

无线 Ad hoc 网络中基于 0-1 优化的两步骤资源分配算法

刘蔚^{1,2} 赵宇¹ 陈锐¹

(中国科学院科技政策与管理科学研究所 北京 100190)¹ (中国科学院大学 北京 100049)²

摘要 为了解决无线 Ad hoc 网络中节点性能随节点个数增加而下降的问题,利用多射频多信道技术(MR-MC)进行资源分配以及减少网络干扰量已成为优化无线网络性能的重要技术手段。在此基础上,提出了一种基于 0-1 规划的网络优化模型和两步骤资源分配算法 TBCA&LS(Tree Based Channel Assignment&Link Scheduling)。该算法利用分簇重组网络结构,通过分析相邻链路干扰关系构建 0-1 优化模型,并在此基础上执行将信道分配和链路调度结合的资源分配算法,减少相邻链路冲突,增加并行传输量,进而达到提升网络吞吐量、优化网络资源分配的目的。最后,在 Matlab 仿真软件中执行两步骤资源分配算法,实验结果表明,与对比算法 CCAS 和仅利用信道分配的算法相比,所提算法可以有效优化网络性能。

关键词 0-1 规划,网络优化,资源分配,信道分配,链路调度

中图分类号 TP393.0 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2017.01.020

Zero-One Integer Programming Based Optimization Model and Two-phase Resource Optimization Algorithm for Wireless Ad hoc Networks

LIU Wei^{1,2} ZHAO Yu¹ CHEN Rui¹

(Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)¹

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)²

Abstract In order to solve the problem that the capability of wireless Ad Hoc networks will decrease with the increase of the number of nodes, the use of multi-radio multi-channel (MR-MC) to distribute resources and reduce the interference among nodes has become an important technical for the wireless network performance optimization. Therefore, we proposed a zero-one integer programming network optimization model and a tree-based channel assignment & link scheduling approach to make that the limited available channels can optimally work and ensure higher capacity increase in wireless Ad hoc networks. Then, we implemented the algorithms in Matlab7.0. The results show that our method performs much better than CCAS and the algorithm which only use channel assignment.

Keywords 0-1 integer programming, Network optimization, Resource allocation, Channel assignment, Link scheduling

1 引言

近年来,随着通信需求的迅速增长,无线网络通信技术发展迅猛,越来越受到工业界和学术界的重视。Ad hoc 网络是一类典型的无线自组织网络,并具有对等多跳性、分布式特性、自组织性等^[1],能够迅速组织成为临时网络。然而,Ad hoc 无线网络自身的特性如无中心控制节点、节点的移动导致网络拓扑快速变化、节点资源和网络带宽受限等问题严重影响了 Ad hoc 无线网络的性能^[2],而利用各种方案对无线网络的有限资源进行管理和优化也成为了当前研究的热点。在这些方案中,优化网络结构和增加并行传输等技术,都被证实是优化资源配置、增加网络吞吐量以及提高传输质量的有效手段^[3]。

在无线网络中,配置多射频多信道(Multi-Radio Multi-Channel, MR-MC)是一种有效的资源优化技术。已有多篇学

术论文证明在无线网络中为节点配置多射频多信道环境,使节点通过转向多条不重叠的信道进行通信,可以显著增加网络容量^[4],其基本原理如图 1 所示。通过转向不同的信道,处于同一传输半径内的节点 A 和 B 可以实现并发传输,使吞吐量加倍。目前,对多射频多信道无线网络的研究主要集中在如何通过优化算法进行有限信道资源的分配,从而达到最大限度地减小链路之间的干扰、增加网络吞吐量的目标^[5-7]。其中,IEEE 802.11a, IEEE 802.11b 以及 IEEE 802.16 等标准协议中都对多射频多信道都做出了相应设定,而在这方面也有大量国内外的研究人员做出了探索和研究。

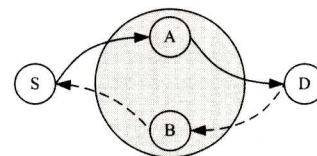


图 1 多信道节点并行传输原理

到稿日期:2015-11-19 返修日期:2016-03-31 本文受国家质检公益性行业专项课题(2015424041)资助。

刘蔚(1986-),女,博士生,主要研究领域为网络优化、战略性新兴产业,E-mail:takashimirai@163.com;赵宇(1982-),男,博士,助理研究员,主要研究领域为数据挖掘、最优化算法,E-mail:zhaoyu.05@163.com(通信作者);陈锐(1975-),男,博士,研究员,主要研究领域为城市运行管理、智慧城市建设,E-mail:chenrui@casipm.ac.cn。

文献[2]分析了利用跨层的设计方法联合优化无线 Ad hoc 网络性能的方法和挑战。文献[5]为了达到改善无线网络性能的目的,提出了基于多路由的跨层信道分配技术,但集中式的信道分配策略增加了算法复杂度。文献[6]提出分析多射频多信道网络的网络性能和调度算法是一项重要的工作,并在此基础上研究了一个将网络节点映射到节点-射频-信道元祖的模型,通过这个构架推导出低复杂度、高吞吐量的最优近似算法。毕坤在文献[8]中围绕如何提高无线网络吞吐率,提出了分布式的信道分配算法以及用于评价静态信道分配算法性能的评价模型。文献[9]设计了一种将可变带宽信道频谱分配和链路调度进行解耦的两层优化算法,但该算法仅适用于可变带宽的网络中,并且启发式算法仅能够达到近似解。邓雪波等^[10]针对信道重叠问题,提出了一种基于最小生成树的信道分配算法。文献[11]则是以网络容量最大化为目标,通过结合频谱协同感知和信道分配算法联合优化网络资源。文献[12]则提出一个综合机制,通过一个联合的分布式算法来联合解决 MR-MC 环境下的信道分配、链路调度以及路由问题。

