

无线 mesh 骨干网络的路由与调度联合优化算法

孙绍峰,张四海,卫 国,周武扬

(中国科学技术大学无线网络通信安徽省重点实验室,安徽合肥 230027)

摘要:在基于 TDMA 的无线 mesh 骨干网络中,考虑路由和调度的联合优化问题,最大化系统频谱利用率.综合考虑了节点业务、路径平均容量以及干扰等因素,提出了一种新型路由策略.对于汇聚网关的业务模式,提出了一种基于网关瓶颈极大团相关性的链路调度策略.考虑路由算法和调度算法的联合优化,设计了链路调度模块和路由模块的信息交互策略.仿真结果表明,该联合算法对于各种节点业务分布和各种干扰环境,均可很好地提高系统频谱利用率,在保证一定通信速率的情况下,节省了能量,实现绿色环保通信.

关键词:无线 mesh 网络;路由;调度

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A

Joint routing and scheduling interactively in wireless mesh backbone networks

SUN Shao-feng, ZHANG Si-hai, WEI Guo, ZHOU Wu-yang

(Wireless Information Network Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: The problem of jointing routing and scheduling in TDMA based wireless mesh backbone networks is studied. The objective is to maximize the spectrum efficiency. A novel routing algorithm is proposed, which jointly considers the traffic of nodes, the average capacity of paths, and the interference of links. Based on the correlation of the maximal clique at the bottleneck area, a novel link scheduling algorithm for the traffic pattern of Internet access is proposed. The joint optimization problem is solved by interactive feedback between two modules. Simulation results show that the proposed algorithms can significantly improve the system performance under various interference scenarios and save energy for effective communication.

Key words: wireless mesh networks; routing; scheduling

0 引言

随着无线网络技术的发展,无线 mesh 技术将成为下一代无线网络的关键技术.同有线网络相比,无线 mesh 网络具有可扩展性强、成本低廉、易架设等优点;与其他无线网络相比,无线 mesh 网络组织

形式和覆盖范围更灵活、功率消耗更低,是一种绿色环保的无线通信网络技术.因此,它将成为替代城市有线骨干网的一种有效解决方案^[1].图 1 给出了一个无线 mesh 骨干网络的应用场景,其中实线表示有线连接,虚线表示各种无线网络内部的无线连接,点划线表示各种网络之间采用有线连接或者无线连

收稿日期:2009-05-20;修回日期:2009-07-24

基金项目:中国瑞典国际合作基金(2008DFA11950)资助.

作者简介:孙绍峰,男,1983年生,博士生.研究方向:无线网络中的资源管理. E-mail: sfsun@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:卫国,教授. E-mail: wei@ustc.edu.cn

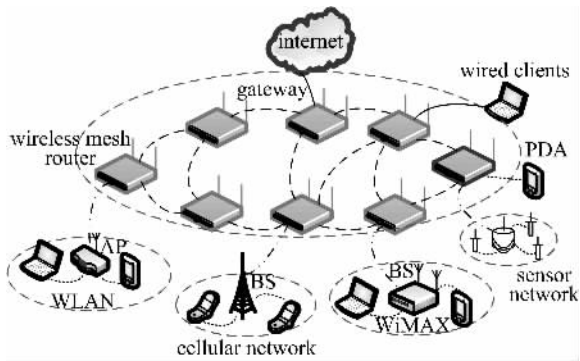


图 1 无线 mesh 骨干网

Fig. 1 Wireless mesh backbone network

接. 无线 mesh 骨干网络由静止的无线 mesh 路由器连接组成, 这些 mesh 路由器向各种网络如 WiFi、WiMAX、蜂窝网络和传感器网络等提供因特网接入服务, 其中一些 mesh 路由器可以作为网关, 通过有线连接到因特网. 在无线 mesh 网络中, 用户的分组通过一跳或者多跳方式进行传输^[1].

