

多信道无线 Mesh 网络信道分配算法

彭利民^{1,2}, 刘 浩¹

(1. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510641; 2. 广州体育学院 计算机应用教研室, 广州 510500)

(penglm86@126.com)

摘 要:针对无线 Mesh 网络的网络容量优化问题,通过对无线链路的干扰进行量化,利用整数线性规划公式对信道分配进行描述;在信道分配时,应用目标函数对信道分配进行优化,减少网络总的干扰权重,并在此基础上提出一个信道分配的启发式算法。仿真结果表明,该算法能提高网络的吞吐量。

关键词:无线网状网;信道分配;干扰;整数线性规划;均匀流量

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A

Channel assignment algorithm in multi-channel wireless mesh networks

PENG Li-min^{1,2}, LIU Hao¹

(1. School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;

2. Computer Application Teaching Department, Guangzhou Sports University, Guangzhou Guangdong 510500, China)

Abstract: Concerning the optimization problem of network capacity in the wireless mesh networks, this paper quantified interference of wireless link, and formulated the channel assignment as integer linear program, then proposed a channel assignment heuristic algorithm by using objective function for optimizing channel assignment in order to minimize the overall network interference weight while assigning channels to wireless communication links. Simulation results show that network throughput can be improved significantly by the proposed algorithm.

Key words: Wireless Mesh Network (WMN); channel assignment; interference; integer linear program; uniform traffic

0 引言

随着移动通信技术的发展,传统的无线接入方式面临接入带宽不足、服务质量得不到保证,难以适应灵活多变的业务状况^[1]等问题。无线网状网(Wireless Mesh Network, WMN)是一种由网状分布的无线节点构成、通过节点自动发现、网络拓扑自动维护和多跳路由转发、实现节点间互连的网络技术。WMN不但具有分布式自组织的网络特征,而且还可以利用多种通信手段(如 IEEE 802.11, WiMax, ZigBee 等)为用户提供高速率的接入方式,从而解决无线宽带接入面临的严重问题^[2]。

许多文献对 WMN 的网络性能进行了深入的研究,文献[3]通过分析信道分配的关键问题,给出了信道分配与路由的相互关系,提出了一个最大化网络吞吐量启发式算法,文献[4]在网络业务流量均匀分布的情况下,基于无线信道的冲突图模型,利用顶点着色的 Tabu 搜索算法和最大 K 度切割算法,研究了 WMN 的信道分配问题,文献[5]联合逻辑拓扑设计、接口分配、信道分配和路由四个问题,使用 TiMesh 结构研究了 WMN 的网络容量问题。文献[6]通过建立 WMN 的冲突图模型,按照 WMN 中节点的干扰权重大小,为每个节点设置不同的优先级,并以此进行信道分配。由于 WMN 的无线信道是共享信道,节点之间的通信存在竞争,同一信道在其邻近区域存在干扰,因此,在进行信道分配时,必须考虑无线链路之间的相互影响。本文在已有研究的基础上,通过分析多信道 WMN 的特点,假定业务流量均匀分布的状态下,借助无

线网络协议层干扰模型,对无线链路的干扰进行量化,提出一个减少链路干扰的信道分配启发式算法,达到了提高网络吞吐量的目的。

1 WMN 符号描述及定义

WMN 由网状分布的无线节点构成, $K(u)$ 表示节点 u 可用的网卡数, $C(u)$ 表示节点 u 可用的信道, WMN 可用的信道数为 $|C|$, 假定网络中所有节点的发射功率均相等,其发射距离 γ_T 以及相应的干扰距离 γ_I 也均相等。

定义 1 WMN 的物理拓扑 $G(V, E)$ 。

其中, V 表示 WMN 所有节点集合, E 表示 WMN 中所有的无向边集合, 对于节点 m, n , 其中 $m, n \in N$, 如果 n 在 m 点的通信范围内, 即 $D(n, m) \leq \gamma_T$, 则顶点 m 和 n 之间存在无向边, 即: 如果存在一条边 $e_{mn} \in E$, 则当且仅当 $e_{nm} \in E$ 。

