

无线 Mesh 网络部分重叠信道分配综述

王继红, 石文孝, 李玉信, 金凤, 王春悦

(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘 要: 无线 Mesh 网络面临的主要挑战是由共信道干扰导致的网络容量下降问题, 仔细规划部分重叠信道的使用能减少甚至消除共信道干扰。在介绍部分重叠信道基本概念的基础上, 重点从单播和多播 2 个角度对国内外部分重叠信道分配研究领域的成果进行了分类总结与分析; 深入剖析部分重叠信道分配中的难点与挑战, 并展望了未来的研究方向, 以期促进无线 Mesh 网络向“最后一公里”接入的理想解决方案演进。

关键词: 无线 Mesh 网络; 部分重叠; 信道分配; 干扰

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2014)05-0141-14

Survey on channel assignment algorithms using partially overlapped channels in wireless Mesh network

WANG Ji-hong, SHI Wen-xiao, LI Yu-xin, JIN Feng, WANG Chun-yue

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Capacity degradation caused by co-channel interference was a major challenge faced by wireless Mesh network. Partially overlapped channels could be carefully utilized to reduce or even eliminate co-channel interference. The basic concept of partially overlapped channels was presented, and then current partially overlapped channel assignment algorithms both at home and abroad were classified, summarized and analyzed from unicast and multicast point of view; problems and challenges of partially overlapped channel assignment were deeply analyzed, and the future directions for partially overlapped channels were pointed out. Partially overlapped channels are expected to help wireless Mesh networks move towards the ideal solution for last mile access further.

Key words: wireless Mesh network; partially overlapped; channel assignment; interference

1 引言

无线 Mesh 网络(WMN, wireless mesh network)是一种多跳无线网络, 具有高带宽、快速部署、易于安装、维护简单、前期投资成本低等优势, 能够扩展无线网络的覆盖范围, 因此成为构建下一代无线通信系统的潜在技术^[1]。WMN 是由固定的 Mesh 路由器、固定或移动的 Mesh 客户端组成的。部分 Mesh 路由器具有桥接功能, 可以通过有线链路连接到 Internet, 充当 WMN 的网关。Mesh 路由器通过无线互联构成骨干网络, 将 Mesh 客户端与网关通过多跳连接起来, 为客户端提供 Internet 服务^[2]。

为支持 WMN 的通信应用, IEEE 制定的相关 Mesh 网络工业标准具体如下。①802.11a/b/g 协议标准。802.11a/b/g 涉及物理及 MAC(media access control)层的相关标准, 指导局域网内节点的相互通信, 正式标准已经形成。②802.11s 协议标准。802.11s 扩展了 802.11 的 MAC 协议, 是专门针对 WMN 设计的, 使网络具备自组织、自配置、自动识别等功能, 实现对局域网范围内单播、多播和广播的支持, 目前最新的版本是 IEEE SA 802.11s-2011。③802.15.5 协议标准。802.15.5 使用超宽带(UWB, ultra wideband)技术, 主要是支持个域网, 实现短距离内的超高速无线接入, 目前关于 WMN 的最新版本为 IEEE SA

收稿日期: 2013-10-31; 修回日期: 2014-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61373124)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(61373124)

802.15.5-2009。④802.16 协议标准。802.16 MAC 层采用 TDMA(time division multiple access)协议, 实现城域范围内的无线多跳传输, 目前最新的版本是 IEEE SA 802.16-2012。IEEE 802.11b/g 是目前广泛使用的默认协议标准, 也是本文的研究对象。

无线通信多使用电磁波来传输信息, 通常信号都占用较宽频带, 而能量主要集中在较窄的频带范围内。比如 2.4 GHz ISM(industrial, scientific, medical) 频段 802.11b/g 共划分为 14 条信道, 通常只使用前 11 条信道。相邻信道的中心频率间隔为 5 MHz, 而每条信道占用的频谱带宽为 22 MHz, 因此信道间隔(即中心频率所代表的信道号的差值)必须达到 5 及以上时频谱才不会重叠, 这样的信道称为正交信道(orthogonal channel)。802.11b/g 最多可用的正交信道为 3 条, 即信道 1、6 和 11, 如图 1 所示。频谱之间有交叠的信道称为部分重叠信道 POC (partially overlapped channel), 比如图 1 中信道 2 和信道 5 之间的信道间隔为 3, 信道 2 和信道 5 互为部分重叠信道。传统的无线网络设计认为 POC 带来的邻信道干扰(adjacent channel interference)严重影响节点间的正常通信, 因此通常为相隔很近的并行通信的 2 个节点分配正交信道。但是频谱资源的稀缺使得网络很难避免为相隔很近的链路分配相同信道。由此导致的共信道干扰(co-channel interference)会降低数据传输速率, 减少网络中的并行传输数, 引发 WMN 容量下降等性能问题。随着认知无线电(cognitive radio)和软件定义无线电(software defined radio)的发展, POC 的干扰控制问题能够得到有效解决, 节点可以根据自身观察到的干扰动态选择信道, 从而增加网络中的并行传输数, 提升网络的整体吞吐量性能。自 MISHRA 提出使用 POC 提升信道空间复用和频谱效率, 增加网络吞吐量观点^[3]后, 学术界对 WMN POC 的使用问题展开了深入研究, 热点几乎都集中在利用 POC 进行信道分配以进一步减小干扰。

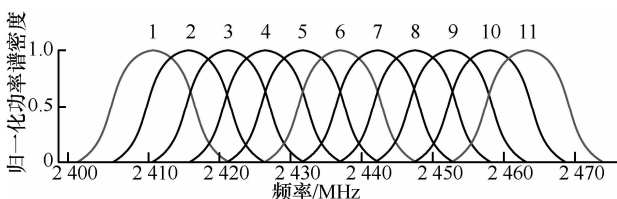


图 1 IEEE 802.11b/g 频谱示意

本文全面阐述了 POC 信道分配的基本思想和

演进过程; 对国内外 POC 信道分配算法研究领域的成果进行了细致的分类和综述分析, 指出 POC 信道分配的难点; 最后对 POC 未来的研究方向进行了展望, 以期探索利用 POC 降低甚至消除网络中干扰的方法, 促使 WMN 克服容量瓶颈, 向“最后一公里”接入的理想解决方案演进。

2 部分重叠信道分配的基本思想

2.1 部分重叠信道分配问题的提出

MISHRA 首次提出了在无线通信系统中利用 POC 的观点, 为了描述 POC 之间的重叠度, 定义了干扰因子(I-factor, interference factor) $I(i, j)$ 。 $I(i, j)$ 仅取决于信道上的信号频率之间的重叠程度, 与环境的无线传播特性无关。 $I(i, j)$ 可以通过理论分析或经验测量方法获得。式(1)给出了 $I(i, j)$ 的经验测量表达式^[3]

$$I(i, j) = \frac{P_i}{P_j} \quad (1)$$

其中, P_i 表示给定位置处来自信道 j 的某特定信号在信道 i 上的接收功率; P_j 表示相同位置的相同信号在信道 j 上的接收功率。因此, $I(i, j)$ 表示信道 j 上的信号功率在信道 i 上的接收比例。

I-factor 的理论分析表达式如式(2)所示^[4]

$$IF_{(T,R)}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_T(f) \times B_R(f - \tau) df \quad (2)$$

其中, $\tau = F_T - F_R$ 为发送端和接收端信道的频率间隔; $S_T(f)$ 表示发送频谱内信号的功率分布; $B_R(f)$ 表示接收带通滤波器的频率响应。使用理想的传输频谱模板近似表示 802.11 b/g 信号的功率分布, 则有

$$\tau = 5|i - j| \quad (3)$$

$$B_R(f) = S_T(f) = \begin{cases} -50, & |f - F_c| > 22 \\ -30, & 11 < |f - F_c| \leq 22 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

其中, F_c 表示信道的中心频率。将式(3)和式(4)代入式(2)即可计算得到 I-factor。文献[4]通过仿真证明使用经验测量方法和理论分析方法获得的 I-factor 值几乎是相同的, 这也为后续研究使用经验测量方法获取干扰范围提供了理论基础和依据。