路由和链路调度, 作为无线 mesh 网络中极其重要的资源控制策略, 得到了广泛的关注和研究^[2~11]. Kodialam 等给出了无线 mesh 网络中联合路由和调度的链路可达速率的充分条件和必要条件, 并设计了一种多项式时间复杂度的常数因子近似最优 (n -approximation) 算法^[2]. Hong 等在无线中继网络中, 提出了线性规划路由算法和 makespan 链路调度算法, 并证明了其整体性能的 3-近似最优性^[3]. 但上述两文或者假设采用了完美的频率规划, 或者假设采用了可调波束智能天线技术, 均忽略了无线干扰, 而在现实系统中, 这种干扰是无法完全消除的. 但是考虑无线干扰后, 无论采用相对简单的协议层干扰模型, 还是采用更符合实际的物理层干扰模型, 最大化吞吐量问题都是一个 NP-hard 问题, 即使以某种因子接近最大吞吐量也具有 NP-hard 特性^[4,14]. 因此, 寻找联合路由和链路调度问题最优值的算法, 通常至少需要随节点数目指数增长的复杂度^[5,6]. 由于问题本身固有的复杂性, 现有工作主要集中在对近似算法和启发式算法的研究^[7~11], 期望得到更好的性能和实用性.

本文考虑无线 mesh 骨干网络中, 在给定各节点业务速率的要求下, 通过联合优化路由算法和链路调度算法, 最大化系统频谱利用率. 本文在综合考虑节点业务、路径平均容量并兼顾无线链路干扰的基础上, 提出了一种新的改进的 Dijkstra 路

由算法. 对于汇聚网关或相反的业务模式, 提出了一种基于网关瓶颈极大团相关性的链路调度策略, 并将调度结果反馈给路由模块, 调整节点业务流, 重新寻路, 更好地耦合路由和链路调度模块, 实现更有效的资源分配, 改善系统性能, 提高系统频谱利用率, 在保证一定通信速率的情况下, 节省了能量. 仿真结果表明, 本文所提的路由和调度算法, 相比于文献^[3], 具有更强的适用性, 对于不同的干扰环境和业务分布, 均可有效改善系统性能; 相比于文献^[5], 具有较低的复杂度, 适用于中等规模或大规模网络.

1 系统模型

考虑由 M 个无线 mesh 路由器 (mesh router, MR) 组成的无线 mesh 骨干网, 其中一个或多个 MR 通过有线连接到因特网, 作为网关和中心控制器 (gateway node, GN). 假设无线 mesh 骨干网采用 TDMA 协议^[3,12], 各节点间的数据传输是帧同步的, 一帧由若干时隙组成. 不失一般性, 假设所有 MR 均为单射频, 发射功率相同, 且工作在同一个信道上, 各 MR 的业务类型为接入因特网的下行 best-effort 业务. 假设只存在一个网关路由器 GN, 该路由器为各条业务流计算相应的路由结果, 并为承载业务的各条链路计算相应的调度时间.

无线 mesh 骨干网可以用一个简单的有向通信图 $G=(V, E)$ 来建模, 其中 V 为顶点集, E 为边集. 节点 $n_i \in V$ 代表无线 mesh 路由器, 其中 n_0 为网关节点, 假设网关节点无业务需求, 对于非网关节点 n_i 有一个接入因特网的下行业务流 γ_i , 各节点的发射功率 $P_{n_i} = P_0$. 对于无线信道的衰落, 假设只考虑大尺度衰落, 衰落因子为 α , 根据给定的接收信噪比门限 β , 可以计算出节点的最大传输距离 R_T , 如果 $d_{(i,j)} < R_T$, 则链路 $(i, j) \in E$, 其中 $d_{(i,j)}$ 为节点 n_i 和 n_j 的距离. 令 $c_{(i,j)}$ 表示 (i, j) 的信道容量, 假设所有链路均为双向链路, 故对于 $(i, j) \in E$ 有 $(j, i) \in E$, 且 $c_{(i,j)} = c_{(j,i)}$.

无线链路间的干扰可以分为两类: 基本干扰和次级干扰. 对于 E 中的任意两条不同的边 (i, j) 和 (k, l) , 如果有 $i \neq k, i \neq l, j \neq k, j \neq l$, 则 (i, j) 和 (k, l) 不存在基本干扰, 即基本干扰限制了多重发送、多重接收和同时收发. 对于次级干扰, 通常采用协议层干扰模型进行定义^[5]: 如果 ① $d_{(i,j)} < R_T$, ② $\forall n_k \in V, k \neq i, d_{(k,j)} \leq R_T, n_k$ 不处于发送状态, 则 (i, j) 无次级

干扰,其中 $R_I = \Delta * R_T$ 为干扰距离, Δ 为干扰因子,通常取 $1 \leq \Delta \leq 3$.