定义 2 WMN 的虚拟拓扑 $G_A = (V, E_A)$ 。

其中, V 表示 WMN 所有节点集合, E_A 表示 WMN 中所有的通信链路集合, 当网络信道分配完成后, 如果 WMN 中的节点 u, v 使用信道 c 建立了通信, 其中, $e_{uv} \in E$, 那么则存在通信链路 $e_{u,v}^c$ 。

定义 3 链路 e “潜在的” 干扰度 $PI(e)$ 。

根据 WMN 的协议层干扰模型^[3], 如果 $G(V, E)$ 上存在两条边 $m \leftrightarrow n \in E$ 和 $p \leftrightarrow q \in E$, 且 $\min\{d(m, p), d(m, q), d(n, p), d(n, q)\} \leq R_I$, 那么就称这两条边为“潜在的” 干扰边, 根据此定义, 我们使用 $N(e)$ 表示所有和链路 e 存在“潜在的” 干扰的链路集合, 则链路 e 的“潜在的” 干扰度为

收稿日期: 2009-01-13; 修回日期: 2009-03-11。 基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(05011896)。

作者简介: 彭利民(1976-), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向: 无线网络、并行计算; 刘浩(1977-), 男, 湖南邵阳人, 博士研究生, 主要研究方向: P2P、并行计算。

$|N(e)|$ 。

定义 4 链路 e 的干扰权重 $IW(e)$ 。

当 WMN 信道分配完成后,无线链路之间的干扰也相应确定,因此,我们使用 $\varphi(e)$ 表示所有和链路 e 存在干扰的链路集合,其中, $\varphi(e)$ 包含链路 e 本身,则链路 e 的干扰权重为 $| \varphi(e) |$ 。

定义 5 节点 u 的信道 c 干扰度 CI_u^c 。

当为节点 u 分配了信道 c 后,节点 u 的信道 c 干扰度也相应确定,即 $CI_u^c = \max \left| \sum_{v \in \text{neigh}(u)} IW(e_{u,v}^c) \right|$, 其中, $e_{u,v}^c$ 表示以节点 u 为端点的链路,也就是说 CI_u^c 为所有 $e_{u,v}^c$ 链路中干扰权重的最大值;当 $e_{u,v}^c$ 表示以节点 u 或 v 为端点链路时,那么 $CI_{u,v}^c$ 表示节点 u 或 v 的信道 c 干扰度。

2 WMN 线性规划描述

在 WMN 中,信道分配后的网络干扰权重越小,则 WMN 的网络容量就越大。下面给出信道分配的整数线性规划变量和公式描述。

2.1 变量

变量 $k(u)$ 表示网络节点 u 的网卡数,其中, $u \in V$; 变量 c 表示信道变量, C 表示当前 WMN 可用的信道数,其中, $c \in C$; 对于节点 u 和信道 c ,我们定义了二元变量 x_u^c , 其中, $x_u^c \in \{0, 1\}$, 当 x_u^c 为 1 时,则表示节点 u 分配了信道 c , 否则,表示没有分配信道 c ; 对于每条链路 e 和信道 c ,我们使用二元变量 y_e^c , 其中, $y_e^c \in \{0, 1\}$, $e \in E$, 当 y_e^c 为 1 时,则表示链路 e 分配了信道 c , 否则,表示没有分配信道 c ; 对于网络中的两条链路 e_1 和 e_2 , 其中, $\forall e_1, e_2 \in E$, 定义一个变量 $z_{e_1, e_2}^c \in \{0, 1\}$, 当 z_{e_1, e_2}^c 为 1 时,则表示路 e_1 和 e_2 分配了信道 c , 否则,表示没有分配信道 c 。