本文针对无线网络中最关键的资源分配和网络优化问题,提出了一种分簇的多射频多信道 Ad Hoc 网络(MR-MC Ad Hoc)中适用的网络优化模型和信道分配与链路调度相结合的两步骤资源分配方法。首先介绍研究背景;第2节提出基于0-1规划的网络优化模型;第3节介绍基于优化模型的两步骤信道分配和链路调度算法,实现减少信道冲突、增加并发传输、优化网络资源的目的;第4节通过3组实验验证了本文设计的网络优化模型和其相应优化算法的性能。

2 优化模型的建立

根据无线 Ad hoc 网络的特点和网络资源分配的特性,通过最高连接度分簇算法 HCC^[13]将网络划分为逻辑上不交叠的独立簇结构,并在本文作者已有工作基础之上^[14],将原本只考虑了信道分配的规划模型改进为加入链路调度算法的两步骤资源分配算法。首先通过信道分配算法来规划在干扰范围内能够使用同一条信道进行并行传输的链路;然后利用链路调度算法对通信链路进行规划,在无线网络带宽资源有限的情况下合理安排链路活跃程度,进一步优化信道资源分配后网络链路的吞吐量和整体干扰程度。

根据网络模型设定和网络结构优化过程^[14],利用冲突图^[15]和冲突搜索树收集并简化簇内链路干扰信息模式作为网络优化模型的输入信息,建立基于0-1规划的网络优化模型。基本设定如下。

全网共包含 N 个节点,形成 l 条链路;经过网络初始化,全网 N 个节点被划分为 m 个独立簇结构;全网可用信道数目为 $K, k \in K = \{k_1, k_2, \dots, k_K\}$ 是可用的 K 条信道中的任意一条。搜索树结构中所有节点的集合为 $V_T, u, v \in V_T$ 表示其中任意一个节点,所有干扰边的集合为 E_T 。 R 为节点 v 包含的接口数目,并且满足接口约束条件: $R = \min\{(i, j) | l_{i,j} \in v\}$ 。

网络模型变量定义如下:

$X_{v,k} \in \{0, 1\}, X_{v,k} = 1$, 如果节点 $v \in V_T$ 被分配了信道 k , 则有 $X_{v,k} = 1$ 。

$Y_{u,v} \in \{0, 1\}, Y_{u,v} = 1$, 如果边 $(u, v) \in E_T$ 且节点 $u, v \in V_T$ 分配了相同信道, 则有 $Y_{u,v} = 1$ 。

$W_{i,k} \in \{0, 1\}, W_{i,k} = 1$, 如果对于节点 $i \in N$, 信道 $k \in K, u \in E(i)$ 被分配了信道 k , 则有 $W_{i,k} = 1$ 。

$Q_{u,v} \in \{0, 1\}, Q_{u,v} = 1$, 如果 u, v 是同层的节点, 则有 $Q_{u,v} = 1$ 。

M_u : 表示所有和节点 u 处于同一层的节点集合, 其中 $u \in V_T$ 。

$L_{v,k} \in \{0, 1\}, L_{v,k} = 1$, 如果 $v \in V_T, k \in K$ 且节点 v 被调度进行传输。

资源优化的0-1规划网络模型如下:

$$\text{Min } I(f) = \text{Min} \left(\sum_{(u,v) \in E_T} Y_{u,v} \right) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k \in K} X_{v,k} = 1, \forall v \in V_T \quad (2)$$

$$Y_{u,v} \geq X_{u,k} + X_{v,k} - 1, \forall (u,v) \in E_T, \forall k \in K \quad (3)$$

$$W_{i,k} \leq \sum_{v \in E(i)} X_{v,k}, \forall i \in N, \forall k \in K \quad (4)$$

$$M_u = \sum_{v \in V_T} Q_{u,v} \sum_{v \in V_T} Q_{u,v} Y_{u,v} \geq \sum_{M_u} Y_{M_u,k}, \forall u \in V_T \quad (5)$$

$$\sum_{f=1}^k W_{ij} \leq R_i, \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{k \in K} L_{v,k} = 1, \forall v \in V_T \quad (7)$$

$$Y_{u,v} + L_{u,k} + L_{v,k} \geq 1, \forall (u,v) \in E_T, \forall k \in K \quad (8)$$

其中,目标函数式(1)表示网络优化的目标是使网络中干扰量最小化,即通过信道分配和链路调度后使网络中并发传输时产生的干扰链路最少。

约束条件式(2)表示所有搜索树结构中的节点 $\forall v \in V_T$ 都要被遍历一次,保证每一个节点都被分配可用信道。

约束条件式(3)用于描述搜索树结构中两个不同的节点之间的信道关系。例如,当节点 u 和 v 被分配了相同信道的信道时,有 $Y_{u,v} = 1$ 。但对于两个节点,只知道它们之间的信道关系还不足以判断是否存在干扰,还要结合它们的位置关系才能够判定。只有处于同一干扰半径内的两个节点使用相同信道时才会产生干扰关系。

