

文章编号:1001-0920(2010)09-1349-05

基于TDMA方式WMN中一种链路调度机制研究

陈剑^a, 贾杰^a, 闻英友^a, 赵大哲^{a,b}, 刘积仁^a

(东北大学 a. 信息科学与工程学院, b. 医学影像计算教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 基于TDMA方式的无线网状网中, 链路调度对网络性能起着重要作用. 针对固定顺序的待调度链路集, 提出求解最优调度周期的启发式算法; 基于链路顺序对算法性能的影响, 从全局优化的角度对全网链路进行排序, 提出基于遗传算法的最优链路调度机制. 仿真结果表明, 该算法能快速收敛于全网链路的最小调度周期, 具有比现有算法更高的传输效率和更低的实施复杂度.

关键词: 无线网状网; 链路调度; 时分多址; 遗传算法; 吞吐量

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Study on link scheduling scheme in TDMA based wireless mesh networks

CHEN Jian^a, JIA Jie^a, WEN Ying-you^a, ZHAO Da-zhe^{a,b}, LIU Ji-ren^a

(a. College of Information Science and Technology, b. Key Laboratory of Medical Image Computing of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: CHEN Jian, E-mail: chenjianneu@163.com)

Abstract: Link scheduling plays an important role in the performance of time division multiple access(TDMA) based wireless mesh networks. A heuristic algorithm to solve the near optimal scheduling length is proposed for link list with fixed sequences. As the performance is much more affected by the sequence of the link list, the link scheduling scheme to sort the overall network link list based on genetic algorithm is proposed. Simulation results show that the proposed scheme can converge to the optimal schedule length more rapidly, having a better transfer efficiency and a lower implementation complexity than the existing algorithms.

Key words: Wireless mesh network; Link scheduling; TDMA; Genetic algorithm; Throughput

1 引言

无线网状网(WMN)^[1]是一种具有自组织多跳特性的新型宽带无线网络, 适合宽带无线骨干传输环境, 被认为是下一代互联网络的重要组成部分.

提高网络吞吐量并保证通信的QoS支持是WMN领域的关键问题. 为了满足无线网状网中业务的无干扰、可靠传输需求, IEEE 802.16协议及802.11s协议采用TDMA多址接入方式, 分配并维持各用户站在通信过程中所需的带宽需求, 提供面向连接的服务特性, 这样能够满足大多数实时业务的QoS需求. 另一方面, 由于TDMA系统中每时隙的传输字节数仅与调制方式有关, 在设计中还应尽可能使互不干扰的链路在相同时隙中传输, 以提高时隙复用率, 减少网

络调度帧的长度, 最终提高网络的吞吐量.

由于无线网络的干扰可采用干扰图^[2, 3]来描述, 为了寻找无冲突的链路调度机制, 文献[3-6]提出了若干基于图着色的启发式求解方法, 但由于WMN中的无线多跳特性, 各链路除了需要传输自身的流量外, 还需要对沿路径的子节点的流量进行转发, 这会导致各链路具有不同的时隙需求. 为了适应WMN中节点的中继转发特性, [7-9]提出了若干跨层设计的链路调度机制, 这些算法均致力于减少沿路径干扰的前提下提高时隙复用率, 但上述算法并没有考虑链路选择顺序对网络性能的影响, 因而时隙复用率较低^[10, 11]. 为此, [10, 11]中提出了近BS节点优先、远BS节点优先、最小干扰度优先等多种链路排序原则. 其他链路

收稿日期: 2009-09-21; 修回日期: 2010-02-09.

基金项目: 国家高技术研究发展计划重点项目(2007AA041201); 国家自然科学基金项目(60903159, 60673159, 70671020, 60803131); 教育部科学技术研究重点项目(108040); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060145012, 20070145017).

作者简介: 陈剑(1980-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 从事移动自组织网络、无线通信等研究; 刘积仁(1955-), 男, 辽宁丹东人, 教授, 博士生导师, 从事计算机网络、分布式多媒体技术等研究.