对于有向通信图 $G(V, E)$, 可以定义相应的通信冲突图 $G^c = (V^c, E^c)$ 来描述通信图 G 中各边的干扰关系, 其中 V^c 为顶点集, E^c 为边集. V^c 中的顶点与 E 中的边一一映射. 对于 $(i^c, j^c) \in E^c$, 表明 E 中映射到 i^c 和 j^c 的两条边互相干扰. 图的顶点独立集由互不相邻的顶点组成, 而最大顶点独立集是包含了最多可能包含的顶点数目的顶点独立集. V^c 中的顶点独立集即 E 中可同时传输的边集合, 定义 I_k , $k=1, \dots, K$ 为 V^c 中依次包含各节点的最大顶点独立集, $\forall k \neq j$ 有 $I_k \neq I_j$.

考虑在给定各节点业务需求的情况下, 以最大化端到端吞吐量和为目标, 联合路由和链路调度优化问题如下:

$$\max \sum_{i=1}^{M-1} \gamma_i \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{(i,j) \in E_{out}(i)} f_{(i,j)}^{s,d} - \sum_{(j,i) \in E_{in}(i)} f_{(j,i)}^{s,d} = \begin{cases} \gamma_i, & i = s \\ -\gamma_i, & i = d, \forall i, j, s, d \in V \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{(i,j) \in E_{out}(i)} \delta_{(i,j)} + \sum_{(j,i) \in E_{in}(i)} \delta_{(j,i)} \leq 1, \forall i, j \in V \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{\forall s} \sum_{\forall d} f_{(i,j)}^{s,d} \leq \sum_{(i,j) \in I_k} \lambda_k c_{(i,j)}, \forall i, j, s, d \in V \quad (5)$$

$$c_{(i,j)} = \begin{cases} \omega * \log\left(1 + \frac{P_0 g_{(i,j)}}{\omega \sigma^2}\right), & d_{(i,j)} < R_T, \\ d_{(k,j)} \leq R_I, & k \neq i, n_k \text{ 不发送} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$g_{(i,j)} = \frac{\lambda^2 / (4\pi)^2}{d_{(i,j)}}, \quad d_{(i,j)} = \|i - j\|^a \quad (7)$$

$$\delta_{(i,j)} \in \{0, 1\}, \quad 0 \leq \lambda_k \leq 1,$$

$$f_{(i,j)}^{s,d} \geq 0, \quad \forall i, j, s, d \in V, 1 \leq k \leq K \quad (8)$$

上述优化问题中, 式(1)给出了优化目标, 最大化各节点接入因特网的业务流之和; 式(2)描述了各节点的业务流守恒特性, 其中 $f_{(i,j)}^{s,d}$ 为从源节点 s 到目的节点 d 的经过链路 (i, j) 的业务流; 式(3)表示基本干扰限制; 式(4)描述了链路的可调度性限制,

其中 λ_k 代表最大顶点独立集 I_k 的调度时间比例; 式(5)给出了单条链路的业务流受链路容量和调度时间的限制; 式(6)和(7)描述了无线信道的容量计算模型.

该优化问题为混合整数规划问题^[10, 13], 对于任来源目的节点对, 有指数级别的路径数可供选择, 对于任意一组选好的路径, 在链路调度过程中, 寻找最大独立集是 NP-Complete 问题, 因此现有工作主要研究近似算法和启发式算法^[7~11].

2 联合路由和链路调度算法

2.1 改进的路由算法

对于各节点业务流方差较大的无线 mesh 骨干网络, 多径路由具有很好的负载均衡特性, 可以尽量避免链路过载, 从而提高系统的吞吐量^[15]. 对于干扰范围大的场景, 如果整个网络内任意两条链路都不能同时传输, 多径路由反而会降低系统的吞吐量, 而基于最大链路平均传输速率的加权 Dijkstra 算法可以生成最优路由树, 但是该算法在干扰较小或负载不均衡的情况下优势很小. 本节提出一种改进的 Dijkstra 路由算法, 根据节点的业务流信息、网络的拓扑信息, 以及链路的负载和干扰信息, 进行单路径或多路径寻路, 使得网关能够更灵活地处理 MRs 的各种不同业务需求. 本路由算法在干扰较大时, 会生成同基于最大链路平均传输速率的加权 Dijkstra 算法相同的生成树; 而在各节点业务流方差较大或干扰较小时, 可以在充分利用好路径的同时, 有效地寻找分离度较大的其他路径.

