随流量的变化而更改,而且链路干扰范围内共享了同一信道的不同链路将被分配以不同的时隙来进行数据传输,以满足干扰最小化的目的。与之相反,PDCA

的 CA 结果将随着网络中流的变化而相应改变。PDCA 定义了一个具有 n 个时隙的时间周期 T,并在每个周期开始的时候执行 CA 任务。PDCA 根据链路上流量负载的降序排名来进行信道分配,通常流量较大的链路将为之分配当前可共享带宽最大的信道,从而同时解决信道分配和链路调度问题。上述两种算法虽能灵活地根据网络的各种输入条件(带宽、流量负载等)来规划不同的输出目标,但其简单的贪婪分配算法却可能导致最坏分配情况下性能边界缺失的问题。

c) joint routing and channel assignment and link scheduling (RCL)[13]。在 b) 的基础上,Alicherry 等人提出了基于常数因子的联合优化近似算法 RCL,其主要目标是最大化节点的流量常数因子 λ,使其与节点的流量速率 L 的乘积结果能满足网络流的传输要求,从而获得节点间的最大公平性,而非最大化整个网络的吞吐量。为此,RCL 规定节点共享了 K 个无重叠的信道,且每个节点的接口数量可以不等。其 CA 过程如下:如果当前可用信道数等于每个节点的最小接口数 $I_{\min}$,则将当前的网络流图 G 转换为每个节点只具有 $I_{\min}$ 个接口的图 G',并在 G' 的基础上使用 K 个信道中的 $I_{\min}$ 个信道进行分配;然后对剩下的 $K-I_{\min}$ 个信道进行上述 CA 迭代,并将最终的 CA 结果重新映射成图 G,从而为通过调整数据流量来最小化信道间的最大干扰提供依据。RCL 虽然破坏了 b) 中 LP 在某些方面的灵活性(如输入条件的灵活设置等),却获得了相对稳定的流速和数据路由。

2.3 基于网络分区的方案

在基于网络分区的方案中,节点间的链路和接口被分成若干个不相交的区域(也称为簇或子网络),同一区域使用单一信道进行通信,不同区域分配不同的信道以减少网络的干扰。这种方式通常采用较简单的分区算法,因而不会导致 NP 难问题的出现,也不需要寻求相应的启发式(或近似)解决算法,但分区内的链路对信道的选择缺乏灵活性,难以获得优化的网络最大吞吐量或是最小信道干扰。目前,这类的研究有以下几个代表成果:

a) clustered channel assignment (CCAS)[20]。由于为节点间的每个数据流都分配最佳的 CA 和链路调度方案可能将导致信道的重新分配,从而中断当前数据流的传输,影响网络的稳定性。为此,Arun 等人在其前期研究 LoCALS 分配算法[21]的基础上,对信道的重配置提出了一个定量地评估策略 CCAS,试图在最小化重配置代价与最大化网络利用率之间寻求性能的折中。CCAS 对网络的动态负载需求矩阵 T 的相关性进行计算,以动态地决定数据流的分簇,并对不同的分簇分配不同的信道以减少干扰。基本思想如下:将当前新注入网络的负载矩阵 T_i 与当前分簇 C 的负载矩阵 T_c 进行相关性计算,如果其结果小于某个分簇门限值 δ,则不需要重配置而直接将其归于当前分簇;如果不属于当前分簇,却属于其他已存在的分簇,则需要对现有 CA 进行重配置;如果与所有已存在分簇都不相关,则形成新的分簇,并重新配置相关信道。很显然,δ 值越大,分簇的数量和重配置的次数越小,反之亦然。相关仿真实验也证明,当网络的负载变化时,分簇的信道分配策略要优于完全的静态(或动态)信道分配策略,有效地缓减了因为重配置导致的吞吐量下载、流量中断等问题。

b) matroid cardinality intersection channel assignment (MCI-CA)[22]。Brzezinski 等人在 UDG 和冲突图的基础上提出了一种基于矩阵胚交集(matroid intersection)理论的分配策略 MCI-CA,并利用具有平均速率 λ(而非固定速率)的随机过程来描述链路的流量负载信息。为了得到通过分区以减少干扰的目的,MCI-CA 要求分区的结果使得每个分区的网络拓扑能够满足如下要求,即分区内使得单一信道导致的干扰能够通过稳定的分布式链路调度来避免。由于不是所有的网络拓扑都能找到相应的调度算法,因此研究人员利用文献[23]中的极大权值调度算法(maximal weight scheduling algorithm, MWSA)来寻找满足条件的分区网络拓扑,并证明了森林拓扑结构能满足 MWSA 的所有约束条件,同时建议了贪婪重分配、最大程度重分配和平均程度重分配三种多项式时间算法,以实现合理分区、均衡森林分布、提高整体吞吐量的目的。MCI-CA 的优点在于将 CA 问题规划为多项式时间问题,而非其他方案中的 NP 难问题,因为不需要寻求相应的启发式(或近似)算法,且每个分区中的森林拓扑结构能够通过分布式链路调度算法保持其所在区域的稳定性;缺点是需要一定的时间同步以满足链路调度算法的要求,而且要求可供分区使用的信道数量要足够多,否则可能导致某些分区出现不稳定的现象。