MISHRA 将 POC 应用于无线局域网(WLAN, wireless local area network)和 WMN 2 种场景, 对现有的信道分配方法进行了改进。仿真实验结果证明改进的利用 POC 信道分配方法能更好地实现空间

复用、减少链路层冲突，从而提升系统吞吐量，改善系统性能。

FENG Z H 对使用 POC 提升 WMN 吞吐量性能的作用问题进行了研究，并提出了正交约束 (orthogonal constraint) 概念，即必须为一个节点的不同接口分配正交信道，否则不管接收端位于何处，都会由于严重的自干扰导致无法进行正常通信^[5]。在正交约束条件下 FENG Z H 构建了 POC 下的信道分配，同样也证明了 POC 在提升网络性能方面的巨大优势。

POC 下的信道分配问题的基本思想是为节点提供接入可用频谱内全部信道的机会，而不仅仅局限于正交信道，节点根据本地观察结果自主确定某信道是否可用，从而增加信道多样性和整体网络容量^[5]。

2.2 部分重叠信道分配算法的分类

总体来说，POC 下的信道分配问题研究，按照具体处理的通信类型可以分为 POC 下的单播信道分配和 POC 下的多播信道分配。POC 下的单播信道分配，按照使用的收发信机数可以进一步细分为 POC 下的单收发信机信道分配和 POC 下的多收发信机多信道分配；POC 下的多播信道分配通常处理

的都是多收发信机多信道。按照是否将信道分配与其他问题联合求解，POC 下的信道分配问题研究可以分为 POC 下的纯信道分配和信道分配与其他问题联合。纯信道分配问题，按照链路停留在某特定信道上的时间长度可以分为：静态信道分配、动态信道分配和混合信道分配这 3 类，具体分类如图 2 所示。

3 部分重叠信道单播信道分配

单播通信 (unicast communication) 即通常所说的点对点通信，发送端将数据分组发送到指定的单一接收端。决定点到点通信传输性能的主要因素包括距离导致的信道衰落、并行传输导致的干扰、频谱重叠和编码^[6]。

3.1 单收发信机信道分配

3.1.1 纯信道分配问题

LI Z R 等提出单收发信机 POC 信道分配算法 DPOCA (dynamic partial overlapping channel assignment)^[7]，使用 POC 解决无法直接通信的 2 个节点之间通过第 3 个节点中继数据分组的问题。DPOCA 算法为负载最重的节点分配 3 条正交信道

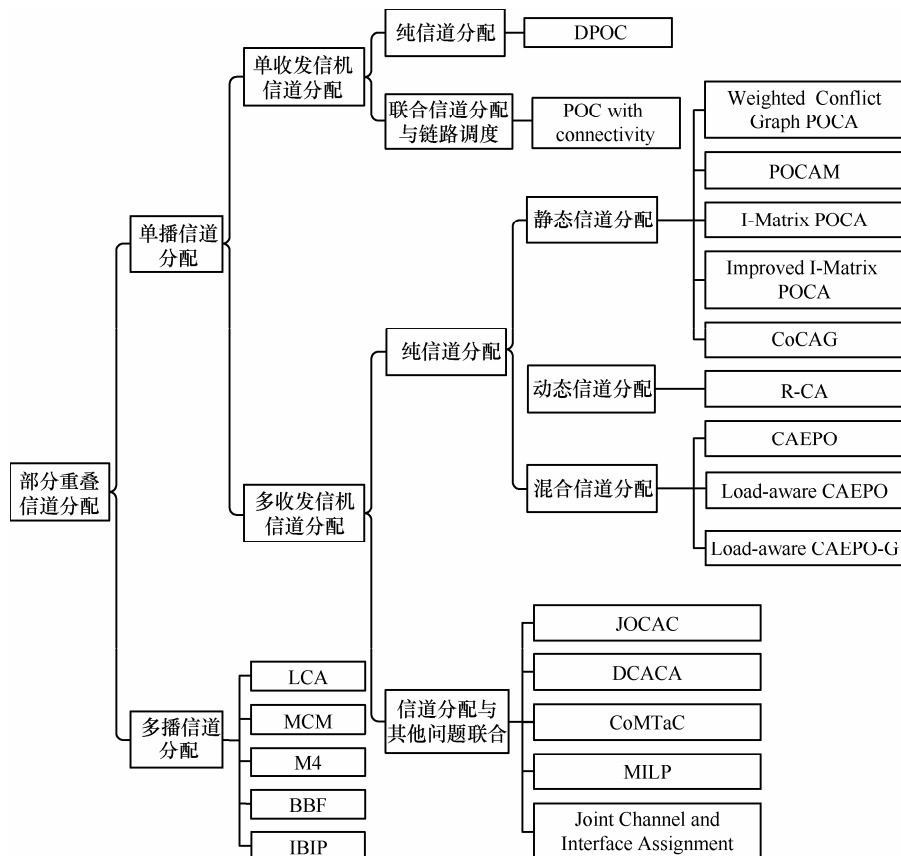


图 2 POC 下信道分配方法分类

中的一条，为其邻区中负载次重的节点分配 3 条正交信道中的另一条。对于业务相关的一些节点，选出一个中继节点，为中继节点分配的信道随负载的变化动态改变。实质上 DPOCA 算法利用 POC 在原有网络拓扑基础上增加了额外的边，增强了网络的连通性。

3.1.2 信道分配与其他问题联合

LIU H P 提出了单收发信机不转换接口的 WMN 环境下联合信道分配和链路调度算法^[6]。由于信道分配和链路调度本身都是 NP 难(NP-hard)问题，作者采用先确定信道分配，在给定信道分配方案下寻找最优链路调度方案的思路。信道分配使用遗传算法来求解，经过个体选择、交叉和变异过程产生出新个体，利用链路调度计算得到的系统容量值进行个体的筛选，直到达到预先设定的演进代数，返回最优系统容量和信道分配向量。

单收发信机 WMN 中，节点不能同时进行收发，且某特定时刻节点只能与一个相邻节点进行通信，网络吞吐量很低。因此，多收发信机多信道(MRMC, multi-radio multi-channel)技术^[8]得到了普遍应用，通常每个节点配置至少 2 个收发信机完成接收和发送功能。

3.2 多收发信机多信道分配

MRMC WMN 是业界研究的热点。这种场景下，每个节点配备多个收发信机，每个收发信机使用独立的信道，因此网络可以利用更多的频谱资源。每个收发信机都有自己的物理层和媒体接入控制(MAC, medium access control)层，收发信机之间的通信是完全独立的，因此节点可以同时与多个相邻节点进行通信。配备多个收发信机的接入点可以使用不同的收发信机执行接入功能和多跳中继功能，并且节点能够同时收发。MRMC 技术显著提升了网络的聚合容量和性能^[9]。

3.2.1 静态信道分配

DING Y 针对传统的冲突图(conflict graph)无法建模 POC 之间干扰的缺陷，创新性地提出了加权冲突图的概念^[10,11]。加权冲突图中边上的权重表示两条链路彼此互不干扰所需要的最小信道间隔，在为链路分配信道时要满足边上的权重要求。信道分配构建的目标是最小化网络中的总干扰链路对数或最小化网络中瓶颈信道上的干扰链路对数。DING Y 使用贪婪算法和遗传算法来求解信道分配问题。贪婪算法是一系列的决策过程，每个决策过

程包括选择和分配 2 个步骤，在选择步骤中根据 $\alpha(s)$ 度量从尚未被分配信道的链路中选择一条；在分配步骤中，为所选择的链路根据 $\beta(c)$ 度量选择一条合适的信道。度量 $\alpha(s)$ 和 $\beta(c)$ 分别由式(5)和式(6)给出

$$\alpha(s) = \sum_{s' \in S_1} \bar{I}_1(s, s') + \sum_{s' \in S_2} \bar{I}_1(s, s') \quad (5)$$

其中，第一项表示链路和网络中其他已经被分配信道链路之间的总干扰；第二项表示链路和网络中其他尚未被分配信道链路之间的总期望干扰。

$$\beta(c) = \sum_{s \in S_1} \bar{I}_1(s, s') \quad (6)$$

由式(6)可知， $\beta(c)$ 取为式(5)中的第一项，即链路和网络中其他已经被分配信道链路之间的总干扰，网络会选择使总干扰最小的信道 c 分配给该链路。