排序策略还包括基于上下行链路统一调度的跳数最少优先和跳数最多优先链路排序机制^[12]等. 但上述算法可能导致每帧中每条链路出现多次传输的情况, 这在实施中会引起 TDMA 设备的多次同步, 频繁的同步设计将导致较大的网络开销^[13].

区别于链路多次传输机制, 本文令任意链路在每帧中有且仅有一次传输机会, 降低同步设计的复杂度, 并保证链路接入网络的公平性. 针对固定顺序链路集, 提出一种求解最短调度帧的启发式算法; 基于链路选择顺序对算法性能的影响, 进一步提出一种基于遗传算法的全网链路最优排序方法.

2 网络模型与假设

由于 WMN 一般作为无线骨干网络存在, 具有比移动 Ad Hoc 网络更少的节点移动性与更稳定的拓扑结构. 与文献[6, 12, 14]假设类似, 本文认为 WMN 中各路由器均处于静止状态, MAC 协议采用 TDMA 时分多址技术.

1) 本文仅考虑 WMN 中的无线骨干传输网部分, 网络中存在唯一 BS 节点, 该节点为全网的中心节点, 了解网络所有用户节点(SS)的位置、状态及信道质量;

2) BS 根据各节点的位置及路由机制确定全网的路由树构造及各 SS 节点的上下行转发节点;

3) 由于上下行链路调度具有类似性, 本文主要研究上行链路调度算法.

此处需注意的是, 文中假设全网存在唯一 BS 节点是比较理想的情况, 当网络规模较大时, 令 BS 节点在短时间收集所有的节点信息是比较困难的, 势必将引起处理问题的较大延迟, 从而导致算法失效. 一种可行的解决方案是在网络部署多个 BS 节点同时对网络进行分簇, 各节点根据就近原则选最近的 BS 节点作为其簇首节点; 完成全网节点分簇后, 再由各 BS 单独执行簇内链路调度, 从而满足大规模网络环境的需要.

2.1 网络模型

将 WMN 建模为有向通信图 $G(V, E)$, WMN 中节点集合由 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 表示, BS 节点由 v_1 表示, SS 节点由 v_2, v_3, \dots, v_n 表示. 有向链路集 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 表示网络中有向边集合, $e: (l_{ij}) \in E$, 当且仅当 $d(i, j) \leq R_c$, i 为数据发送方, j 为数据接收方, 全网节点具有相同的通信半径 R_c , $d(i, j)$ 表示节点 i 和 j 之间的欧氏距离.

在 TDMA 方式的通信系统中, 只有获得分配的时隙资源后, 链路才能进行数据的转发. 假设网络中各节点的初始带宽需求为 $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$, 可求得任意节点 i 的最终带宽需求

$$\hat{r}_i = g_i + \sum_{j \in \text{child}(i)} g_j. \quad (1)$$

同理, 对于任意链路 $e_j \in E'$, 可求得其带宽需求

$$\hat{r}_{e_j} = \sum_{P_l \in P} g_l I(e_j \in P_l). \quad (2)$$

其中: P 为各端点经路由扩展树所产生的所有路径集合; $I(\cdot)$ 为指示函数, 当且仅当链路 $e_j \in P_l$, 其值为 1, 否则为 0; g_l 为对应路径 p_l 的传输需求, 其值与路径中节点 i 的初始传输需求 g_i 相等. 如果帧持续时间为 T_f , 每个时隙传输的字节数为 b_j , 则可求得相应的时隙需求为

$$r_{e_j} = \lceil \hat{r}_{e_j} T_f / b_j \rceil, \quad (3)$$

其中 $\lceil \cdot \rceil$ 表示取整函数. 时隙请求与资源分配策略最终决定了各节点能获得时隙的数目.