算法步骤如下:

(I) 初始化: 将节点按照业务流由大到小或按照与网关节点的距离由近到远排序, 将所有链路的占用率置为零, 网关按顺序选择第一个节点 n_i ;

(II) 采用基于最大链路平均传输速率的加权 Dijkstra 算法建立该节点到网关的路径 $P(n_i)$, 路径权重 $\omega_{P(n_i)} = \sum_{(i,j) \in P(n_i) \cap C(i,j)} \frac{1}{c_{(i,j)}}$;

(III) 检测生成树中的所有链路 (i, j) , 若存在满负载的链路, 则表明各节点业务流相对过大, 路由失败, 否则跳到 (IV);

(IV) 根据该节点的业务流需求, 建立业务流迭代区间 $[f_{\min}, f_{\max}]$, 选取 $f_{n_i} = (f_{\min} + f_{\max})/2$ 作为初始业务流, 计算路径 $P(n_i)$ 上各链路 $(i, j) \in P(n_i)$ 的业务传输时间占用率 $\text{TIME}_{\text{traff}}$, 同时计算受

链路 $(i, j) \in P(n_i)$ 干扰的其他链路的干扰时间占用率 TIME_{itf} ;

(V) 如果 $\text{TIME}_{\text{traff}} \geq 0$ 并且 $\text{TIME}_{\text{traff}} + \text{TIME}_{\text{itf}} \geq 1$, 即链路过载, 则令 $f_{\text{max}} = f_{n_i}$, 更新 $f_{n_i} = (f_{\text{min}} + f_{\text{max}})/2$, 返回(IV);

(VI) 如果 $f_{\text{max}} - f_{\text{min}} > \text{Iterative_Precision}$, 即迭代区间长度没有达到迭代精度要求, 则令 $f_{\text{max}} = f_{n_i}$, 更新 $f_{n_i} = (f_{\text{min}} + f_{\text{max}})/2$, 返回(IV);

(VII) 当前 f_{n_i} 即为链路 $P(n_i)$ 所能支持的最大业务流, 此时更新该节点业务流, 更新所有链路的业务占用率和干扰占用率, 对于 $\text{TIME}_{\text{traff}} + \text{TIME}_{\text{itf}} \geq 1$ 的链路, 将其标志为满负载;

(VIII) 对于 $\text{TIME}_{\text{traff}} \geq 0$ 的满负载链路 (i, j) , 将所有对 (i, j) 有干扰的链路标志为满负载;

(IX) 如果当前节点无剩余业务流, 则选择下一个节点, 否则继续对当前节点进行路由, 跳到(II); 如果所有节点业务流均被满足, 路由成功结束.

步骤(IV)~(VI)为算法核心部分, 对于节点 n_i 寻找到的一条路径 $P(n_i)$, 进行业务流可行性迭代. 如果该路径不能够满足节点 n_i 的业务流需求, 则本算法会寻找其他路径.

2.2 链路调度算法

在给定路由图的情况下, 链路调度算法得到了广泛的研究^[7,9]. 对于协议层干扰模型, 链路调度算法的性能受路由图的最大团边集限制, 而对于一般图, 寻找最大团为 NP-Complete 问题. 文献[7]通过增加冲突边将冲突图 G^c 转化成弦图, 应用完美图的消去理论, 在多项式时间内生成最优链路调度集合. 然而, 冲突图 G^c 发生了变化, 此时生成最优链路调度集合未必是原问题的最优链路调度集合.