c) maxflow-based centralized channel assignment (MCCA)[24]。Avallone 等人在无向图的基础上对 WMN 中的路由节点和网关节点间的数据流最大化与信道分配等问题进行了研究,同时通过在链路两端节点间分配一个共用信道来保持网络连通性,并约定分配给每个节点的信道数量不能超过其无线接口的数量。为此,MCCA 首先定义了每条链路数据流的临界值,以计算路由节点与网关节点间的数据流的最大吞吐量,以及达到最大吞吐量时每条链路必须容纳的数据流的数目,然后在分配信道的时候为其分配更好的临界值以应付相邻节点的干扰问题。MCCA 将 CA 分成链路分配绑定与组信道分配两个阶段,第一个阶段根据链路的临界值将所有链路分成若干个组,并约定每个节点所在的组数不能超过其无线接口的数量;第二个阶段根据每个组的链路最大临界值的降序排名进行信道分配,从而确保具有较大、最大临界值的链路所在的组能较早地分配到最少干扰的信道。由于 MCCA 仅仅根据链路的最大临界值排序来分配信道,有可能导致其无法获得预期的最大网络吞吐量。

3 结束语

随着无线接口硬件价格的迅速下降和 IEEE 标准对无重叠多信道的支持,使得 MR-MC 无线 Mesh 网络的部署已不存在实现上的问题,然而在其 CA 策略研究领域仍有一些问题没有得到充分的考虑,主要体现在以下几个方面:

a) 外部干扰问题。由于 MR-MC 无线 Mesh 网中节点间的通信大多是在没有执照约束的无线电频带上,使用 IEEE 802.11 或 IEEE 802.16 标准进行,因此无法保证其他外部无线设备不会使用相同的频带。在现有的一些 MR-MC 无线 Mesh 网络部署中[6,16],每个节点的无线接口所使用信道的状态随时受到监控,如果某个节点的无线接口监测到有外部干扰(如对外部 MAC 地址的认识等),则该节点将自动运行相关 CA 策略将无线接口切换到新的可用信道上。目前这部分的研究还很少,如何设计和改进现有物理层对信道的管理,减少或避免外部无线的干扰,提高 CA 策略的效率将是一个有待进一步提高的问题。

b) 有向天线的使用。在已有的研究工作中,只有少数研

究[25]考虑了在 CA 中使用有向天线的问题,但都对天线的方向感知作假定性条件设置。随着硬件价格的不断下降,具有严格方向性的有向天线将得到普及。因此,通过廉价的、定向性强的有向天线来设计干扰相关的 CA 策略以提高网络性是另一个可行的研究方向。

c)信道振荡问题。少数研究[26]通过使用基于概率的信道切换机制来预防信道的振荡问题,但该方法对提升整个网络性能来说并不是最优的。鉴于此,可以考虑将解决路由振荡问题的相关方案进行修改,以寻求解决信道振荡问题的方法。

d)QoS 问题。在某些 WMNs 应用中(如 VoIP、视频监控),服务质量是必须得到保证的,但到目前为止,还没有将 QoS 约束考虑在相关的 CA 策略研究中,更多的是将 QoS 约束和路由机制相结合[27,28],在网络的第 2/3 层对帧数据和分组数据提供区分服务。由于 CA 策略不直接处理数据的转发,但它却决定了可使用的网络链路的带宽,因此可以考虑将 QoS 约束引入 CA 策略,更好地为网络的第 2/3 层数据传输时的带宽需求提供支持,比如通过 CA 策略使得每条链路的带宽不低于某个数据传输所需的阈值。

参考文献:

[1] 蒋杭州,孙季丰. 基于分组管理的无线 Mesh 网多信道分配算法[J]. 计算机应用研究, 2010,27(2):661-663.

[2] CHAKCHOUK N, HAMDAOUI B. Traffic and interference aware scheduling for multiradio multichannel wireless Mesh networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology,2011,60(2):555-565.