约束条件式(4)描述信道约束条件,即网络拓扑中一个节点所分配的总信道数,其不能多于由该节点组成的链路拥有的信道数。

约束条件式(5)描述搜索树中同层节点之间的分配关系,同层节点可以被分配相同信道。

约束条件式(6)是接口约束条件,即网络拓扑中的每个节点所分配的信道总数不能超过其拥有的射频接口总数。

约束条件式(7)是保证搜索树结构中的每条链路都能够被遍历一次并且都进行链路调度。

约束条件式(8)用来描述节点 u 和节点 v 之间的链路调度结果,即无论节点 u 和节点 v 之间的关系如何,它们之中都应该至少有一条链路被调度。

3 资源分配过程

对于 MR-MC 无线网络的资源分配来说,信道分配和链路调度法则往往是密不可分的。信道分配的结果决定在干扰范围内哪些链路会使用相同的信道进行传输,因此信道的选择会影响链路容量以及链路活性问题。另一方面,链路的使用状况和活跃程度也会成为信道分配时需要考虑的重要因素,进而影响信道分配后网络中产生的干扰效果。因此,本节

将根据 0-1 规划的网络优化模型,利用搜索树结构中的位置关系确立链路之间的干扰关系,执行两步骤信道分配算法和链路调度法则。整个资源优化过程由每个簇结构的算法服务器在簇内独立进行,通过集中分配来减少全网控制负载;而对于全网来说,资源分配过程是分散在各个独立簇结构中进行的分布式算法,符合无线网络的分布式特性。

3.1 信道分配算法的执行

本节根据已建立的基于 0-1 规划的网络优化模型设计一个贪婪的信道分配算法,遍历搜索树结构中的所有节点,并进行自顶向下的信道分配执行过程。如图 2 所示,CL1 搜索树结构中执行了完整的信道分配过程。

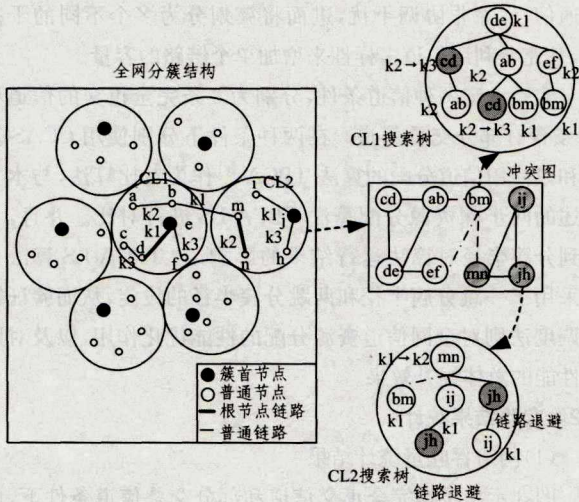


图 2 网络结构优化和资源分配过程图

算法步骤如下:

- Step1 整个信道分配算法的执行过程从搜索树中的根节点开始,按照从顶至底的顺序逐层进行信道分配,每次分配时根据质量参数选取剩余信道中质量最好的一条。
- Step2 按照节点连接度 ID 值的降幂顺序对搜索树中每层节点依次进行信道分配。每个节点的信道分配原则是不能选取与自己直系父节点相同的信道。
- Step3 由于搜索树结构中一个节点会同时与多个节点产生干扰关系,因此当子节点的标记信道与父节点相同时,将 ID 值较小的节点进行信道更新,如 CL1 搜索树中的节点 cd。
- Step4 按 Step1-Step3 的步骤遍历所有节点,直到搜索树结构中的每一个节点都被分配一条可用信道为止。特别地,当干扰半径内已无可信信道时,就从所有信道中选择一条使用次数最少的。

3.2 链路调度法则的执行

在 MR-MC 的网络环境中,总是希望能有更多的节点参与并发传输以达到更高的网络吞吐量和传输效率。但是,无论通过怎样的方法进行信道分割,在同一时间可用的信道数目总是有限的。在实际可操作的条件下在同一时间能够使用的完全正交信道更是寥寥无几。例如在 IEEE 802.11b 可用的 11 条信道中,只有 3 条是完全正交的,而事实证明这 3 条正交信道在物理上也不是完全无干扰的。因此,为了获得更好的资源分配结果,本节将根据网络优化模型执行两步骤相结合的资源分配和优化过程。第一阶段:考虑如何合理地给搜索树中每个节点分配信道,在保证网络连通性的前提下,使得更多的节点能够参与并发传输;第二阶段:考虑

在可用信道数目有限的条件下,如何进行有序的链路调度。在可用信道有限且发生冲突的链路之间执行调度法则,通过牺牲一小部分链路的活跃性,确保全网获得更加稳定的通信质量,并达到资源最优化分配的目标^[16-18]。

链路调度中要用到的变量和参数设定如下:

t 表示一个单位时隙; l_i 表示链路 i 被调度; I_l 表示当前被调度链路的干扰链路集合; $\omega(k, l, t)$ 表示在时隙 t 内使用信道 k 的被调度的链路 l 集合,也即在 t 时刻链路调度算法输出的结果; γ_i 为链路的干扰度; η_i 为链路调度优先权参数,并且有:

$$\eta_i = \alpha * \lambda_i + \beta * \frac{1}{\gamma_i} (\alpha + \beta = 1, \text{并且 } \alpha \leq 1, \beta \leq 1) \quad (9)$$

其中, $\lambda_i = q_i(t) r_i$ 表示队列权重速率,本文默认所有信道上的传输速率相等; $q_i(t)$ 表示在 t 时刻链路 i 上的当前队列长度,该数据可通过 MAC 层获取。并且,调度结果 ω 达到最大的条件是^[19] ω 是完全无干扰的链路调度,并且在该时隙没有任何处于信道 k 上的其他链路可以在不违反接口约束条件和干扰约束条件的情况下被加入到调度结果 $\omega(k, t)$ 中。