2.2 干扰模型

根据文献[14, 15]对主、次干扰模型的描述, 本文引入以下 5 种干扰模型, 其中主干干扰模型由两条链路共享同一节点时, 在同一时隙进行数据传送(发送或接收)产生^[15]. 主干干扰模型由以下 3 种情况产生: 同一节点同时接收两个不同数据源的数据, 导致 $t-t$ 干扰产生; 同一节点同时向两个不同的目的节点发送数据, 导致 $r-r$ 干扰产生; 节点同时处于接收和发送状态, 导致 $t-r$ 干扰产生. 次干扰模型由无线系统的多跳转发起^[14]: 不同信源向不同信宿发送数据, 但另一个信源处在信宿的接收范围内时, 数据的同时发送将导致 $t-r-t$ 干扰产生; $r-t-r$ 模型主要由 RTS/CTS 机制引起, 当源节点间距离小于通信范围时, 采用 RTS/CTS 机制时, 一个节点的发送会造成另一个节点的发送延时.

建立一个与图 $G(V, E)$ 中的通信链路 E 相对应的顶点集 V_c , 即

$$V_c = \{l_{ij} | d(i, j) \leq R_c\}. \quad (4)$$

当且仅当 l_{ij} 与 l_{ab} 存在冲突, $\exists e_c: (l_{ij}, l_{ab}) \in E_c$, 如图 1 所示, 对应于通信图 $G(V, E)$ 中的 4 条通信链路, 冲突图 $G_c(V_c, E_c)$ 具有 4 个顶点. 如果链路 l_{bc} 在时隙 t 上存在数据通信, 为了消除通信干扰, 则需要 l_{ab}, l_{dc} 链路选择其他通信时隙.

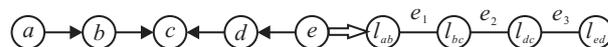


图 1 生成图 $G(V, E)$ 及其对应干扰图 $G_c(V_c, E_c)$

3 链路调度问题

已知各链路时隙需求向量 $R = [r_{e_1}, r_{e_2}, \dots, r_{e_m}]^T$, 链路调度算法即为寻求一种链路序列与调度帧中各时隙编号 $M = [0, 1, \dots, T-1]^T$ 的对应关系矩阵 $I: E \times M \rightarrow \{0, 1\}$, 表示为

$$I(e(i), t) = \begin{cases} 1, & \text{if } e(i) \text{ is active in time slott;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $I(\cdot)$ 为指示函数, 如果链路 e_i 在时隙 t 中传输, 则 $I(e(i), t) = 1$, 否则为 0. 另外, 由于 TDMA 机制的帧重复特性, 还存在以下关系: 如果存在 $I(e(i), t) = 1$, 则 $\forall z_i \in Z, I(e(i), t + z_i T) = 1$, 即在时间集 $\{t + z_i T, z_i \in Z\}$ 中, 链路 $e(i)$ 均处于活动状态.

为了减少链路调度中时隙资源的浪费, 需要保证最后分配的时隙总数不能超过其申请数, 即

$$\sum_{i=0}^{T-1} I(e(i), t) \leq r_{e_i}. \quad (6)$$

为了达到无冲突传输的目的, 需要保证相互干扰的链路处于不同的时隙进行通信, 即

$$\begin{aligned} I(e(i), t) + I(e(j), t) &\leq 1, \\ \forall e_i, e_j \in E, e_c : (e_i, e_j) &\in E_c. \end{aligned} \quad (7)$$

如果链路 e_i 和 e_j 相互干扰, 则需要二者所分配时隙在空间上没有交集. 定义变量 p_{ij} 表示链路 e_i 和 e_j 的传输先后顺序, 当且仅当 $s_{e_i} - s_{e_j} \geq 0$ 时, $p_{ij} = 1$. 则有^[14]

$$d_{e_i} - p_{ij}T \leq s_{e_j} - s_{e_i} \leq T - d_{e_j} - p_{ij}T. \quad (8)$$