贪婪算法为某链路分配完信道后就不再改变，因此能很快收敛到一个解，但是通常贪婪算法无法达到最优性能。遗传算法的基本思想来源于自然界中生物的选择与遗传演进过程，适应度高的个体更容易存活并遗传到下一代。DING Y 将每条链路的信道分配视为一个 DNA，网络中所有链路的信道分配看成一个个个体，并编码成二进制的字符串。遗传算法首先随机产生一系列个体作为亲代，按照一定原则从中选取亲代个体经过交叉和变异过程产生新的个体。交叉指亲代个体相互交换一部分 DNA 产生后代，变异指以一定概率改变新个体的部分基因，增加多样性。经过多代演进，使得到的最终解逼近最优解。

WANG D S 借用加权冲突图的概念，提出了 POC 下的 POCAM(partially overlapped channel assignment for MRMC-WMN)算法^[12]。该算法根据节点的业务负载确定信道分配的顺序。距离网关越近的链路通常负载越重，在进行信道分配时应给予优先考虑。因此信道分配顺序的确定依据为

$$MRV = H^2 \times x \quad (7)$$

$$RD = \sum_{l \in L} l_w \quad (8)$$

其中， H 表示节点到网关的跳数距离； x 表示节点的剩余可用信道数，利用加权冲突图可以确定 x 值； l_w 指的是冲突图中对应边上的权重。POCAM 算法从 MRV 最小的节点开始选择分配信道的链路，如果有多个链路的 MRV 相同，则使用 RD 来确定信道分配顺序。POCAM 算法还使用回溯的方法，当没

有信道能满足某链路的加权冲突图权重约束时, 算法需要回溯, 记录下回溯的位置 P , 放松约束条件以满足权重约束; 继续向下搜索直到到达搜索树中的叶节点, 之后返回记录的位置; 当回溯次数超过规定值 T 时, 算法终止。最终会选择一个代价最小的解作为最后的信道分配方案。每次回溯对应的代价 $Cost_p$ 由式(9)确定

$$Cost_p = l_r \times \alpha^{H_m - H_i} \quad (9)$$

其中, l_r 表示回溯过程中权重的放松值; α 为惩罚因子, 但是文中并没有给出具体的值或计算方法; H_m 表示距离网关的最大跳数; H_i 表示当前链路距离网关的跳数。

HOQUE M A 创新性地提出了利用干扰矩阵 I-Matrix 进行 POC 下的信道分配, 每个节点都会维持自己的 I-Matrix^[13]。要构建 I-Matrix, 首先需要定义 I-factor, 具体用 $f(i, j)$ 表示

$$f(i, j) = \begin{cases} 0, & d \geq IR(\delta) \text{ 或 } \delta \geq 5 \\ \infty, & d = 0 \text{ 且 } 0 < \delta < 5 \\ IR(\delta)/d, & d < IR(\delta) \text{ 且 } 0 \leq \delta < 5 \end{cases} \quad (10)$$

其中, d 表示使用信道 i 和 j 的 2 条链路之间的欧氏距离, $d=0$ 表示 2 条信道被分配给同一个节点, 这种情况下认为干扰无穷大; $IR(\delta)$ 表示当信道间隔 $\delta=|i-j|$ 时的干扰范围。计算出节点使用的某特定信道与所有 11 条信道之间的 I-factor 就构成了节点的干扰向量 I-vector。另外 I-vector 中包含一个距离项 d_i , 表示使用信道 i 的最近收发信机与当前节点的距离, 当 $d_i=0$ 时表示当前节点使用了这条信道。所有 11 条信道的 I-vector 组合起来就构成了节点的 I-Matrix。文献[13]中还引入了一个门限 Th , 表示收发信机能够容忍的干扰等级, 通常情况下取 $Th=1$ 。在进行信道分配时, 首先根据节点度对各节点进行降序排列, 从度数最大的节点开始进行信道分配。所有节点将其 I-Matrix 内所有值初始化为 0, 对某一条未分配信道的链路, 对其两 endpoint 计算对应于某信道的 I-factor 之和, 选择和最小的信道作为预分配信道。如果预分配信道的 I-factor 和小于门限 Th , 则将预分配信道分配给链路, 否则不为链路分配信道。每次完成一条链路的信道分配后, 所有节点计算自身与新分配信道链路的 endpoint 之间的距离, 计算每条信道对应于新分配信道的 I-factor 并更新。对网络中所有节点重复上述过程, 直到遍历所有节点, 信道分配过程结束。

HOQUE M A 提出的信道分配算法根据节点度确定信道分配的优先顺序, 并不能准确反映网络中负载分布, 容易造成网络瓶颈; 无干扰信道分配不能保证为网络中所有链路分配信道。因此 DUARTE P B F 基于 I-Matrix 提出了一种新的 POC 下的信道分配方法^[14]。DUARTE P B F 在 I-Matrix 中增加新的一列 CoC, 当分配给节点的信道是一条干扰的共信道时, $CoC=1$, 否则 $CoC=0$ 。信道分配分 2 个阶段完成, 第一阶段与文献[13]中的相同, 完成无干扰信道分配; 第二阶段中算法检测到到网关没有路由路径的节点, 为其剩余接口分配与已经连接到网关的邻居节点所使用的相同信道, 以增加一定的共信道干扰为代价换取网络连通性的提升。

DUARTE P B F 采用博弈论方法研究 POC 下的信道分配问题, 提出了 CoCAG(cooperative channel assignment game)算法^[15]。CoCAG 算法使用 I-factor 表示信道之间的干扰度, 将信道分配问题建模成协作博弈问题, 目标是最大化效用函数 $U_i(\Psi)$, 具体如下

$$\max U_i(\Psi) = \max \sum_{i \in A} M_i \quad (11)$$

$$M_i = k \frac{\sum_{j \in C} n_j}{h} \quad (12)$$

其中, k 为连通因子, $k=1$ 表示节点能间接连接到网关, 否则 $k=0$; R 表示数据传输速率; n_j 为信道 j 上的干扰链路数; h 为节点距离网关的跳数。利用博弈论的已有结论证明 CoCAG 是潜在博弈问题及其纳什均衡解的存在, 通过 Better response、Best response 或 Smoothed better response 3 种学习策略能达到最大化效用函数的目标。仿真实验证明合理使用 POC 可以提升网络容量、信道的空间复用和非干扰链路数等, 克服正交信道分配策略的性能缺陷。

静态信道分配的主要优点是链路永久分配或长时间分配一条信道, 因为执行周期较长, 所以复杂性不是其主要考虑的因素; 同时, 这也是它的缺点, 静态信道分配无法有效地适应无线条件及网络中的业务需求变化, 因此无法达到最优性能。当业务需求变化时, 静态信道分配通常需要重新分配信道, 不仅耗时而且可能会改变网络拓扑。

3.2.2 动态信道分配

动态信道分配能根据网络中的业务需求或者干扰的变化改变分配给链路的信道, 能有效地利用

网络中的带宽资源。但是，动态信道分配需要协调机制保证收发两端路由器同时使用相同信道，且目前接口的信道转换时延达到百毫秒级及以上，是不能忽略的。因此时延和协作机制是动态信道分配面临的主要挑战。