链路调度的步骤如下。

(1) 边界链路的标识

边界链路的传输会影响两个甚至多个簇的通信,如果该链路处于“不活跃”状态,就会影响更大范围的链路通信。因此,在链路调度算法执行时,应该首先判断并标记边界链路,同时赋予其最高的链路调度优先权。

(2) 链路干扰程度 γ_i 的判定

设定链路干扰阈值 μ_c 。判断两条链路之间是否存在干扰的依据是:如果搜索树结构中直系父子关系的节点间干扰值超过额定阈值 μ_c ,则这两个节点分配的信道之间存在干扰。这正是由于实际网络中可用正交信道数目有限而造成干扰节点之间没有足够的正交信道产生的。当信道分配步骤结束后,产生最多干扰的节点必然会拥有最大的干扰度。

(3) 链路调度法则

算法执行步骤如下:

- Step1 for $i = 1 \sim l(k, t)$
if $\eta_i = \max \eta_i(k, t)$
then $\omega(k, t) = \omega(k, t) + \eta_i$
- Step2 if $i(k, t) \in \omega(k, t)$ and $i_l(k, t)$ 不被调度
then $l(k, t) = l(k, t) - i_l(k, t)$
- Step3 重复 Step1-Step2,直到 $l(k, t) = \emptyset$ 并且达到 $\omega(k, t) = \max \omega$
- Step4 结束

(4) 调度公平性的保证

为保证链路在调度法则执行过程中的公平性,规定在任意时隙 t : 节点 i 被链路调度进行数据传输,即有 $i \in \omega(k, l, t)$, $l_c = 1$; 否则应有节点 i 的干扰链路被调度进行数据传输,即有 $I_l = 1, I_l \in \omega(k, l, t)$ 。

公平性证明如下:

令: $A_i(t)$ 表示在时隙 t 数据包到达链路队列的速率, $D_i(t)$ 表示在 t 时刻数据包被处理并离开链路队列的速率, $c_i(t)$ 是链路 l 在每个时隙可以处理的数据包数量,有 $D_i(t) = c_i(t) l(t)$ 。令 $q_i(t)$ 为 t 时刻链路 l 上等待队列中的数据集合,则有:

if: $T = t$, 链路 l 被调度, $l(t) = 1$, then: $T = t + 1, q_l(t+1) = q_l(t) +$

$$A_l(t) - D_l(t)$$

if: $T=t$, 链路 l' 没有被调度, $l'(t)=0, D_l'(t)=0$, then $q_l'(t+1) = q_l(t) + A_l(t)$
 then, $q_l'(t+1) > q_l(t+1)$, 并且有链路队列权重 $\lambda_l' = q_l'(t)r_l^c > \lambda_l = q_l(t)r_l^c$
 then, 当 $T=t+1$ 时, 链路 l' 将获得比链路 l 更大的调度机会。

3.3 算法收敛和链路稳定规则

本节在两步骤信道分配算法及链路调度法则中补充说明算法的收敛规则和链路稳定规则, 防止由于信道分配算法中的信道更新而产生的涟漪效应和信道振荡^[3], 并保证链路传输的稳定。

(1) 边界节点最优原则

边界节点拥有最高的信道分配和链路调度权, 即一旦边界节点分配了一条信道, 就不再进行信道更新, 并且边界节点在链路调度中不进行退避。

(2) 干扰度最小原则

每层信道分配完成之后, 要保证网络中干扰度最小, 即信道更新后的干扰总值 μ' 应小于更新前网络中的干扰总值 μ , 否则更新作废。

(3) 链路稳定性验证

文献[12]中证明, 当网络中所有链路的队列长度都保持有限长时, 网络处于稳定状态。即只要数据包到达网络的速度一定, 就可以保证链路队列有限以及网络处于稳定的状态, 即有:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T 1_{\{ \sum_{i=1}^t q_i(t) > \eta \}} \rightarrow 0, \text{ as } \eta \rightarrow \infty \quad (10)$$

4 仿真实验

4.1 实验环境设置

本文设计了一种应用在无线 Ad hoc 网络中基于 0-1 规划的网络优化模型和两步骤资源分配算法(以下简称为 TBCA-LS)。使用 Matlab 仿真软件模拟 MR-MC Ad Hoc 无线网络环境, 实现文中设计的两步骤资源分配算法, 并使用相关领域的对比协议 CCAS(Cluster-based Channel Assignment Scheme)^[20], 通过网络性能参数的对比, 验证和分析本文所设计算法的性能。实验环境和相应参数的设定如表 1 所列。

表 1 实验环境和相应参数的设定

实验环境	参数设定
仿真网络范围	1000m * 1000m
节点总数	25 到 50 个(随机)
节点分布	均匀分布
MAC 层协议	IEEE 802.11b DCF
节点传输半径	250m
载波侦听半径	500m
数据包链路速率	1Mbps
最小/最大竞争窗口(bit)	32/1024
数据流设定	UDP
数据包包长	1000Bytes
实验场景	正交和非正交信道
信道设置	11 条信道, 3 条为完全正交, 8 条为部分交叠
解析效率下降值(非正交信道)	$\mu = [0.6, 0.4, 0.2, 0]$
信道选用频段	2.4GHz, IEEE 802.11b
分簇半径设定	$R=1; R=2$
实验次数	每组 50 次, 95%置信区间