定义 1 链路调度问题. 给定 WMN 的通信图 $G(V, E)$ 及各链路传输需求 $R = [r_{e_1}, r_{e_2}, \dots, r_{e_m}]^T$, 最优链路调度问题即为寻找一种链路调度方案 (S, D) , 使得在全网无干扰传输的情况下, 满足各链路传输需求 R , 并使网络吞吐量最大. 其中 $S = [s_{e_1}, s_{e_2}, \dots, s_{e_m}]^T$ 和 $D = [d_{e_1}, d_{e_2}, \dots, d_{e_m}]^T$ 分别表示各链路的起始传输时隙和传输时长. 则有

$\min T$.

s.t. $0 \leq s_{e_i}, d(e_i) \leq T, \forall e_i \in E$;

$d_{e_i} \leq r_{e_i}, \forall e_i \in E$;

$d_{e_i} - p_{ij}T \leq s_{e_j} - s_{e_i} \leq T - d_{e_j} - p_{ij}T$,

$\forall e_i, e_j \in E$ and e_i conflicts with $e_j, P_{ij} = \{0, 1\}$.

(9)

4 问题求解

4.1 最小调度周期求解算法

令尽可能多的非干扰链路并行传输是提高帧时隙复用度, 减小网络调度周期 T , 增加全网吞吐量的有效方法^[11]. 针对固定顺序待调度链路集问题, 提出一种求解最短调度周期的 OLLS 启发式算法. 具体算法如下:

输入: 链路需求向量 $R = [r_{e_1}, r_{e_2}, \dots, r_{e_m}]^T$, 随机待调度链路序列 $o = \{\dots, e_i, \dots\}$;

输出: 开始时间向量 S , 结束时间向量 F , 调度周期 T .

$T \leftarrow 0$;

$\text{left} \leftarrow o$;

$\text{current} \leftarrow \phi$;

while $\text{left} \neq \phi$ **do**

for $e \in \text{left}$ **do**

if e **do not conflict with all the links in current then**

find $e' \in \text{current}$ **which has the minimum** $s(e')$;

$s(e) \leftarrow s(e')$;

$f(e) \leftarrow s(e) + r(e)$;

else find $e' \in \text{current}$ **which conflicts with** e **and**

has the maximum $f(e')$;

$s(e) \leftarrow s(e')$;

$f(e) \leftarrow s(e) + r(e)$;

end

if $f(e) > T$

$T \leftarrow f(e)$;

end

$\text{left} \leftarrow \text{left} - \{e\}$;

$\text{current} \leftarrow \text{current} + \{e\}$;

end

end.

如果链路 e 与已调度链路集 current 中所有链路都不存在干扰, 则选择 current 中的最小开始时间 $s(e')$ 作为 e 的起始传输时隙 $s(e)$, 并令其结束时隙 $f(e)$ 为起始传输时隙 $s(e)$ 与调度需求 $r(e)$ 之和, 如算法第 6 行~第 9 行所示, 这也保证了每个链路所分配的带宽 $d(e)$ 与其需求带宽 $r(e)$ 相等. 如果 e 与已调度链路集 current 中链路存在干扰, 则选择 current 中与其存在干扰链路的最大结束时间 $f(e')$ 作为 e 的起始传输时隙 $s(e)$, 同样令其结束时隙 $f(e)$ 为 $s(e)$ 与 $r(e)$ 之和, 如第 10 行~第 12 行所示, 这就保证了相互干扰的链路总处于不同的时隙中传输, 以达到尽可能减少调度周期的目的. 如果更新后的中止时隙 $f(e)$ 大于已有的网络周期 T , 则将 T 更新为结束时间 $f(e)$. 这就保证了最后所求周期 T 总能满足所有链路的传输需求.