2.2 优化目标

$$\min \xi \quad (1)$$

其中, $\xi = \sum_{e \in E_A} |IW(e)|$, 式(1)使当前 WMN 总的干扰权重最小。

2.3 约束条件

$$\sum_{c \in C} x_u^c \leq k(u) \quad (2)$$

式(2)表示节点 u 使用的信道数必须不大于该节点可用的网卡数。

$$\sum_{c \in C} y_e^c \leq 1 \quad (3)$$

式(3)表示任意一条链路 e 上最多只能分配一个信道。

$$x_u^c + x_v^c \geq y_e^c; e = u \leftrightarrow v, \forall u, v \in V, \forall e \in G_A \quad (4)$$

其中, $e = u \leftrightarrow v, \forall u, v \in V, \forall e \in G_A$, 式(4)表示一条链路分配信道 c 的必要条件是链路的两个端节点同时分配了信道 c 。

$$IW(e) \leq \Omega; \forall e \in G_A \quad (5)$$

其中, $\Omega = \frac{1}{C} \max_{e \in C} |IW(e)|$, Ω 是每条链路 e 在信道分配的干扰权重阈值, 式(5)使 WMN 信道分配完成后, 网络 G_A 上的每条逻辑链路 e 的干扰权重不超过设置的阈值 Ω , 从而使 G_A 上每条链路上的网络带宽容量趋于均衡分布。

3 无线信道分配算法

对于 WMN 的信道分配问题, 目前常用的研究方法是通过路由计算, 预测通过 WMN 上每条链路的流量, 然后基于流量分布进行信道分配, 并通过路由计算与信道分配的迭代算法, 最终使信道分配后的链路带宽接近链路的流量需求, 从而提高 WMN 的网络容量^[6]。WMN 中链路的预期带宽取决于链路的干扰权重^[4], 由于本文基于 WMN 各节点间业务流量均衡分布, 则意味着通过各链路的流量需求基本均等。因此, 在进行信道分配时, 我们通过设置干扰阈值 Ω , 使每条链路的干扰不大于 Ω , 同时使网络总的干扰权重 ξ 最小, 即保证每条链路上分配的带宽尽可能相等, 也使网络总的带宽容量最大。

3.1 算法描述

算法输入: WMN 的物理拓扑 $G(V, E)$; 每个节点 u 可用的网卡数 $k(u)$ 和信道数 $C(u)$ 。

算法输出: 每个节点的信道分配状态。

步骤 1 在 $G(V, E)$ 上计算每条链路 $e_{i,j}$ 的干扰权重 $|IW(e_{i,j})|$, 并利用公式 $\eta = \frac{|IW(e_{i,j})|}{K(i) \times K(j)}$ 对 $G(V, E)$ 中所有的链路 $e_{i,j}$ 按 η 值降序排列, 并依次进行信道分配。

步骤 2 链路 $e_{i,j}$ 按照下列步骤进行信道分配。

1) 如果 $K(i) \neq \emptyset$ 和节点 $K(j) \neq \emptyset$, 且 $C(i) \cap C(j) \neq \emptyset$, 则为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c , 其中, $c \in \{c \mid c = C(i) \cap C(j)\}$ 。如果网络的干扰权重 ξ_{new} 不大于 ξ 且 $I_{e_{i,j}}(c)$ 不大于 Ω , 那么为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c , 同时使 $\xi = \xi_{\text{new}}$, 否则取消链路 $e_{i,j}$ 的信道分配;

2) 如果 $K(i) \neq \emptyset$, 且 $C(i) \cap C(j) \neq \emptyset$, 但是 $K(j) = \emptyset$, 则在节点 j 已经分配的信道中选择一个 CI_j^c 最小的信道 c 分配给节点 i , 即为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c 。如果网络的干扰权重 ξ_{new} 不大于 ξ 且 $I_{e_{i,j}}(c)$ 不大于 Ω , 那么为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c , 同时使 $\xi = \xi_{\text{new}}$, 否则取消链路 $e_{i,j}$ 的信道分配;