选取 3 个常用的参数进行网络性能的对比如分析。

(1) 吞吐量: 网络中所有节点在单位时间内传输的数据包总量的统计值。

(2) 信道队列长度: 等待占有该条信道进行通信的所有节点队列中数据包的长度的统计值。

(3) 干扰节点数目: 信道分配完成之后, 全网中所有相互干扰的节点数目的统计值。

本文采用了文献[20]中提出的在 MR-MC 网络环境中执行的基于分簇的信道分配机制 CCAS 作为对比协议。该协议是一种不需要邻居节点位置信息即可以最小化干扰量的两步骤信道分配算法, 算法首先将网络划分为地理上不交叠的簇结构, 每个簇使用一个与邻居簇完全正交的公共信道进行簇内通信, 消除非协调干扰, 进而将簇划分为多个不同的干扰域, 并充分利用信道多样性来增加单个链路的容量。

实验设定两种信道条件, 分别为 3 条完全正交的信道和 11 条含有部分交叠信道。在两种条件下分别使用 CCAS 算法和只使用信道分配的算法 TBCA^[14] 作为对比算法, 与本文描述的两步骤资源分配算法 TBCA-LS 进行对比。并且, 考虑到分簇半径对算法运行结果的影响, 对 TBCA-LS 算法分别采用了一跳分簇半径和两跳分簇半径的设定, 从而验证链路调度法则对全网信道资源分配的性能优化作用, 以及对网络性能的总体提升效果。

4.2 实验结果统计

(1) 网络吞吐量统计结果

图 3 示出了在完全正交信道和部分交叠信道条件下, 两步骤资源优化算法 TBCA-LS 和只有信道分配步骤的 TBCA 算法以及对比算法 CCAS 产生的网络吞吐量的统计结果。

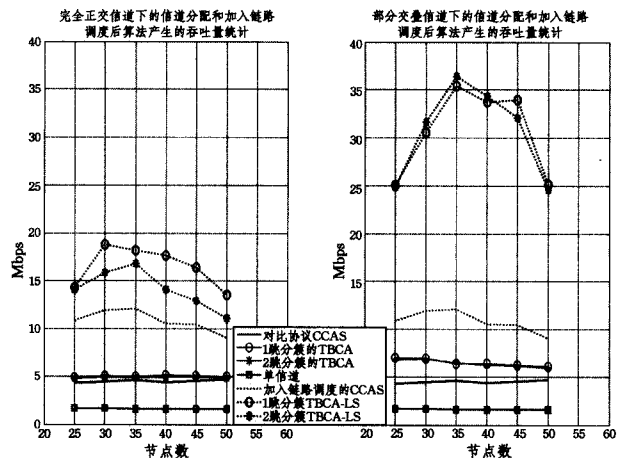


图 3 两种信道模式下信道分配和两步骤资源优化算法产生的吞吐量统计

实验结果表明, 利用链路调度算法完善两步骤资源优化后, 无论是本文设计的算法 TBCA-LS 还是对比算法 CCAS, 都较原有的只利用信道分配进行资源优化的算法产生的吞吐量有大幅度提升。同时, 在两种信道环境的对比下, 可以看出本文所设计的两步骤资源优化算法 TBCA-LS 能达到的性能优势在部分交叠的信道条件下更加明显。例如, TBCA-LS 算法比原始的信道分配算法 TBCA 产生的吞吐量提高了 5 倍左右; 而 CCAS-LS 算法也比原始算法 CCAS 的性能提高了 2 倍左右。这充分说明了链路调度能够进一步提升网络性能, 完善网络资源优化, 并且也验证了本文设计的资源优化算法

在信道资源有限的条件下可以获得更好的效果。另外,实验证明,在进行链路调度的过程中,只需按照调度法则将网络中很少部分的链路进行退避,就可以保证网络中剩余大部分的链路都被调度并进行通信传输。

(2)信道队列长度统计结果

图 4 分别统计了在完全正交信道和部分交叠的信道条件下加入链路调度后的资源优化算法和原始算法产生的信道队列长度统计结果。

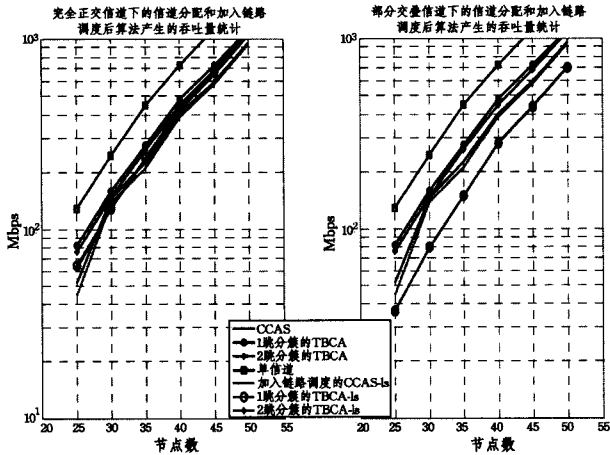


图 4 两种信道模式下信道分配和两步骤资源优化算法产生的信道队列长度统计

从实验结果可以看出,加入了链路调度后的资源优化算法产生的信道的队列长度与仅用信道分配算法产生的结果趋势一致,但整体上短于信道分配算法产生的信道的队列长度。

由于链路调度法则的原理是通过牺牲一小部分的链路的活跃度来保证在干扰范围内其余链路都能获得足够可用的信道进行并发传输。因此利用链路调度法则进行资源优化之后,有限信道资源会得到更加充分的利用:所有被调度的链路占用信道进行通信;而被退避的链路会等待下一个时隙被调度的机会占用信道进行传输。因此,加入链路调度机制可以使有限信道资源得到更加有序和充分的利用,有效减少了信道冲突情况的发生,进而优化了网络性能。另外,在完全正交信道条件下,对比算法 CCAS 的原理是首先为相邻簇结构分配完全正交的信道,从而消除了链路之间的非协调干扰,并且优先为干扰大的节点分配信道,因此在这种条件下,CCAS 产生的信道队列长度略短于本文设计的 TBCA-LS 算法产生的队列长度。但由于 CCAS 算法不适用于部分交叠的信道环境,因此在可用信道资源有限的网络条件下,本文设计的资源优化算法更有优势。