4.2 基于遗传算法的最优链路顺序求解

m 条链路的待调度链路集合存在 $m!$ 种链路排列顺序, 当链路数目较多时, 很难用全局搜索法求出链路的最优排列. 为此, 提出一种基于遗传算法(GA)的链路顺序求解算法.

由于最优链路排列顺序对应问题的解结构, 本文采用符号编码的方法, 以链路顺序直接作为染色体的编码方案, 其解用一个位串集合表示. 例如: 一个含有 9 条链路的链路集, 个体的一种基因排列可表示为 $(e_5, e_1, e_7, e_8, e_9, e_4, e_6, e_2, e_3)$. 在重组运算中, 为了保证种群的多样性特征, 本文采用一种基于顺序交叉

的改进方法. 首先, 在父代种群个体 A, B 中随机选择两个交叉位; 接着, 将 B 的交配区域加到 A 之前, A 的交配区域加到 B 之前, 得到子代个体 A', B' ; 然后, 在子代个体中依次删除与交配区相同的链路号码, 得到新的个体. 即使当两个父代串相同时, 该方法仍能产生一定程度的交叉效果, 维持群体的多样化特性. 整个过程如图 2 所示.

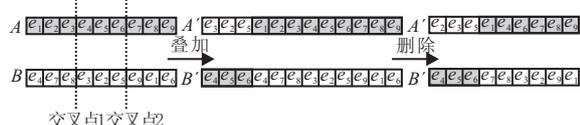


图 2 改进的顺序交叉法

在所有后代个体构成的基因组集合中, 每个子串按概率 P_m 进行变异操作. 本文采用逆转变异的方法, 在子串中随机选择两点, 将这两点的内容按照反序再插入到原位置中. 删除变异种群中具有相同基因值的个体以避免早熟; 另外, 为了保持群体的“生命力”, 同时又引入随机的新个体, 与删除的个体杂交, 保证种群中个体的数量.

具体算法如下:

输入: 路由图 $G'(V, E')$, 链路需求向量 R , 运行代数 G , 种群大小 K , 交叉概率 P_r , 变异概率 P_m ;

输出: 链路调度结果 (S, D) , 链路调度周期 T .

Step 1: 初始化:

Set $t = 0, P' = \phi$;

For $i = 1, 2, \dots, K$ do

Create an individual \bar{a}_i randomly;

$P = P \cup \{\bar{a}_i\}$.

Step 2: 种群评估:

For each individual $\bar{a}_i \in P$ do

Calculate the scheduling length T using OLLS which is used as the fitness value of the individual;

Assign a fitness value z_i to \bar{a}_i using OLLS.

Step 3: 种群再生:

Set $P' = \phi$;

For $i = 1, 2, \dots, K'$ do

Select two individuals $\bar{a}, \bar{b} \in P$ according to the roulette wheel scheme based on the fitness value;

Recombine \bar{a} and \bar{b} with the probability P_r , resulting a child individual \bar{c} ;

Mutate \bar{c} with the probability P_m ;

$P' = P' \cup \{\bar{c}_i\}$.

Step 4: 种群取代:

Replace the less fit individuals in population P with the children in offspring P' .

Step 5: 终止:

$t = t + 1$;

if $t \geq G$ or the required T is met then terminate
else go to Step 2.

将 OLLS 所求的调度周期 T 作为个体的适值函数. 本文使用轮盘赌法^[16], 即每个个体的被选择概率与其适值成正比, 从而在兼顾种群多样性特征的前提下尽可能选择最优个体进入下一代种群.

5 仿真及结果分析

在 Matlab 7.0 环境下评估算法. 正方形的网络部署区域中存在唯一 BS 节点, 且位于区域中心.

首先, 考察 36 个 MESH 节点网格方式的部署情况, 网格的边与节点通信半径相等, $R_c = 100$ m, 各节点通信需求为 0~5 中的任意整数. 种群中个体数目 $T = 40$, 个体长度为 36, 交叉概率 $P_r = 0.95$, 变异概率 $P_m = 0.01$. 路由算法采用 Dijkstra 算法, 各节点选择距离根节点最少的跳数作为路由路径.