对于汇聚网关或相反的业务模式, 网关附近的链路通常具有较大的链路占用率, 整个网络的最大团边集以很大概率出现在网关附近. 因此, 本节提出了一种基于网关瓶颈极大团相关性的贪婪式调度算法: 首先贪婪地生成网关附近链路的极大团边集合, 对于不属于极大团的边, 根据其其与极大团中边的相关度进行排序; 然后贪婪地寻找可同时传输的边, 生成链路调度集合. 本算法可以避免在极大团边集非空的情况下, 出现不包含极大团内任何边的链路调度集合, 从而以一定概率减少总体调度时间. 在最坏情况下, 即干扰半径非常大以至于最大团边集合包含所有边, 本算法复杂度为 $O(N^2)$.

调度算法如下:

(I) 初始化: 令极大团边集合 CL_{max} 为空, 寻找链路集合 $L = \{(i, j) \mid i = n_0 \text{ or } j = n_0\}$, n_0 为网关节点, 将 $(i, j) \in L$ 添加到 CL_{max} , 同时将 $(i, j) \in CL_{\text{max}}$ 按照权重 $\omega_{(i,j)} = \frac{1}{c_{(i,j)}} \sum_{\forall s,d \in V} f_{(i,j)}^{s,d}$, $\forall s, d \in V$ 由大到小排序;

(II) 寻找与 CL_{max} 中所有元素都互相干扰的边集合 IL , 在集合 IL 中寻找边 $(i^*, j^*) = \max_{(i,j) \in IL} \omega_{(i,j)}$, $\forall s, d \in V$, 将 (i^*, j^*) 添加到 CL_{max} ; 重复本次操作, 直到无法再发现新的可添加的边;

(III) 对于 $(i, j) \notin CL_{\text{max}}$, 计算 (i, j) 与所有 $(i', j') \in CL_{\text{max}}$ 的干扰相关度, 即与 (i, j) 相互干扰的 $(i', j') \in CL_{\text{max}}$ 的数目, 作为 (i, j) 的权重, 按照权重对 $(i, j) \notin CL_{\text{max}}$ 进行排序;

(IV) 根据排序后的结果, 首先选择 $(i', j') \in CL_{\text{max}}$, 再对 $(i, j) \notin CL_{\text{max}}$ 依次查找, 贪婪地寻找可同时传输的最大独立边集.

2.3 联合路由和链路调度

链路过载会导致路由失败. 本节考虑如何将链路调度的结果反馈给路由模块, 增加路由算法的成功概率和系统的频谱利用率. 路由和调度的联合及反馈机制如图 2, 其中, Δ_r 表示路由算法中考虑的干扰因子, η 为干扰缩小因子, $0 < \eta < 1$, Th 为路由失败时的干扰因子门限. 通过逐渐减小干扰距离 $R_l = \Delta_r R_l$, 寻找分离度较大的多路径路由, 实现负载均衡. 如果各节点业务流超出了整个网络的承受能力, 则需要将业务流按比例缩小, μ 为业务流缩小因子.

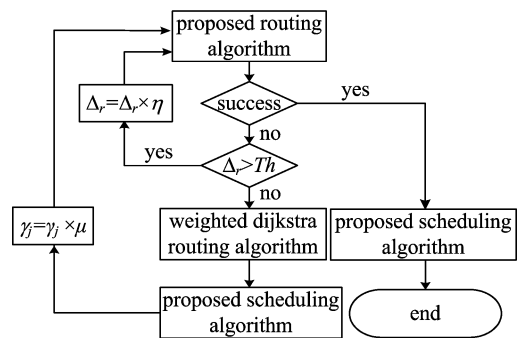


图 2 路由和调度的联合及反馈机制

Fig. 2 Jointing Routing and Scheduling by feedback adjustment

3 仿真实验与结果分析

本节通过数据仿真, 对前述的基于最大链路平

均传输速率的加权 Dijkstra 算法和随机链路调度算法,以及本文提出的路由算法和基于网关瓶颈极大团相关性的调度算法,进行了性能比较. 仿真场景包括 11×11 个节点的标准网格场景和节点位置随机抖动 10% 的网格场景,网关位于场景的左下角顶点,仿真中的无线参数见表 1.