(3)干扰节点数目统计结果

图 5 是在完全正交信道条件下和部分交叠信道条件下加入链路调度后的资源分配算法 TBCA-LS 和只有信道分配步骤的 TBCA 算法以及对比较算法 CCAS 产生的干扰节点数目的统计结果。

图 5 的实验结果表明,在加入链路调度算法后,无论是对比协议 CCAS 还是本文设计的 TBCA-LS 算法,产生的干扰节点数目都比没有加入链路调度的原始算法产生的干扰节点数目少,说明链路调度算法对于减少网络节点干扰量有显著效果。其中,本文设计的两步骤资源分配算法 TBCA-LS 在

部分交叠的信道环境下,更加有效地降低了全网干扰量,这是由于在部分交叠的信道环境下,全网可用信道数目更多,处于干扰半径内的链路也可以进行并发传输;而链路调度的法则更加有效地促进了有限信道资源的高效利用。但是,由于信道资源受限于网络中的可用信道数目以及节点接口等各种条件,因此无论是哪种方法,都无法完全消除信道冲突和干扰,网络性能也会受到各种因素的制约,如何在有限资源条件下达到更高的网络性能,也是本文需要进一步研究的方向。

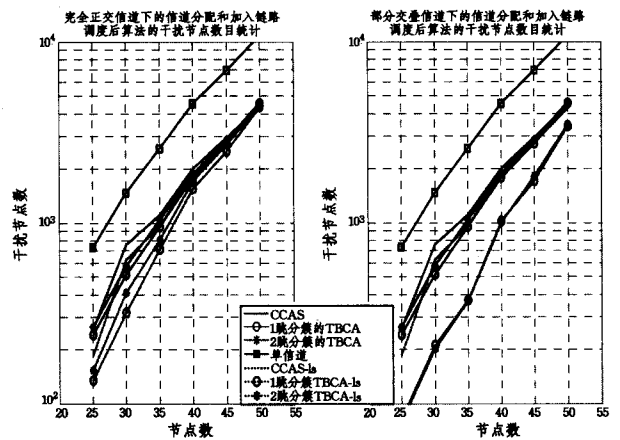


图 5 两种信道模式下信道分配和两步骤资源优化算法产生的干扰节点数目统计

4.3 实验结果分析

在完全正交信道和部分交叠信道环境下,通过分别运行单信道协议、CCAS 算法以及本文设计的两步骤资源分配算法 TBCA-LS,并对网络吞吐量、信道队列长度以及干扰节点数目分别进行统计和对比。实验结果证明,在只使用单信道进行传输的网络中,网络性能会随着网络中节点数目的增多而逐步下降,与利用多射频-多信道技术并合理进行资源分配的网络性能进行对比,它能够达到的整体性能非常低,这充分验证了多射频多信道技术在提升网络性能方面的优良特性。本文设计的两步骤资源分配算法无论是在完全正交还是部分交叠的网络环境中,能够达到的网络性能都比对比算法 CCAS 要好,尤其在可用信道有限的部分交叠网络环境中,TBCA-LS 的性能优势更加明显。统计结果如表 2、表 3 所列。

表 2 正交信道条件下 CCAS-LS, TBCA-LS 与原始算法的性能对比(%)

对比算法名称	吞吐量提升	信道队列长度降低	干扰节点对数降低
(CCAS-LS, CCAS)	320	8.6	36.4
(1 跳分簇 TBCA-LS, 1 跳分簇 TBCA)	365	15.4	30.9
(2 跳分簇 TBCA-LS, 2 跳分簇 TBCA)	334	12.5	33.6

表 3 正交与部分交叠信道条件下 CCAS-LS 和 TBCA-LS 性能对比

网络环境	对比算法名称	吞吐量提升 (%)	信道队列长度降低 (%)	干扰节点对数降低 (%)
完全正交信道	(1 跳分簇 TBCA-LS, CCAS-LS)	14.5	-8.5	9.1
	(2 跳分簇 TBCA-LS, CCAS-LS)	4.4	-6.2	8.7
部分交叠信道	(1 跳分簇 TBCA-LS, CCAS-LS)	211.9	15.8	19.7
	(2 跳分簇 TBCA-LS, CCAS-LS)	165.5	17.6	20.3

(1)本实验分别在完全正交信道和部分交叠的信道条件下运行对比算法 CCAS 和本文设计的两步骤资源分配算法 TBCA-LS。在这两种场景下, TBCA-LS 能够获得的网络优化效果均优于 CCAS, 且这种优势在部分交叠信道的网络环境下更加明显。例如在表 3 中, 在部分交叠信道的网络环境下, 1 跳分簇的 TBCA-LS 算法比 CCAS-LS 算法在吞吐量上提升了 211.9%, 信道队列长度下降了 15.8%, 干扰总量减少了 19.7%。这是由于 CCAS 算法的执行严格要求网络中所有信道都是正交信道; 而对于部分交叠的信道网络环境, CCAS 算法能够获得的网络性能优势就不再明显。这也说明了本文设计的 TBCA-LS 算法比 CCAS 算法更加适用于真实情况下正交信道数目有限的无线网络环境中。