[3] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S. Distributed multi-interface multichannel random access using convex optimization[J]. IEEE Trans on Mobile Computing,2011,10(1):67-80.

[4] BONONI L, Di FELICE M, MOLINARO A, *et al*. Enhancing multi-hop communication over multi-radio multi-channel wireless Mesh networks: a cross-layer approach[J]. Computer Communications, 2011,34(13):1559-1569.

[5] RONASI K, MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S. Delay-throughput enhancement in wireless networks with multipath routing and channel coding[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology,2011, 60(3):1116-1123.

[6] SUBRAMANIAN A P, GUPTA H, DAS S R, *et al*. Minimum interference channel assignment in multiradio wireless Mesh networks[J]. IEEE Trans on Mobile Computing,2008,7(12):1459-1473.

[7] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S. Joint logical topology design, interface assignment, channel allocation, and routing for multi-channel wireless Mesh networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2007,6(12):4432-4440.

[8] AKYILDIZ I F, WANG Xu-dong, WANG Wei-lin. Wireless Mesh networks: a survey[J]. Computer Networks,2005,47(4):445-487.

[9] 田启明,余官定. 无线 Mesh 网络中基于信道流量干扰感知的路由协议[J]. 计算机应用研究, 2011,28(6):2254-2256.

[10] 李礼,张春元. 多接口多信道无线网状网中流量感知的信道带宽调制算法[J]. 电子学报,2010,38(4):875-881.

[11] FUXJAGER P, VALERIO D, RICCIATO F. The myth of non-overlapping channels: interference measurements in IEEE 802.11[C]//Proc of the 4th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services. 2007:1-8.

[12] CAPONE A, CARELLO G, FILIPPINI I, *et al*. Routing, scheduling and channel assignment in wireless Mesh networks: optimization models and algorithms[J]. Ad hoc Networks, 2010, 8(6): 545-563.

[13] ALICHERRY M, BHATIA R, LI L E. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multi-radio wireless Mesh networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(11):1960-1971.

[14] MARINA M K, DAS S R. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of the 2nd International Conference on Broadband Networks. 2005:381-390.

[15] SUBRAMANIAN A, GUPTA H, DAS S. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of IEEE SECON. 2007:481-490.

[16] RAMACHANDRAN K, BELDING E, ALMEROTH K, *et al*. Interference aware channel assignment in multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2006:1-12.

[17] MAO Xu-fei, LI Xiang-yang, DAI Guo-jun, *et al*. Flow admission control for multi-channel multi-radio wireless networks[J]. Wireless Networks,2011,17(3):779-796.

[18] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUEH T C. 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.

[19] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the capacity regionin multi-radio multi-channel wireless Mesh networks[C]//Proc of ACM MobiCom. 2005:73-87.

[20] KANAGASABAPATHY A A, FRANKLIN A A. An adaptive channel reconfiguration algorithm for multi-channel multi-radio wireless Mesh networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2010,9(10):3064-3071.

[21] KANAGASABAPATHY A A, FRANKLIN A A, MURTHY C S R. A load aware channel assignment and link scheduling algorithm for multi-channel multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of International Conference on High Performance Computing. 2008:183-195.

[22] BRZEZINSKI A, ZUSSMAN G, MODIANO E. Enabling distributed throughput maximization in wireless Mesh networks: a partitioning approach[C]//Proc of ACM MobiCom. 2006:26-37.

[23] DIMAKIS A, WALRAND J. Sufficient conditions for stability of longest queue first scheduling: second order properties using fluid limits[J]. Advances of Applied Probabilities,2006,38(2):505-521.

[24] AVALLONE S, AKYILDIZ I F. A channel assignment algorithm for multi-radio wireless Mesh networks[C]//Proc of the 16th International Conference on Computer Communications and Networks. 2007: 1034-1039.

[25] DAS S M, PUCHA H, KOUTSONIKOLAS D, *et al*. DMesh: incorporating practical directional antennas in multichannel wireless Mesh networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2006,24(11):2028-2039.

[26] KTASANUR P, VAIDYA N H. Routing and link-layer protocols for multi-channel multi-interface Ad hoc wireless networks[J]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2006,10(1):31-43.

[27] LIU T H, LIAO W J. Interference-aware QoS routing for multi-rate multi-radio multi-channel IEEE 802.11 wireless Mesh networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications,2009,8(1):166-175.

[28] CHENG H T, ZHUANG W H, SALEH A, *et al*. Joint QoS-aware node clustering and tax-based subcarrier allocation for wireless Mesh networks[C]//Proc of IEEE Global Telecommunications Conference. 2008:1-5.