3) 如果 $K(i) \neq \emptyset$, 且 $K(j) \neq \emptyset$, 但是 $C(i) \cap C(j) = \emptyset$, 则在已分配的信道中选择一个 $CI_{i,j}^c$ 最小的信道 c 分配给节点 i 和 j , 即为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c 。如果网络的干扰权重 ξ_{new} 不大于 ξ 且 $I_{e_{i,j}}(c)$ 不大于 Ω , 那么为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c , 同时使 $\xi = \xi_{\text{new}}$, 否则取消链路 $e_{i,j}$ 的信道分配;

4) 如果 $K(j) \neq \emptyset$, 且 $C(i) \cap C(j) \neq \emptyset$, 但是 $K(i) = \emptyset$, 则在节点 i 已经分配的信道中选择一个 CI_i^c 最小的信道 c 分配给节点 j , 即为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c 。如果网络的干扰权重 ξ_{new} 不大于 ξ 且 $I_{e_{i,j}}(c)$ 不大于 Ω , 那么为链路 $e_{i,j}$ 分配信道 c , 同时使 $\xi = \xi_{\text{new}}$, 否则取消链路 $e_{i,j}$ 的信道分配。

步骤 3 按照步骤 2 进行信道分配时, 每次都进行了干扰权重的判断, 可能使网络 $G_A(V, E_A)$ 中出现孤立节点。为了使信道分配后建立的网络拓扑 $G_A(V, E_A)$ 是连通的, 则需要依次为孤立节点所有的邻接链路, 按照步骤 2 (无干扰权重约束的条件下) 依次进行信道“预分配”, 然后在其中选择干扰权重 ξ_{new} 最小的邻接链路 $e_{i,j}$ 分配信道, 同时更新网络干扰权重 ξ_{new} 。

步骤4 如果对于 WMN 所有的链路按照上述步骤进行信道分配后,WMN 节点还有可用的网卡,则为这些节点的邻接链路 $e_{i,j}$ 按照步骤2 依次进行信道分配。

步骤5 返回 WMN 节点的信道分配。

3.2 算法说明

MinCI 算法主要根据 WMN 上链路流量分布的特点,通过设置链路干扰阈值 Ω ,使 WMN 链路上的干扰尽可能均匀分布,因而使信道分配后的链路带宽也尽可能相等。另外,在进行信道分配时,MinCI 算法通过使用目标函数值 ξ 对每次信道分配进行评价,使每次信道分配后的网络干扰权重尽可能减少,从而使得网络的带宽容量增大。在对所有链路进行信道分配后,由于 $G_A(V, E_A)$ 中可能出现孤立节点,因此 MinCI 算法对干扰约束进行松弛,使用步骤3 进行信道分配,从而保证了 $G_A(V, E_A)$ 的连通性。

4 仿真实验与分析

4.1 实验说明

采用 NS2 网络仿真工具建立类似文献[6]的仿真场景,搭建 WMN 的仿真环境。每个无线 Mesh 节点的发射距离和相应的干扰距离分别设为 250 m 和 550 m,在 $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ 的场景中随机生成 10 组包含 30 个和 50 个节点的网络结构,每个节点均配置 3 个 NIC,采用 IEEE 802.11a 标准,无线链路的传输速率设为 54 Mbps。为了有效地实施多跳路由,采用 IEEE 802.11 无线局域网的分布式协调功能作为 MAC 层的网络协议,利用 RTS/CTS 机制将数据分组发送到相邻节点,实验采用连续比特速率(CBR)的流量模式,每个数据包的大小为 1024 字节,在每组网络结构下,各业务连接请求均匀地分布在各节点对之间。

4.2 实验结果分析

为了比较本文提出的 MinCI 算法网络性能,结合最小跳步数路由算法,对 MinCI 和文献[6]中 CLICA 算法进行实验。为了比较两个算法在不同网络状态下的网络吞吐量,实验分别在 3 至 12 个信道状态下,对两种节点分布模式进行模拟比较,实验结果如图 1,2 所示。