图 3 为网络调度周期以及各链路的分配起止时隙随运行代数的变化情况. 初始时各节点的申请时隙总数为 58, 经过链路转发后, 网络总申请时隙数增加至 185. 图 3(a) 表示初始随机顺序下, 利用 OLLS 算法所获得的调度周期为 87; 图 3(b) 表示 20 代后, 调度周期减少至 79; 图 3(c) 表示 40 代后, 调度周期减少至 66; 图 3(d) 表示 60 代后, 调度周期减少至 58. 由文献[12]可知, 此时算法已经达到最优.

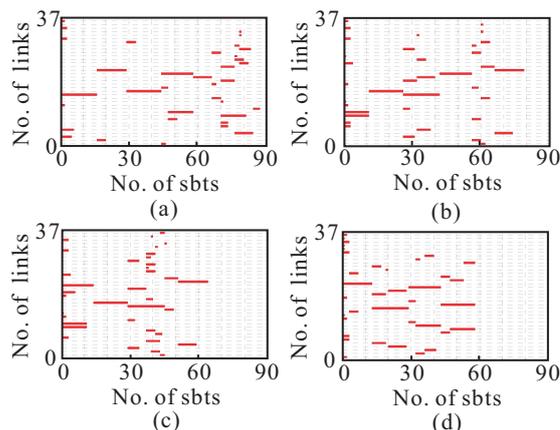


图 3 不同代数条件下各链路时隙分配及调度周期变化

图 4(a) 和图 4(b) 分别反映了网络调度周期数和链路并行率 (CUR) 随运行代数的变化情况, CUR 用于表示时隙的复用程度^[10]. 由图 4 可以看出, 随着代数的增加, 本文算法能较大幅度地减少网络调度周期, 增强链路的并行传输能力.

在 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 区域中随机投放 20~120 个节点, $R_c = 10$ m, 节点时隙需求为 0~5. 考察本文算法与 Nearest first^[6], Largest first^[12] 的性能对比情况.