(2)利用链路调度法则进行资源优化的完善之后, 无论是对比算法 CCAS 还是本文设计的算法 TBCA-LS, 都比仅利用信道分配进行资源优化的方法获得了更加优良的网络性能。例如在表 2 中, 加入链路调度后 CCAS 算法产生的吞吐量是原始算法产生的吞吐量的 320%, 信道队列长度缩短了 8.6%, 而干扰节点数目减少了 36.4%。对于本文设计的算法 TBCA-LS, 加入链路调度机制后能够达到的网络性能优势更加明显, 这些都能说明链路调度法则对于网络信道资源具有优化分配作用。同时, 在实验中也发现, 链路调度法则平均在一个时隙中选择退避的链路数目小于全网总链路数目的 10%, 仅有几条链路选择退避就足以保证全网大部分链路都能够获得可用信道进行并发传输, 即通过牺牲很少一部分链路的吞吐量, 使得全网资源得到了更加充分和优化的利用。

(3)考虑到簇范围的大小对于算法执行效率的影响, 在本次实验中同时采用了分簇半径为 1 跳和分簇半径为 2 跳的 TBCA-LS 算法。从整体性能分析中得出结论: 采用 1 跳分簇半径的 TBCA-LS 算法获得的性能要略优于采用 2 跳分簇半径的 TBCA-LS 算法。例如在表 3 中, 在正交信道条件下, 采用 1 跳分簇半径的 TBCA-LS 算法达到的吞吐量是对比算法 CCAS-LS 的 14.5%, 而采用 2 跳分簇的 TBCA-LS 则是 CCAS-LS 的 4.4%。分析原因: 采用 1 跳分簇半径的簇范围较小, 相对于每个独立簇结构, 产生干扰的节点数目较少, 搜索树的冲突结较简单, 信道分配算法的执行复杂度比较低, 算法得到了更好的运行, 因此也能够获取更好的网络性能。另外, 对比算法 CCAS 的分簇算法由于需要基于节点的地理位置, 因此只适用于节点密度较低或者节点布置均匀的情况; 如果节点密度较高或者布置不均匀, 这种分簇算法就会造成每个簇中的节点分布不均衡, 结合它的两步分簇机制, 就会给网络性能带来负面影响。例如, 当网络中节点分布密集或局部密集时, 在 CCAS 算法执行下的簇分布呈现成员不均匀的现象, 尤其是节点较密集的区域簇成员较多。在这种情况下, 簇首节点需要维护庞大的簇成员信息和地理位置信息, 因此簇内需要维护的控制信息会占据较多的网络资源, 影响簇首节点算法的执行性能, 从而影响网络中的信道使用情况, 降低数据的传输效率; 结合其两步骤资源分配机制时, 这种不均匀的资源分配情况就会从单个簇扩展至其相邻簇, 影响相邻簇之间的数据传输, 从而造成网络整体吞吐量降低, 网络传输性能下降。

结束语 本文针对无线网络中的资源优化问题, 提出了基于 0-1 整数规划的网络优化模型及其在 MR-MC Ad hoc 信道资源分配中的应用, 利用两步骤的信道分配和链路调度法则, 达到在尽量减小链路干扰和冲突的前提下优化有限信道资源分配、提高网络性能的目的。通过仿真实验以及与相关已有算法的对比实验和统计结果的分析, 验证了本文设计的网络优化模型和两步骤资源分配方法对网络性能的提升是显著的。这些实验结果和分析也为进一步的工作提供了数据和经验。后续的工作可以在该理论优化模型的基础上增加数据, 进一步逼近最优解和性能边界值; 另外, 重点考虑信道分配、链路调度机制和路由算法等结合的跨层优化模型。

参考文献

- [1] 易平, 吴越. 无线自组织网络和对等网络-原理与安全[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [2] LU Xian-ling, SUN Ya-ming, ZHOU Ling, et al. A Survey of Cross Layer Design for Ad Hoc Wireless Networks[J]. Computer Science, 2007, 34(10): 24-26. (in Chinese)
卢先领, 孙亚民, 周灵, 等. Ad Hoc 无线网络跨层设计综述[J]. 计算机科学, 2007, 34(10): 24-26.
- [3] ZHAO Chuan-xin. Research on Key Technologies of Cross-Layer Optimization in Wireless Ad Hoc Network[D]. Suzhou: Soochow University, 2013. (in Chinese)
赵传信. 无线 Ad Hoc 网络跨层优化关键技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2013.
- [4] GUPTA P, KUMAR P R. The capacity of wireless networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [5] 张彤芳. MIMC 网络中基于多径路由的跨层信道分配技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [6] KARI C, SHASHIDHAR N, et al. Distributed dynamic channel assignment in wireless networks[C]//2014 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Xiamen, China, 2014: 1113-1117.
- [7] LIU Lu, CAO Xiang-hui, CHENG Yu, et al. Energy-efficient capacity optimization in wireless networks[C]//INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE. IEEE, 2014: 1384-1392.
- [8] BI Kun. Research on Channel Assignment and Routing Algorithms in Wireless Networks[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
毕坤. 无线网络中的信道分配和路由算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [9] CHEN Xiao-hui, XU Jing, LIU Wei, et al. Channel allocation and link scheduling in variable-width wireless networks[J]. Computer Engineering and Science, 2014, 36(9): 1656-1661. (in Chinese)
陈小惠, 徐晶, 刘威, 等. 可变频宽无线网络中信道频谱分配与链路调度[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(9): 1656-1661.
- [10] DENG Xue-bo, WANG Xiao-qiang, CHEN Xi, et al. Channel Allocation Algorithm Based on QoS and Throughput Fair [J]. Computer Engineering, 2012, 38(6): 89-91. (in Chinese)
邓雪波, 王小强, 陈曦, 等. 基于 QoS 和吞吐量公平的信道分配算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(6): 89-91.