SUN W F 提出了一种基于跨层的动态信道分配方法 R-CA(routing-based channel assignment)^[16]。R-CA 算法规定每个节点处都需要产生和维护一张信道信息表，信息表包含通信期望占用的信道 c_{pre} 、通信已经占用的信道 c_{cur} 和数据传输的期望完成时间 t_{pre} 。 t_{pre} 实际上就是数据分组的期望传输时间 ETT(expected transmission time)。当节点有数据分组需要路由时，利用 AODV(ad hoc on-demand distance vector)路由协议中的路由请求 RREQ(routing request)分组携带相关的路由信息、数据分组大小及信道信息表中的 3 个参数。下一跳节点接收 RREQ 分组并将接收到的 c_{pre} 与自身的 c_{cur} 进行比较，如果满足无干扰信道约束，则将 c_{pre} 分配给这条链路，该链路的信道分配结束；否则下一跳节点认为无可信道，这时将接收到的 t_{pre} (这里记为 t_{pre}')与节点自身的 t_{pre} 进行比较，如果 $t_{pre} < t_{pre}'$ ，则通知请求节点通过其他节点路由，否则通知之前的节点等待。这些分配信道或拒绝或等待的信息是通过路由应答(RREP, routing reply)分组应答给上一跳的。当使用 POC 时， c_{pre} 的选择方法：根据链路之间的距离确定互不干扰所需的最小信道间隔 $\Delta(i, j)$ ，然后根据式(13)和式(14)确定是否有满足干扰要求的信道

$$c_{pre} = \max \{ (c_{cur} + \Delta(i, j)) \bmod 11 \} \quad (13)$$

$$c_{pre} - \max \{ c_{cur} \} \geq 5 \quad (14)$$

如果存在满足上述要求的 c_{pre} ，则将其分配给该链路，否则节点认为无可信道并进行后续的 t_{pre} 比较。

当节点有数据要发送时，采用上述方法为节点动态选择信道，数据传输完成后即释放信道，这样有限的信道资源可以在更多节点间共享，从而提升整体网络吞吐量。

但是笔者认为 SUN W F 所提 R-CA 算法中存在两点错误：一是关于 t_{pre} 的比较，算法中的结论和举例中的结论是相悖的；二是关于 POC 下的 c_{pre} 的选择，式(14)的约束使得节点无法选择 POC，最终 R-CA 算法只能分配 3 条正交信道。这里举图 3 所示的例子来说明这个问题。

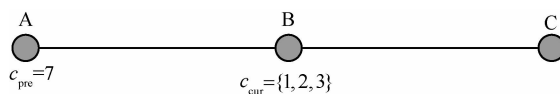


图 3 错误说明

当要求最小的信道间隔 $\Delta(i, j) = 4$ ，节点 B 邻区中当前已占用信道集合 $c_{cur} = \{1, 2, 3\}$ ，节点 A 预占用信道 $c_{pre} = 7$ ，根据式(13)和式(14)计算得出的结论是没有满足无干扰约束条件的信道，但是实际上信道 7 能够满足无干扰约束，因此式(14)应该修改为

$$c_{pre} - \max \{ c_{cur} \} \geq \Delta(i, j) \quad (15)$$

R-CA 算法在有通信需求时临时为链路分配信道，必然会增加通信所要求的端到端时延，文献[16]并未对通信端到端时延问题进行讨论。

3.2.3 混合信道分配

混合信道分配将节点接口分为固定接口和可转换接口。固定接口用于接收数据分组，长期调整到某固定信道上；可转换接口用于发送数据，可以在多条非固定信道间频繁转换。当节点有数据要发送时，将可转换接口调整到接收端的固定信道上即可。混合信道分配兼具静态信道分配和动态信道分配优点，与静态信道分配相比，能更好地适应网络中业务变化；与动态信道分配相比，混合信道分配是在静态接口和可转换接口之间建立链路，信道转换的时延几乎是可以忽略的，降低了信道转换的开销。

LIU Y T 提出了 POC 下的混合信道分配方法 CAEPO(channel assignment exploiting partially overlapping)^[17]。当有数据要发送时，节点将可转换接口调整到接收节点的固定信道上，否则保持在默认信道上以保证相邻节点之间的有效信息交换。CAEPO 算法使用干扰度量 $Interference[i]$ 作为选择信道的标准，具体如下

$$Interference[i] = \sum_{j \in N(i)} olf[i][j] \times B(j) \quad (16)$$

其中， $olf[i][j]$ 表示节点 i 和节点 j 使用的信道之间的重叠度； $B(j)$ 表示节点 j 的繁忙时间比例； $N(i)$ 表示节点 i 传输范围内的节点集合。

信道分配过程分为初始化和更新 2 个阶段。初始化阶段，网络中尚无业务，令 $B(j) = 1$ ，选择使式(16)最小的信道作为节点 i 的固定信道，当所有节点都确定了自己的固定信道后，选择使网络中干扰最小的信道作为默认信道；更新阶段，每个节点周期性地根据式(16)计算为节点分配某信道时所引入的干扰，选择引入干扰最小的信道作为节点的固定

信道, 且分组丢失率不满足最大容忍的分组丢失率要求也会触发干扰的重新计算和信道分配更新。

LIU Y T 在文献[9]中又提出了负载感知的 CAEPO 算法, 即 Load-aware CAEPO。该算法信道分配同样也分为初始化和更新 2 个阶段。初始化阶段固定信道的选择与 CAEPO 相同。更新阶段, 每个节点使用式(17)代替式(16)作为节点 i 信道选择的标准

$$X[i][c] = \sum_{k \in N(i)} (B[i][k] \times X_{\text{self}}[i_c][k]) + \sum_{j \in I(i)} \sum_{l \in N(j)} (B[j][l] \times O[i_c][l]) \quad (17)$$

其中, $B[i][k]$ 和 $B[j][l]$ 表示对应链路的业务负载; $X_{\text{self}}[i_c][k]$ 表示自干扰因子; $O[i_c][l]$ 表示信道重叠度。

为了提升 Load-aware CAEPO 的性能, LIU Y T 进一步在信道分配引入节点分簇的概念, 提出了 Load-aware CAEPO-G 信道分配算法。节点之间通过周期性交换 Hello 消息获知其干扰范围内的邻居节点数, 度数最大的节点自荐成为簇头节点, 周围节点请求加入该簇。信道分配过程的初始化阶段与 Load-aware CAEPO 相同。更新阶段, 每个节点根据式(17)计算出 3 条最好的候选信道, 将其汇报给簇头节点; 簇头节点收集了所有节点的候选信道后广播给簇内所有成员节点; 各成员节点为其他节点的候选信道计算赞同比并报告给簇头节点; 簇头节点为每个节点的候选信道计算总体赞同比, 选择总体赞同比最大的候选信道分配给对应节点的固定接口。

3.2.4 信道分配与其他问题联合

WMN 路由的目的是为网络中给定的源和目的地节点找到满足特定要求的路径, 网络拓扑是进行路由的基础。2 个节点之间存在链路的条件是它们在彼此的传输范围之内并且至少各有一个收发信机接口调整到相同信道上, 因此在 MRMC WMN 中, 网络拓扑是由信道分配决定的。这表明信道分配控制网络拓扑, 进而限制了网络中任意节点之间的可能路由。同时信道分配取决于链路上的业务流负载, 链路负载又是由路由决定的。可见拓扑控制、信道分配、路由、业务流分配是相互依存的一系列伴随问题, 整体研究有利于达到最优网络性能。

现存 WMN POC 下信道分配与其他问题的联合研究主要集中在: 联合信道分配与拥塞控制^[18,19], 联合信道分配、接口分配与调度^[20], 联合拓扑控制与

信道分配^[21], 联合流分配与信道分配^[22,23]。

RAD A H M 联合考虑了 POC 下的信道分配与拥塞控制问题, 提出了 JOCAC(joint optimal channel assignment and congestion control)算法^[18]。JOCAC 算法假设路由器与网关之间的路由路径已经预先确定, 构建出带有链路容量约束的 TCP(transmission control protocol)业务的效用最大化目标函数。提出了信道重叠矩阵, 矩阵中的每个元素 w_{mn} 表示 POC 之间的重叠度。 w_{mn} 的值可以采用离线计算方法获取, 具体计算式为

$$w_{mn} = \frac{A_o}{A_o + A_{no}} \quad (18)$$

其中, A_o 和 A_{no} 分别表示信道 m 和信道 n 的功率谱密度重叠和非重叠部分的面积。定义二进制信道分配向量 \mathbf{X} , 加上 2 个约束条件: ①任意时刻只能为一条链路分配一条信道; ②与同一个节点相连的 2 条链路, 如果共享同一收发信机, 则必须被分配相同信道。满足上述 2 个约束条件的信道分配就是一种可行的信道分配方案。利用二元方法将目标函数转化为求解拉格朗日的稳定点问题, 通过微分算子的线性特性, 将联合问题分解为拥塞控制和信道分配 2 个子问题单独解决。在所有可行信道分配方案中选取能使信道分配目标最小化的向量 \mathbf{X}^* 作为最终的信道分配方案。为了克服集中式信道分配对网络中央控制器的高要求, RAD A H M 提出了 JOCAC 算法的分布式实现, 即 DCACA(distributed congestion-aware channel assignment)算法^[19]。DCACA 算法规定每个节点仅负责向一个链路子集分配信道。选择负责信道分配的节点的原则: 选择链路的两端点中有共享收发信机的一端为链路进行信道分配, 如果 2 个端点均无共享收发信机, 则随机选择其中一端负责该链路的信道分配。各节点本地异步求解目标函数, 将分配的信道广播到网络中, 这样各节点协作完成信道分配。分布式信道分配方法增强了网络的可扩展性, 当网络规模扩大时, 与集中式信道分配方式相比, DCACA 算法的信道分配复杂度更低。