图 5(a) 为调度周期随部署节点的变化情况, 可见调度周期随着部署节点的增加而增加, 主要由于部署

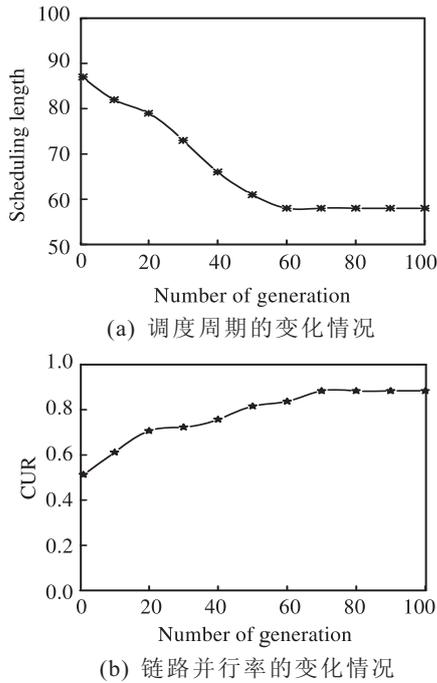


图4 调度周期与链路并行率随运行代数增加变化情况

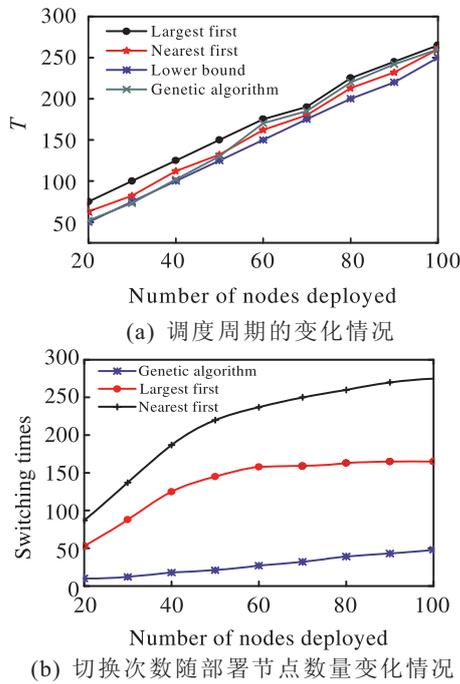


图5 调度周期与切换次数随部署节点数量变化情况

节点的增加引起时隙需求的增加. 基于GA的链路调度机制能获得与目前算法类似的性能曲线, 均接近于网络最优解(图5(a)中的Low bound曲线). 另外, 在基于GA的链路调度中, 各链路仅需要单次传输, 具有更低的实施复杂度. 图5(b)为交换次数随部署节点的变化情况. 交换次数定义为全网所有转发节点在接收和发送态之间的切换次数. 本文算法中每个节点所分配的时隙在时间段上连续, 在每帧中具有唯一的传输机会, 故每个转发节点在每帧中仅需要切换一次, 从而能大大减少切换的次数, 提高传输效率.

6 结论

区别于已有的链路调度算法, 本文从全局优化的角度出发, 对链路调度进行优化. 基于固定顺序待调度序列, 提出一种寻找最优调度周期的启发式算法, 并利用遗传算法的并行搜索、广泛寻优能力, 提出一种基于遗传算法的最优链路排序机制. 仿真结果表明, 本文提出的链路调度机制能够较大幅度提高时隙复用率, 增加链路的并行传输能力, 具有比现有链路调度算法更优的性能.

由于遗传算法在求解过程中初始种群及操作参数对寻优性能具有相当的影响, 本文未来的工作将集中于寻找一种优秀的种群初始化方法及合适的操作参数, 以期加快算法的求解速度.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I F, Wang X, Wang W. Wireless mesh networks: A survey [J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.
- [2] Jain K, Padhye J, Padmanabhan V, et al. Impact of interference on multi-hop wireless network performance[C]. Proc of MobiCom. San Diego: ACM press, 2003: 66-80.
- [3] Ramanathan S. A unified framework and algorithm for channel assignment in wireless networks[J]. Wireless Networks, 1999, 5(2): 81-94.
- [4] Sharma G, Mazumdar R, Shroff N. On the complexity of scheduling in wireless networks[C]. Proc of the ACM Mobicom. Los Angeles: ACM press, 2006: 227-238.
- [5] Gandham S, Dawande M, Prakash R. Link scheduling in sensor networks: Distributed edge coloring revisited[C]. Proc of IEEE Infocom. Miami: IEEE press, 2005: 2492-2501.
- [6] Salonidis T, Tassiulas L. Distributed dynamic scheduling for end-to-end rate guarantees in wireless ad hoc networks[C]. Proc of ACM MobiHoc. Illinois: ACM press, 2005: 145-156.
- [7] Fu L, Cao Z, Fan P. Spatial reuse in IEEE 802.16 based wireless mesh networks[C]. Proc of IEEE Int Symposium on Communications and Information Technology. Beijing: IEEE press, 2005: 1358-1361.
- [8] Wei H, Ganguly S, Izmailov R, et al. Interference-aware IEEE 802.16 WiMax mesh networks[C]. Proc of IEEE VTC. Dallas: IEEE press, 2005: 3102-3106.
- [9] Cao Y, Liu Z, Yang Y. A centralized scheduling algorithm based on multi-path routing in WiMAX mesh network[C]. Proc of IWCMC. Vancouver: IEEE press, 2006: 1-4.
- [10] Han B, Tso F P, Lin L, et al. Performance evaluation of scheduling in IEEE 802.16 based wireless mesh networks[C]. Proc of IEEE MASS. Vancouver: IEEE press, 2006: 789-794.