图 3 至图 6,给出了在标准网格场景下,不同干扰限制和不同业务分布情况下,两种路由算法和两种调度算法(四种组合)的频谱利用率随节点距离变化的情况. 图 3 和图 4 对比了只存在基本干扰情况下的各种算法的性能. 由于只存在基本干扰,所以任何两条无公共节点的边均可同时传输,此时系统频

谱利用率受限于链路的信道容量,因此随着距离的增大,系统频谱利用率逐渐下降.

表 1 无线参数

Tab. 1 Wireless parameters

参数种类	参数值
带宽	5 MHz
信道衰减因子	3
发射功率	30 dBm
载波频率	2.4 GHz
接收信噪比门限	5 dB
天线增益	20 dBi
噪声功率	-174 dBm/Hz

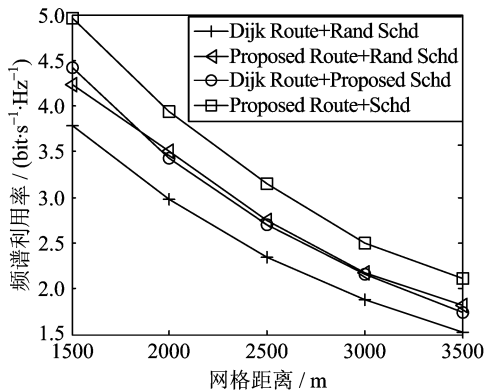


图 3 规则场景下考虑只有基本干扰和节点业务空发时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 3 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with basic interference only and burst traffic considered in regular grid scene

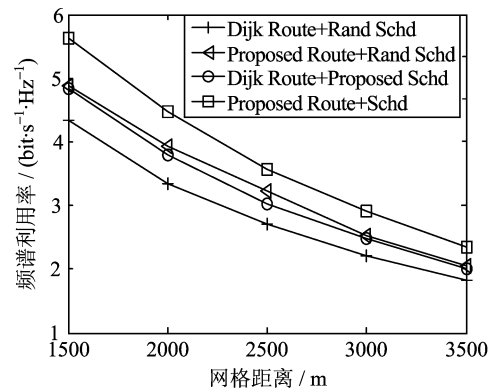


图 4 规则场景下考虑只有基本干扰和节点业务均匀分布时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 4 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with basic interference only and uniformly distributed traffic considered in regular grid scene

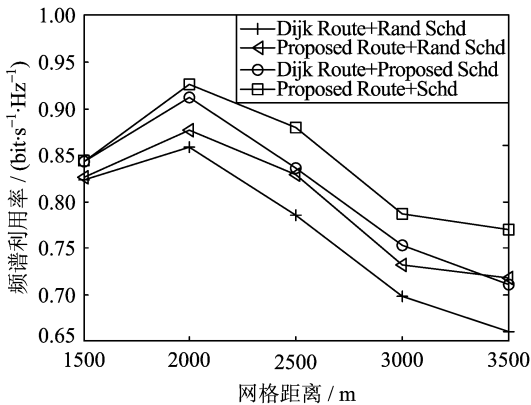


图 5 规则场景下 $\Delta=2.5$, 节点业务突发时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 5 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with $\Delta=2.5$ and burst traffic considered in regular grid scene

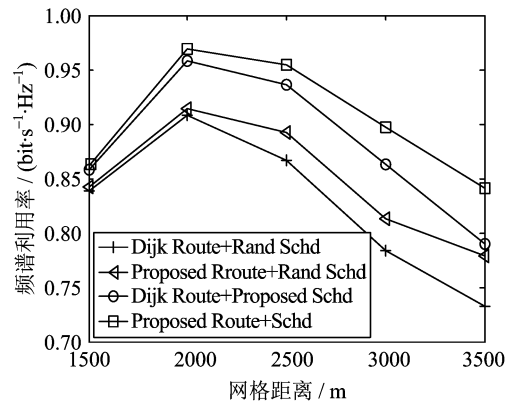


图 6 规则场景下 $\Delta=2.5$, 节点业务均匀分布时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 6 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with $\Delta=2.5$ and uniformly distributed traffic considered in regular grid scene

图 5 和图 6 对比了 $\Delta=2.5$ 的情况下各种算法的性能. 图中曲线存在上升的折点, 是因为干扰半径 R_i 是固定的, 网格节点间距离的变化, 会导致同时传输链路数目的变化, 即空间频率复用率的变化. 此时系统频谱利用率不仅仅受限于链路的信道容量, 同时也受限于整个网络的空间频率复用率. 随着距离的增大, 如果空间频率复用率增大的效果大于链路信道容量减小的效果, 则系统频谱利用率会上升.