随着网络带宽的增加, 音频、视频、在线游戏等应用逐渐成为网络中的主流业务, 这些应用多数使用 UDP(user datagram protocol), 因此 UDP 成为了网络中业务的重要组成部分^[24]。JOCAC 算法和 DCACA 算法的缺陷是仅考虑了 WMN 中的 TCP 业务, 对 UDP 业务并不适用。

RADAHM 联合考虑信道分配、接口分配和调度问题^[20]。信道分配决定为每条逻辑链路分配哪个信道，接口分配决定为每条逻辑链路分配哪个收发信机接口。信道分配与接口分配问题是相关的，比如共享同一个收发信机接口的两条链路要求运行在相同信道上。文献[20]定义了二进制共干扰矩阵 M ， M 中的每个元素表示两条链路是否彼此干扰，这取决于链路之间的欧式距离和使用信道的信道间隔。如果链路相互干扰则对应的矩阵元素的取值为 1，否则取值为 0。基于信道重叠矩阵和 M ，RADAHM 将联合问题构建为带有约束的最小化瓶颈链路利用率的非线性混合整数规划问题。通过二进制线性化技术可以转化为对等的线性混合整数规划问题，利用解线性混合整数规划的商用软件进行求解。该联合问题构建方法的缺陷在于每对链路都要根据链路之间的欧式距离和信道间隔建立共干扰矩阵 M ，消耗大量内存，计算复杂度高。

NAVEED A 提出了联合解决拓扑控制和信道分配问题的 CoMTaC(cluster-based multipath topology control and channel assignment) 算法^[21]。CoMTaC 算法将拓扑控制和信道分配问题分开考虑。首先构建基于分簇的网络拓扑，然后在构建的网络拓扑基础上使用动态分布式信道分配方法为拓扑中的链路分配信道。网络中的节点根据到网关的距离分成不同簇，每个簇的半径至多为 r 跳。簇内所有节点都有一个公共的默认接口调整到公共信道上，以保证节点间的信息交换；簇边界上的节点要将其一个非默认接口调整到优先级最高的相邻簇的公共默认信道上。CoMTaC 算法还利用 spanner 扩展在基本网络拓扑基础上进一步增强网络连通性。进行信道分配时，CoMTaC 算法首先选择簇内部分节点监测和估计外部干扰源产生的干扰并上报给簇头，簇头选择代价最小的信道作为本簇的默认信道；然后簇头为簇内各节点分配可用信道，使用平均链路层队列长度作为干扰估计值，选择干扰最小的信道分配给节点。CoMTaC 算法的问题在于将拓扑控制和信道分配问题割裂开来考虑。而拓扑控制和信道分配是相互依赖相互影响的，底层网络拓扑是进行信道分配的对象，信道分配又反过来决定某些链路是否存在，因为只有在彼此传输范围内且使用相同信道的节点之间才存在链路。

Vibhav 将信道分配和流分配构建成为带有约束的混合整数线性规划问题 MILP(mixed integer linear

program)^[22,23]。假设网络中存在一种业务分析器能够提供网络中的端到端通信会话的业务需求信息。MILP 的目标是最大化聚合的端到端吞吐量、最小化排队时延。目标函数具体为

$$\text{Maximize} \left(\psi \times \sum_{(i,j,t_{ij})} x_{ij} + (1-\psi) \times \min \left(\frac{f_{e,c}}{l(e)} \right) \right) \quad (19)$$

其中， ψ 是可调参数，用于协调端到端吞吐量和排队时延之间的折中； (i, j, t_{ij}) 是三元组，用来唯一定义通信会话的源、目的端和聚合业务需求； x_{ij} 表示源节点到目的节点路径上的可达吞吐量； $f_{e,c}$ 表示信道分配之前按照最短路径路由给链路 e 分配信道 c 后，链路 e 上的负载； $\left(\frac{f_{e,c}}{l(e)} \right)$ 表示链路利用率。

利用二进制线性化技术将非线性约束条件转化成线性约束，采用搜索解空间方法获得信道分配和流分配的最优解决方案。

4 部分重叠信道多播信道分配

多播通信是一种能同时从一个源节点向多个目的接收端有效传递信息的重要网络服务技术，由于在共有链路上只传输一个信息的副本，因此避免相同的重复传输造成的网络资源浪费，并降低传输的时延。多播有很多重要的应用，比如音频/视频传输、多媒体点播服务、交互式仿真、远程教育、分布式交互游戏等。多播通信中有效的多播架构的构建和合理的信道分配方案能防止网络分割，避免隐藏终端等问题，同时可以优化网络的吞吐量性能。

ZENG G K 首次研究了 POC 下的多播信道分配问题，提出 2 种信道分配算法，即分级信道分配 LCA(level channel assignment) 算法和多信道多播 MCM(multi-channel multicast) 算法^[25,26]。每种算法中都包括多播树构建和为树中的链路分配信道两方面内容。①LCA 算法遍历整个网络，根据节点到网关的跳数距离将节点分成不同的等级。多播树的构建是从多播接收端开始由底到顶寻找父节点，直到父节点是多播树中的树节点。对所有多播接收端重复这个过程，直到所有多播接收端均逐级连接到网关。根据节点等级为树中的链路分配信道，为子节点接收接口分配的信道与父节点的发送接口的相同，第 i 级节点的发送接口分配信道 i 。②MCM 算法节点分级方法与 LCA 算法相同，并取消同级任意 2 个节点之间的链路。多播树构建过程为：选

择父节点数最少节点的父节点作为备选中继节点; 选择备选节点中子节点数最多的节点作为中继节点, 并将其子节点划去, 重复此过程直到所有子节点均被划去, 这样就构成了最后的多播树。对多播树中链路的信道分配有 2 种方法: 一种是升序信道分配, 实现比较简单, 从信道 0 开始, 信道号随节点级数增加而增加, 到达最大信道号后从信道 0 重新开始; 另一种是启发式的信道分配方法, 为节点分配与相邻的中继节点之间的干扰因子平方和最小的信道。干扰因子 δ_i 的定义为

$$\delta_i = \frac{IR(t)}{d} \quad (20)$$

其中, $IR(t)$ 表示当信道间隔为 t 时的干扰范围; d 为信号的传输范围。

MCM 算法可能会引起隐藏信道问题, 并且当有多条信道均满足干扰因子平方和最小的条件时, MCM 算法随机选取其中一条信道分配给链路, 无法使网络性能达到最优; 干扰因子取决于发送功率等, 测量因具体情况而异, 不具有可移植性。因此 NGUYAN H L 对 MCM 进行了改进, 提出 M4 (minimum interference multi-channel multi-radio multicast) 算法^[27]。M4 算法通过考虑两跳范围内邻居使用的信道避免隐藏信道问题, 只使用信道号间隔来衡量干扰, 降低了使用干扰因子的复杂度, 最大化与所有一跳和两跳传输邻居之间的信道间隔。具体的目标函数 $F(c)$ 为

$$F(c) = \frac{\prod_{w \in N^0(v)} |c - c_w|}{\max_{i \in N^1(v)} \{c - c_i\} / \min_{j \in N^2(v)} \{c - c_j\}} \quad (21)$$

其中, $N^0(v)$ 表示节点 v 已经被分配了信道的所有一跳和两跳邻居集合; c_w 、 c_i 和 c_j 分别表示节点 w 、 i 和 j 所使用的信道; c 是分配给节点 v 的信道。选择使目标函数最大的信道 c 分配给节点 v 。