止问题提供可行解,获得各侦测时刻的最优传输速率阈值,实现基于数据到达速率的能耗优化策略。仿真实验表明,该策略最小化传输单位数据平均能耗,增大了传递率,达到了优化能耗的目标。

更进一步,提高较大延时下的数据传输能效和传递率是今后的研究方向。

参 考 文 献

- [1] LIN Chuang, TIAN Yuan, YAO Min. Green network and green evaluation: mechanism, modeling and evaluation [J]. Chinese Journal of Computers, 2011, 34(4): 593-612. (in Chinese)
林闯, 田源, 姚敏. 绿色网络和绿色评价: 节能机制、模型和评价[J]. 计算机学报, 2011, 34(4): 593-612.
- [2] ZHANG F, ANTA A F, WANG L, et al. Network energy consumption models and energy efficient algorithms [J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(3): 603-615. (in Chinese)
张法, Anta A F, 王林, 等. 网络能耗系统模型及能效算法[J]. 计算机学报, 2012, 35(3): 603-615.
- [3] GARCIA-SAAVEDRA A, SERRANO P, BANCHS A. Energy-efficient optimization for distributed opportunistic scheduling [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(6): 1083-1086.
- [4] POULAKIS M I, PANAGOPOULOS A D, CONSTANTINOU P. Channel-aware opportunistic transmission scheduling for energy-efficient wireless links [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 62(1): 192-204.
- [5] PENG Ying, WANG Gao-cai, HUANG Shu-qiang, et al. An energy consumption optimization strategy for data transmission based on optimal stopping theory in mobile networks [J]. Chinese Journal of Computers, 2016, 39(6): 1162-1175. (in Chinese)
彭颖, 王高才, 黄书强, 等. 移动网络中基于最优停止理论的数据传输能耗优化策略[J]. 计算机学报, 2016, 39(6): 1162-1175.
- [6] AMIN O, LAMPE L. Opportunistic energy efficient cooperative communication [J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2012, 1(5): 412-415.
- [7] ZHENG Dong, GE Wei-Yan, ZHANG Jun-Shan. Distributed opportunistic scheduling for Ad Hoc networks with random access: an optimal stopping approach [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(1): 205-222.
- [8] MAO Wen-guang, WU Shan-shan, WANG Xu-dong. QoS-oriented distributed opportunistic scheduling for wireless networks with hybrid links [C] // Proceedings of the 2013 Globecom. Atlanta, USA, 2013: 4524-4529.
- [9] Haykin S, 等. 通信系统 [M]. 宋铁成, 徐平平, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [10] FERGUSON T S. Optimal Stopping and Applications [DB/OL]. 2006 [2015]. <http://www.math.ucla.edu/~tom/Stopping/Contents.html>.
- (上接第 108 页)
- [11] LI Bao-gang, LIU Yuan-an, LIU Kai-ming, et al. On-demand cooperative spectrum sensing and channel allocation in cognitive wireless networks [J]. Journal on Communications, 2011, 32(11): 104-110. (in Chinese)
李保罡, 刘元安, 刘凯明, 等. 认知无线网络按需协同感知和信道分配[J]. 通信学报, 2011, 32(11): 104-110.
- [12] Xiaojun L, Rasool S. A Distributed Joint Channel-Assignment, Scheduling and Routing Algorithm for Multi-Channel Ad-hoc Wireless Networks [C] // INFOCOM 2007 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Alaska, USA, 2007: 1118-1126.
- [13] WANG Hai-tao, ZHANG Xue-ping. Clustering Algorithms of Mobile Ad hoc Network [J]. Data Communications, 2003(4): 32-35. (in Chinese)
王海涛, 张学平. Ad hoc 网络中的分簇算法[J]. 数据通信, 2003(4): 32-35.
- [14] LIU Wei, ZHAO Yu, CHEN Rui. The Zero-one Integer Programming Based Optimization Model and Channel Assignment Algorithm in Ad Hoc Network [J]. Computer Engineering, 2016, 42(5): 93-101. (in Chinese)
刘蔚, 赵宇, 陈锐. 基于 0-1 规划的网络优化模型及其在信道分配中的应用[J]. 计算机工程, 2016, 42(5): 93-101.
- [15] KODIALAM M, NANDAGOPAL T. Characterizing the capacity region in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C] // Proceedings of the 11th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Cologne, Germany: ACM, 2005: 73-87.
- [16] NEELY M J, MODIANO E, ROHRS C E. Dynamic power allocation and routing for time-varying wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(1): 89-103.
- [17] TASSIULAS L, EPHREMIDES A. Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, 37(12): 1936-1948.
- [18] XU Jing, LIU Wei, YANG Zong-kai, et al. Resource Optimization for Uncertain Traffic in Multi-radio Wireless Networks [J]. Computer Science, 2012, 39(3): 33-38. (in Chinese)
徐晶, 刘威, 杨宗凯, 等. 针对不确定流量的多收发机无线网络资源优化研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(3): 33-38.
- [19] WU X, SRIKANT R, PERKINS J R. Scheduling Efficiency of Distributed Greedy Scheduling Algorithms in Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(6): 595-605.
- [20] NAVEED A, KANHERE S S. Cluster-based channel assignment in multi-radio multi-channel wireless mesh networks [C] // IEEE 34th Conference on Local Computer Networks, 2009 (LCN). 2009: 53-60.