图 7 至图 10, 给出了网格中各节点位置存在节点间距 10% 扰动的场景下, 各种算法随节点间距变化的情况. 图 7 和图 8 对比了各种算法在只存在基本干扰时的性能, 图 9 和图 10 对比了 $\Delta=1$ 时各种算法的性能. 同标准网格场景相比, 所提算法的性能

提升程度相对下降. 以节点距离等于 3 000 m 为例, 在规则网格场景下, 所提算法性能同加权 Dijkstra 路由算法和随机调度算法相比, 提升了 13% ~ 35%; 而在节点扰动的前提下性能提升了 6% ~ 22%. 这是因为网络拓扑的不规则, 会导致某些链路的性能下降, 从而导致整条路径的性能下降和多路径间的性能差异的增大, 从而使系统的整体性能同规则网络相比会有一定程度的下降.

4 结论

本文在基于 TDMA 的无线 mesh 骨干网络中, 设计了路由和链路调度的联合优化策略. 首先提出了一种综合考虑节点业务、路径平均容量并兼顾干

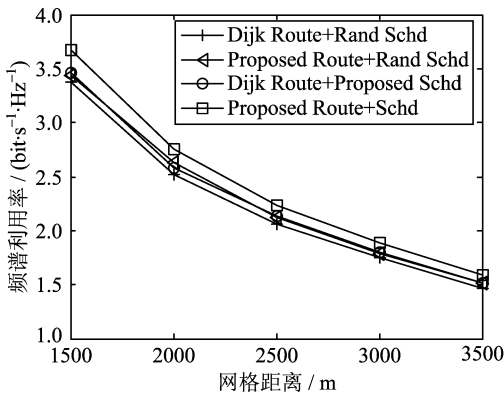


图 7 非规则场景下考虑只有基本干扰和节点业务突发时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 7 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with basic interference only and burst traffic considered in irregular grid scene

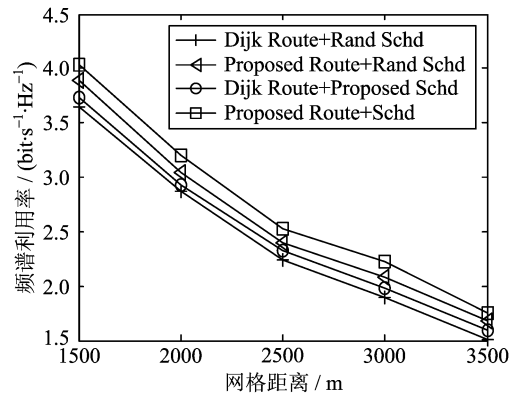


图 8 非规则场景下考虑只有基本干扰和节点业务均匀分布时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 8 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with basic interference only and uniformly distributed traffic considered in irregular grid scene

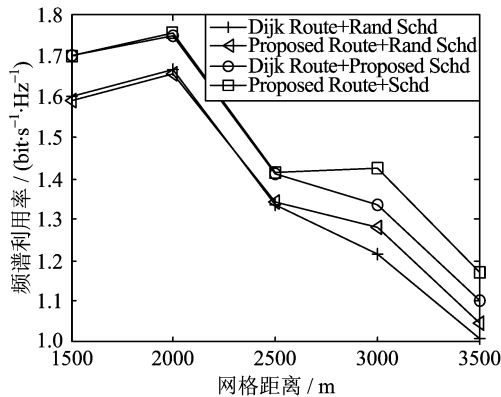


图 9 非规则场景下 $\Delta=1$, 节点业务突发时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 9 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with $\Delta=1$ and burst traffic considered in irregular grid scene