上述多播信道分配算法在进行信道分配时仅考虑干扰的影响, 没有考虑节点的负载。理论上来说, 负载越重的节点, 信道分配的优先级应该越高。YANG W L 提出了基于回溯和最优搜索的 BBF (backtracking and best-first search) 多播信道分配算法^[28]。BBF 算法按照由底到顶的方式递归计算每个节点的负载, 即节点服务的多播用户总数。负载最高的节点具有信道分配的优先权, 即最优搜索 (best-first search)。BBF 算法定义了一个链表, 其中

每条链路都有对应的候选信道集合, 候选信道集合包含可以分配给此链路的所有无干扰信道。所谓无干扰信道指的是与多播树中所有已经分配了信道的链路都满足无干扰要求的信道。如果存在这样的候选信道集合, 则将集合中的第一个元素分配给链路; 否则 BBF 算法需要进行回溯, 从链表头开始查找第一条包含这个节点的链路, 改变分配给这条链路的信道, 使得可以为预分配信道的链路分配一条无干扰信道。BBF 算法的性能受到最大允许的回溯次数限制, 可能存在达到最大允许的回溯次数, 但是某些链路仍未分配信道的情况。这种情况会影响网络的连通性, 因此应采取有效方法以进一步增强网络连通性。

TAN X B 等在文献[29]中以最小化总的链路数和总的链路干扰数为目标, 建立 0-1 整数规划模型 IBIP (improved-based binary integer programming) 联合考虑多播树构建与信道分配问题, 考虑目标节点也可能转发数据分组, 以及节点收、发数据分组只要不同时进行就可以使用同一信道等情况, 并解决了 MRMC WMN 中的隐藏信道问题。

5 部分重叠信道分配的难点与研究趋势

5.1 部分重叠信道分配中的难点

通过上节 WMN POC 下的信道分配研究相关综述可知, POC 下的信道分配经历了从单播到多播、从静态到动态和混合、从纯信道分配到联合问题的求解过程。虽然这一领域的研究取得了长足的进步, 但仍有很多值得探讨和改进之处, 具体包括以下 5 个方面。

1) 信道分配问题构建在多个假设条件基础上。大多数信道分配算法都假设 WMN 的网络拓扑给定、路由路径给定(路由路径一般是使用最短路径算法来确定), 并且网络中存在业务分析器, 能够预先知道链路的负载, 或直接给定链路的业务负载。这实际上确定了需要被分配信道的链路集合, 更重要的是对于使用业务负载作为信道分配优先级依据的信道分配算法来说, 相当于确定了链路被分配信道的优先级。信道分配的任务就是在给定的这些条件下沿着流的路径计算一种信道分配和链路调度以完成负载的传递。实际网络中链路的负载是很难预先知道的, 并且当链路业务负载变化时信道分配方案可能已经不适用, 需要重新进行信道分配。少数信道分配算法考虑到网络中动态业务的存在, 即

连接请求有动态的源、目的地和到达时间,使用文献[30]提出的邻居—接口绑定确定出网络拓扑。但是文献[30]中网络拓扑的确定是通过构建以网关为根的树实现的,主要服务于 Internet 导向性业务,并且当每个节点配置的接口数超过 2 时,这种网络拓扑确定方法已经不适用。WMN 中 Internet 导向性业务与客户端导向性业务并存,因此研究动态业务需求下更普适的网络拓扑和信道分配问题对提升网络整体服务能力具有重要意义。更重要的是,如前所述拓扑、路由、流分配等是相互依赖、相互影响的,因此在假定其他条件已经确定前提下单独研究信道分配问题或信道分配与另一个问题的联合都无法使网络性能达到最优。

2) 目前的信道分配算法没有考虑节点发送功率的影响。由信息论香农公式可知链路容量与节点发送功率有关,其关系由式(22)给出^[31]

$$c_l(P, \Theta, X) = \frac{1}{T} \times \log(1 + K \times SINR_l(P, \Theta, X)) \quad (22)$$

式(22)表明链路的容量与发送功率 P 、节点位置 Θ 及信道分配 X 有关。其中, T 表示符号周期; K 为常数, K 的值取决于使用的调制机制; $SINR_l$ 为信号干扰噪声比。目前研究 POC 下信道分配的文献均假设网络中所有节点的发送功率为相同的常量值,而实际条件下节点会按需调整发送功率。发送功率改变时,链路容量、干扰等都会发生改变,需要予以捕捉。

3) 由于信道分配本身是 NP 难问题,目前 MRMC 中使用线性规划方法得到的是网络容量的上界,使用启发式算法得到的是网络容量下界^[30],因此对有效的信道分配问题求解方法的研究也是必要的。

4) LIU X 提出了与之前研究 POC 下信道分配问题所证明的网络吞吐量性能极大提升相反的观点,基于物理干扰模型联合构建了路由、信道分配和链路调度问题,提出了一种有效的基于列生成方法获取联合问题的最优解^[32]。得出的结论是:与使用正交信道分配相比,使用 POC 能提升网络性能,但是获取的性能增益是边缘化的,分配额外的信道导致的复杂度增加可能与之相抵消。LIU X 认为产生性能差异的主要原因是使用的干扰模型不同,之前的 POC 下信道分配问题研究要么采用简化的协议干扰模型及其变体,这种干扰衡量实质上是二进制形式的;要么使用门限(捕捉)模型,采用与物理模型相似的形式,但是考虑的是成对链路之间的干

扰,无法准确描述网络中干扰的加性特性。门限模型的形式具体如下

$$\frac{P_l \times G_{ll}}{N_0 + I_{l'} \times P_{l'} \times G_{l'l}} \geq \beta_l \quad \forall l, l' \in \zeta \quad (23)$$

其中, P_l 为链路 l 的发送功率; $I_{l'} = I(h_{l'}, h_l)$ 是链路 l 和 l' 使用的信道相关的干扰因子 I-factor; N_0 为热噪声; $G_{l'l}$ 为链路 l' 的发送端到链路 l 的接收端的信道增益; β_l 表示为保证信号的正确接收所要求的最小 SINR 门限值。实际上干扰是具有叠加效应的,因此实际的干扰模型应为

$$\frac{P_l \times G_{ll}}{N_0 + \sum_{l' \in \zeta \setminus \{l\}} I_{l'} \times P_{l'} \times G_{l'l}} \geq \beta_l \quad \forall l \in \zeta \quad (24)$$

虽然 LIU X 得出了使用 POC 信道分配获得的性能提升是边缘化的结论,但是业界研究者普遍认为 POC 的使用可以增加网络中信道多样性,尽量避免为相邻链路分配相同信道。随着认知无线电和软件定义无线电的发展,POC 的干扰控制问题能够得到有效解决。节点可以根据自身观察到的干扰动态选择信道,从而增加网络中的并行传输数,提升网络的整体吞吐量性能。为了证明 POC 具有极大提升网络吞吐量性能的潜力,笔者认为需要在准确的物理干扰建模基础上重新研究 POC 下的信道分配问题,对 POC 在网络性能提升方面的潜力进行有效评估。

5) 目前 POC 下的多播信道分配一般只考虑干扰/服务的用户数,但是影响信道分配的因素还有很多,比如带宽、时延等。

5.2 部分重叠信道的研究趋势

POC 除在信道分配领域的重要应用外,在其他领域也有提升网络性能的空间,比如:路由度量、虚拟网络等。本文对 POC 的可能研究趋势进行了展望,具体包括以下 4 个方面。

1) 多播

随着通信技术的不断发展,通信网络带宽处理能力的提高使得网络能够提供很多的多媒体应用。这些应用对网络提出了多播要求,多播在 WMN 中的重要性日益凸显。但是相对于单播来说,多播的研究未受到广泛关注,尚处于初始阶段,尤其是在 POC WMN 中。目前对于 POC 下的多播信道分配主要考虑的是单流网络场景并且采用集中式的信道分配方式,但是更实际的情况是多条流并存于网络,一条流的传输会受到相邻流的干扰影响。集中