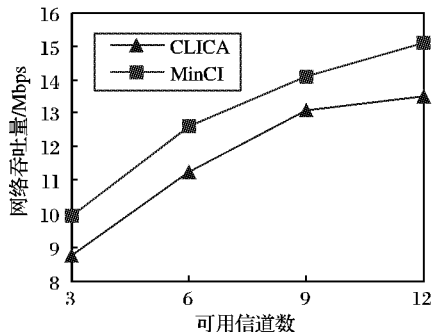


图1 网络吞吐量与信道数(30个节点)

如图1,2所示,随着 WMN 中可用信道数增多,MinCI 算法和 CLICA 算法的网络吞吐量都增大,说明 WMN 中节点可用的信道数越多,WMN 中无线链路之间的干扰越小,从而网络吞吐量也越大。另外,从如图1,2也可以看出,随着节点个数增多,MinCI 算法和 CLICA 算法都呈现网络吞吐量下降的问题,主要原因是在节点增多时,WMN 中链路之间的干扰加

剧,因此,两个算法的网络吞吐量都相应减小。由于 WMN 业务连接请求均匀分布在各节点之间,各链路上的流量需求趋于均匀分布,符合 MinCI 算法分配的链路带宽特点,然而,CLICA 算法在进行信道分配时,没有考虑网络流量的分布特点,使得 WMN 中的某些链路带宽受限,业务请求的平均跳步数增大,链路之间干扰增多,因而 MinCI 算法的网络吞吐量比 CLICA 算法明显增大。

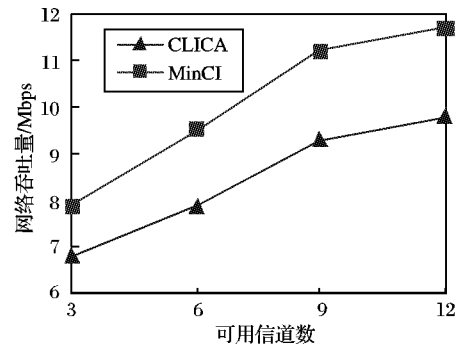


图2 网络吞吐量与信道数(50个节点)

5 结语

本文在协议层干扰模型的基础上,通过对链路的干扰进行定量分析,应用线性规划的公式对信道分配进行描述,使信道分配能适应 WMN 的流量分布特点,减少 WMN 的干扰权重。仿真结果表明,MinCI 较 CLICA 算法能显著提高网络性能。由于 WMN 无中心控制节点,当网络规模变大时,集中式的信道分配算法不再适应,同时,无线网络有别于有线网络,WMN 各层协议之间相互依赖,因此,下一步的工作是根据 WMN 的特点,对 WMN 的分布式算法与跨层优化问题进行研究。

参考文献:

- [1] 杨盘隆,陈贵海. 无线网状网容量分析与优化理论研究[J]. 软件学报, 2008, 19(3): 687 - 701.
- [2] AKYILDIZ I F, WANG XUDONG, WANG WEILIN. Wireless mesh networks: A survey[J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445 - 487.
- [3] AVALLONE S, AKYILDIZ I F. A channel assignment algorithm for multi-radio wireless mesh networks[J]. Computer Communications, 2008, 31(7): 1343 - 1353.
- [4] SUBRAMANIAN A P, GUPTA H, DAS S R, et al. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2008, 11(7): 1 - 15.
- [5] 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 Transaction on Wireless Communications, 2007, 12(6): 4432 - 4440.
- [6] MARINA M K, DAS S R. A topology control approach for utilizing multiple channels in multi-radio wireless mesh networks[EB/OL]. [2008 - 11 - 12]. <http://www.cs.sunysb.edu/~samir/Pubs/broadnets2005.pdf>.
- [7] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUH 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.