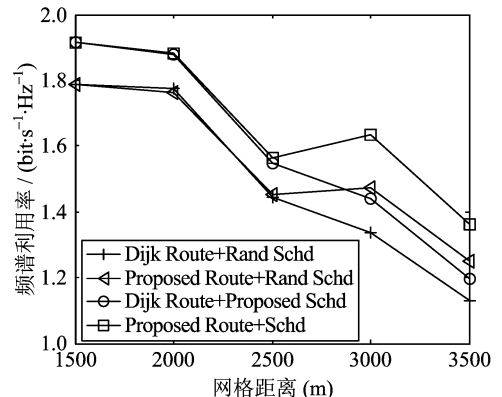


图 10 非规则场景下 $\Delta=1$, 节点业务均匀分布时 4 种算法的频谱利用率性能对比

Fig. 10 Spectrum efficiency performance comparison of four algorithms with $\Delta=1$ and uniformly distributed traffic considered in irregular grid scene

扰的新型路由策略,在有效利用最佳路径的同时,寻找分离度相对较大的其他路径,从而降低了限制链路调度的最大团边集合;然后提出了一种基于网关瓶颈极大团相关性的贪婪式调度策略,以很低复杂度和很大概率寻找到制约调度的最大团边集合,避免在极大团边集非空的情况下,出现不包含最大团内任何边的链路调度集合;最后实现了路由模块和链路调度模块的相互调整过程.仿真结果表明,该联合策略算法适用于各种节点业务分布和各种干扰环境,可以有效提高系统频谱利用率,在保证一定通信速率的情况下,节省了能量.

参考文献(References)

- [1] Akyildiz I, Wang Xu-dong, Wang Wei-lin. Wireless mesh networks: a survey [J]. *Computer Networks*, 2005, 47(4): 445-487.
- [2] Kodialam M, Nandagopal T. Characterizing achievable rates in multi-hop wireless mesh networks with orthogonal channels[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2005, 13(4): 868-880.
- [3] Hong Chi-yao, Pang Ai-chun. 3-approximation algorithm for joint routing and link scheduling in wireless relay networks [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(2): 856-861.
- [4] Jain K, Padhye J, Padmanabhan V N, et al. impact of interference on multi-hop wireless network performance [J]. *Wireless Networks*, 2005, 11(4): 471-487.
- [5] Viswanathan H, Mukherjee S. Throughput-range tradeoff of wireless mesh backhaul networks [J]. *IEEE Journal on Selected areas in Communications*, 2006, 24(3): 593-602.
- [6] Badia L, Erta A, Lenzini L, et al. A general interference-aware framework for joint routing and link scheduling in wireless mesh networks [J]. *IEEE Network*, 2008, 22(1): 32-38
- [7] Wang B, Mutka M, Torng E. Optimization based rate allocation and scheduling in TDMA based wireless mesh networks [C] //Proceedings of 16th IEEE International Conference on Network Protocols. Los Alamitos: IEEE Computer Soc, 2008:147-156.
- [8] Wang Wei, Liu Xin, Krishnaswamy D. Robust routing and scheduling in wireless mesh networks [C] // Proceedings of 2007 4th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks. New York: IEEE, 2007: 471-480.
- [9] Zou Jun, Zhao Dong-mei. G-BFS: A scheme for scheduling real-time CBR traffic in IEEE 802. 11-based mesh networks [C] //Proceedings of 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York: IEEE, 2007: 4 268-4 273.
- [10] Molle C, Peix F, Rivano H. An optimization framework for the joint routing and scheduling in wireless mesh networks [C] //Proceedings of IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. New York: IEEE, 2008: 1-5.
- [11] Papadaki K, Friderikos V. Joint routing and gateway selection in wireless mesh networks [C] //Proceedings of WCNC2008: IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York: IEEE, 2008: 2 325-2 330.
- [12] Leoncini M, Santi P, Valente P. An STDMA-based framework for QoS provisioning in wireless mesh networks [C] //Proceedings of 2008 Fifth IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. New York: IEEE, 2008: 223-232.
- [13] Huang Shu, Dutta R. Design of wireless mesh networks under the additive interference model [C] // Proceedings of 15th International Conference on Computer Communications and Networks. New York: IEEE, 2006: 253-260.
- [14] Arikan E. Some complexity results about packet radio networks [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1984, 30(4): 681-685.
- [15] Jones E P C, Karsten M, Ward P A S. Multipath load balancing in multi-hop wireless networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications: Vol 2. New York: IEEE, 2005: 158-166.