式信道分配方式对中心节点处理能力要求很高, 尤其是当中心节点是网关时, 加重负担可能会造成网络瓶颈。当有节点加入、离开多播组或有链路失效时都需要重新进行信道分配, 网络可扩展性差。因此为克服集中式信道分配的上述问题, 可以研究 POC 下分布式多播信道分配方案, 使网络的健壮性和扩展性更好。多播路由问题一直以来都是多播研究领域中的重要问题, 信道分配对 MAC 层多播的可行传输速率总和以及传输的干扰度有重要影响, 从而影响满足业务需求的多播路由。同时, 多播路由为每个节点确定业务流, 也会影响到信道分配。信道分配与多播路由之间的相互联系使得信道分配与路由问题应该采用联合方式同时解决, 但是目前大多数文献对于多播中的信道分配和多播路由是分开考虑的, 很难达到多播性能的最优化。各种多播应用有不同的服务质量 QoS(quality of service)需求, 比如时延、时延抖动、带宽、分组丢失率等, 在进行信道分配时应尽量满足业务的 QoS 需求。因此, 笔者认为 POC 下的多播未来研究方向包括多流并行下的信道分配研究、分布式信道分配、联合多播路由与信道分配、考虑应用的信道分配等。

2) POC WMN 中路由度量问题研究

目前 WMN 中路由度量都是在正交信道假设下提出的, 当使用正交信道时对干扰的衡量比较简单, 即干扰范围(是个常值, 通常取传输范围的 2 倍)内使用相同信道的链路之间彼此干扰, 正交信道之间完全没有干扰。

当使用 POC 时, 干扰范围不再是个常量, 而是取决于链路之间的欧式距离和链路使用的信道之间的信道间隔, 信道之间不再是完全无干扰的, 干扰程度与信道之间的重叠程度有关。因此需要对干扰的衡量做出调整, 包括干扰范围的确定、流内干扰、流间干扰的建模等, 提出能准确捕捉 WMN 特性的 POC 路由度量, 为 POC WMN 中业务的有效路由提供依据。对于信道之间的重叠度, 可以借用文献[3]中 MISHRAA 的经验测量方法获得, 这也是当前研究中主要采用的方法。但是测量值取决于实际网络场景, 比如发送功率等。因此笔者认为可以使用分析方法离线计算信道之间的重叠度 pd_{mn} , pd_{mn} 用两条信道之间的功率谱密度重叠面积与总面积(总面积为功率谱密度重叠和非重叠面积之和)的比值来表示。 pd_{mn} 的具体表达式为

$$pd_{mn} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} PSD_m(f) \times PSD_n(f - \tau) df}{\int_{-\infty}^{+\infty} PSD_m^2(f) df} \quad (25)$$

$$IR(\tau) = pd_{mn} \times IR \quad (26)$$

$$\tau = |m - n| \quad (27)$$

其中, $PSD_m(f)$ 表示信道 m 的功率谱密度; $IR(\tau)$ 表示信道间隔为 τ 时的干扰范围; IR 表示同信道时的干扰范围。

基于计算得到的 pd_{mn} 可以计算出某信道间隔下的干扰范围, 根据干扰范围和链路之间的欧式距离, 可以使用改进的协议或物理干扰模型来建模链路之间的干扰。改进的协议干扰模型使用二进制变量表示链路之间是否存在干扰, 当链路之间的欧式距离不小于干扰范围时则认为是无干扰的, 令变量值为 0; 否则令变量值为 1。具体如下

$$Protol - Interference(i, j) = \begin{cases} 0, & d(i, j) \geq IR(\tau) \\ 1, & d(i, j) < IR(\tau) \end{cases} \quad (28)$$

其中, $d(i, j)$ 表示链路 i 和 j 之间的欧式距离; $IR(\tau)$ 表示信道间隔为 τ 时的干扰范围。

改进的物理干扰模型仍使用原始物理干扰模型的形式, 但是干扰除了取决于距离导致的路径损耗外还与信道之间的重叠度有关, POC 干扰相比于同信道干扰更小。物理干扰模型更接近实际, 因此在物理干扰模型下研究 POC 信道分配问题, 设计有效信道分配机制保证在低的设计复杂度下提升网络性能是未来 POC 信道分配问题的研究点。改进的物理干扰模型由式(29)给出

$$Physical - Interference(v) = \frac{G_u \times PL_{uv}}{N + \sum_{k \in IR(v)} pd_{mk} \times G_k \times PL_{kv}} \quad (29)$$

其中, G_u 表示节点 u 的发送功率; PL_{uv} 表示由于路径损耗导致的信号下降比率; N 表示背景噪声; pd_{mk} 表示信道 m 与信道 k 之间的信道重叠度。

当前路由度量研究主要是基于单播路由的, 对多播路由度量研究很少。由于单播和多播在 MAC 层对数据分组的处理方式不同, 为单播提出的路由度量并不适用于多播业务。研究多播路由度量, 尤其是 POC 下的路由度量, 为多播树中数据分组的有效传输选择合适的路径对提升多播性能具有重要作用。

3) POC 信道分配与拓扑控制、路由、流分配等问题的联合考虑

在 WMN 中,任意 2 个节点要彼此通信需要满足 2 个条件:①节点在彼此的传输范围内;②它们各自至少有一个接口要使用相同信道。数据分组的路由路径是由从源到目的节点的一系列链路组成的,信道分配决定了节点之间是否存在链路,也就决定了分组的可选下一跳集合及各链路之间的干扰度,路由采用的度量尤其是干扰感知路由度量受信道分配影响很大。反过来,当源和目的节点之间的路由路径确定时,各链路上的负载也随之确定,信道分配尤其是负载感知信道分配受路由影响很大,它们的作用是相互的。但是目前大多数 POC 下的信道分配均假设路由是预先确定的,一般使用最短路径方法确定。从路由度量方面的研究结论可知,最短路径路由算法是为传统的 ad hoc 网络设计的,WMN 在很多方面都区别于 ad hoc 网络,最短路径路由算法在 WMN 中的性能并不理想,尤其是在 MRMC WMN 中。在这种非优路由算法确定的路径负载下研究信道分配很难使网络性能达到最优。因此,应该联合考虑信道分配、路由问题,最大化网络性能提升。

拓扑控制是在原始物理图基础上,在维持拓扑的某些全局性质前提下,通过排除产生冲突可能性较大的链路得出原始物理图的一个子图。链路调度、信道分配、路由等均会受到拓扑控制形成的网络拓扑的影响。目前大多数 POC 下的信道分配算法中,拓扑控制问题一般在向收发信机接口分配信道时隐含解决,这会导致当信道分配变化时某些链路不存在,可能会引起使用这些链路的流中断、重新路由等问题^[22],尤其是在动态信道分配过程中这个缺陷更突出。另外,功率控制决定向各个节点分配发送功率等级,从而影响网络拓扑。目前多数 POC 下的信道分配算法均假设功率是恒定的,以最大发送功率来传输,无法有效适应网络中业务需求和无线条件的动态变化,因此通常取得次优网络性能。

通过上述分析,POC 下的信道分配与路由、拓扑控制等问题都是相互关联的。假设其中某部分已经确定研究其他问题可能无法使网络性能达到最优。但是每个问题本身都是 NP 难的,联合考虑难度很大,如何解决网络性能与问题求解复杂度之间的平衡是未来联合信道分配与拓扑控制、路由、流分配问题的研究方向。

4) 网络虚拟化

虚拟网络是目前业界研究的热点,WMN 虚拟化是一种经济弹性的使物理网络能同时支持多个虚拟网络的方法。虚拟网络通过公共 WMN 基础设施为用户定制专用的接入网络,满足用户多样化的端到端需求或安全需求^[33]。网络虚拟化研究中的一个主要的挑战是虚拟网络内嵌问题,即虚拟节点和虚拟链路向物理节点和物理链路的有效映射问题。虚拟网络内嵌的一个基本原则是当同一个物理 WMN 中有多个虚拟网络共存时,一个虚拟网络的活动不应影响到其他虚拟网络,反之亦然。因此各虚拟网络之间必须至少在一个域上相互分离。目前已有关于有线网络中的虚拟网络内嵌解决方案的相关研究。但是 WMN 的特性使虚拟网络内嵌独具挑战,与有线网络解决方案不同,WMN 中端用户直接根据物理位置连接到最近的 Mesh 路由器,因此节点映射问题是部分确定的。但是无线链路的广播特性使得链路映射需要考虑多址接入技术,并相应地为每个虚拟网络分配资源以保证虚拟网络的独立性。传统 WMN 中有限数量的正交信道很难满足虚拟网络内嵌的原则,因此考虑使用 POC 实现虚拟网络内嵌。合理分配 POC 能够增加系统的信道多样性,允许更多的并行传输,提升各虚拟网络之间的隔离度。虚拟化将是 POC WMN 一个崭新的研究方向。

6 结束语

POC 的使用能极大提升 WMN 的信道空间复用和频谱效率,增加网络中的并行传输数和吞吐量。根据通信方式不同,POC 下的信道分配可以划分为单播信道分配和多播信道分配。目前,对于 POC 多播信道分配的研究尚处于初始阶段,多播树的构建仅考虑了干扰和服务用户数因素;对于 POC 单播信道分配的研究均假设路由和拓扑确定,由于未考虑路由、拓扑、信道分配等的相互作用,信道分配通常无法使网络达到最优性能。本文综述了 WMN 中 POC 下的信道分配研究进展和亟待解决的问题,以期探索利用 POC 降低甚至消除网络中干扰的方法,促使 WMN 克服容量瓶颈并向“最后一公里”接入的理想解决方案演进。

参考文献:

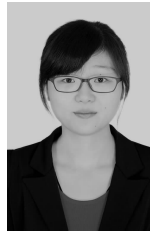
- [1] PATHAK H P, DUTTA R. A survey of network design problems and

- joint design approaches in wireless mesh networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, 13(3): 396-428.
- [2] AKYILDIZ F I, WANG X D. A survey on wireless mesh networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2005, 43(9): 23-30.
- [3] MISHRA A, ROZNER E, BANERJEE S. Exploiting partially overlapping channels in wireless networks: turning a peril into an advantage[A]. *Proceedings of the 5th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurement*[C]. 2005. 311-316.
- [4] MISHRA A, SHRIVASTAVA V, BANERJEE S. Partially overlapped channels not considered harmful[A]. *SIGMETRICS Perform*[C]. 2006.
- [5] FENG Z H, YANG Y L. How much improvement can we get from partially overlapped channels[A]. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*[C]. Las Vegas, 2008. 2957-2962.
- [6] LIU H P, YU H, LIU X. Scheduling multiple partially overlapped channels in wireless mesh networks[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. Glasgow, Scotland, 2007. 3817-3822.
- [7] LI Z R, WANG W M, LUO H Q. Dynamic partial overlapping channel assignment based on traffic load[A]. *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*[C]. Los Angeles, CA, 2009. 534-537.
- [8] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUH T. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. *SIG-Mobile Computer Communications*, 2005, 8(2): 50-65.
- [9] LIU Y T, VENKATESAN R, LI C. Load-aware channel assignment exploiting partially overlapping channels for wireless mesh networks[A]. *IEEE Global Telecommunications Conference*[C]. Miami, FL, 2010.
- [10] DING Y, HUANG Y, ZENG G K. Channel assignment with partially overlapping channels in wireless mesh networks[A]. *Proceedings of 4th Annual International Conference on Wireless Internet*[C]. Brussels, Belgium, 2008.
- [11] DING Y, HUANG Y, ZENG G K. Using partially overlapping channels to improve throughput in wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(11): 1720-1733.
- [12] WANG D S, LV P, CHEN Y W. POCAM: partially overlapped channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[A]. *11th International Symposium on Communications and Information Technologies*[C]. Hang Zhou, China, 2011. 188-193.
- [13] HOQUE M A, HONG X Y, AFROZ F. Multiple radio channel assignment utilizing partially overlapped channels[A]. *IEEE Global Telecommunications Conference*[C]. Honolulu, HI, 2009. 4737-4743.
- [14] DUARTE B. F. P, FADLULLAH M Z, HASHIMOTO K. Partially overlapped channel assignment on wireless mesh network backbone[A]. *IEEE Global Telecommunications Conference*[C]. Miami, FL, 2010.
- [15] DUARTE B F P, FADLULLAH M Z, VASILAKOS V A. On the partially overlapped channel assignment on wireless mesh network backbone: a game theoretic approach[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2012, 30(1):119-127.
- [16] SUN W F, FU T, XIA F. A dynamic channel assignment strategy based on cross-layer design for wireless mesh networks[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2012, 25(9):1122-1138.
- [17] LIU Y T, VENKATESAN R, LI C. Channel assignment exploiting partially overlapping channels for wireless mesh networks[A]. *IEEE Global Telecommunications Conference*[C]. Honolulu, 2009. 5624-5628.
- [18] RAD A H M, WONG W S V. Joint optimal channel assignment and congestion control for multi-channel wireless mesh networks[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. Istanbul, Turkey, 2006. 1984-1989.
- [19] RAD A H M, WONG W S V. Congestion aware channel assignment for multi-channel wireless mesh networks[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(14):2502-2516.
- [20] RAD A. H M, WONG W S V. Partially overlapped channel assignment for multi-channel wireless mesh networks[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. Glasgow, Scotland, 2007. 3770-3775.
- [21] NAVEED A, KANHERE S S, JHA K S. Topology control and channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks[A]. *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems*[C]. Pisa, Italy, 2007. 304-312.
- [22] BUKKAPATANAM V, FRANKLIN A A, MURTHY C S R. Using partially overlapped channels for end-to-end flow allocation and channel assignment in wireless mesh networks[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. Dresden, Germany, 2009. 4650-4655.
- [23] FRANKLIN A. A, BUKKAPATANAM V, MURTHY C S R. On the end-to-end flow allocation and channel assignment in multi-channel multi-radio wireless mesh networks with partially overlapped channels[J]. *Computer Communications*, 2011, 34(15): 1858-1869.
- [24] SCIPANIDKULCHAI K, MAGGS B, ZHANG H. Analysis of live streaming workloads on the Internet[A]. *2004 Internet Measurement Conference*[C]. Taormina, Italy, 2004. 41-54.
- [25] ZENG G K, WANG B, DING Y. Multicast algorithm for multi-channel wireless mesh networks[A]. *15th IEEE International Conference on Network Protocols*[C]. Beijing, China, 2007. 1-10.
- [26] ZENG G K, WANG B, DING Y. Efficient multicast algorithms for multi-channel wireless mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2010, 21(1): 86-99.
- [27] NGUYEN H L, NGUYEN U T. Minimum interference channel assignment for multicast in multi-radio wireless mesh networks[A]. *International Wireless Communications and Mobile Computing Confer-*

ence[C]. Crete Island, 2008. 626-631.

- [28] YANG W L, HONG W T. Backtracking and best-first based channel assignment strategy for multicast in multi-radio wireless mesh networks[A]. 2011 International Conference on Multimedia Technology[C]. Hangzhou, China, 2011. 2984-2987.
- [29] TAN X B, WEN H, XIONG H. Channel assignment strategy in multi-channel multi-radio wireless mesh networks based on improved binary integer programming[A]. Proceedings of 31st Chinese Control Conference[C]. Hefei, China, 2012. 6550-6555.
- [30] RANIWALA A, CHIUEH T. Architecture and algorithms for an IEEE 802.11 based multi-channel wireless mesh networks[A]. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, Anchorage[C]. Alaska, 2001. 2223-2234.
- [31] PROAKIS J. Digital communications[M]. New York: McGraw-Hill Science, 2000.
- [32] XIANG L, LUO J. Joint channel assignment and link scheduling for wireless mesh networks: revisiting the partially overlapped channels[A]. 21st Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications[C]. Istanbul, Turkey, 2010.2063-2068.
- [33] LV P, WANG X D, XU M. Virtual access network embedding in wireless mesh networks[J]. Ad Hoc Networks, 2012, 10(7):1362-1378.

作者简介:



王继红 (1986-), 女, 辽宁营口人, 吉林大学博士生, 主要研究方向为无线 Mesh 网络技术, 具体包括: 信道分配、路由、功率控制等。



石文孝 [通信作者] (1960-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线资源管理技术、Mesh 网络技术和光无线通信。E-mail: swx@jlu.edu.cn。

李玉信 (1989-), 男, 吉林九台人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为无线 Mesh 网络路由协议。

金凤 (1990-), 女, 内蒙古扎兰屯人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为无线 Mesh 网络信道分配。

王春悦 (1971-), 女, 河北乐亭人, 博士, 吉林大学副教授, 主要研究方向为信号与信息处理。