

文章编号:1000-582X(2011)02-026-06

多接口无线 mesh 网络的信道时空分配

胡致远, 郭建丁, 王 景, 苏家勇

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对多接口无线 mesh 网络信道分配中存在的共享接口信道依赖问题和网络拓扑改变所导致的链路失效问题,提出了基于图分解的联合空间与时间域的信道分配方法。该方法将信道分配从空间域拓展到时间域,将网络拓扑分解为多个时隙上的子图,然后对每个子图运用图着色算法实现信道分配。该方法中,每个时隙上的子图根据网络约束条件动态获得信道资源,从而提高了无线 mesh 网络信道分配的效率。通过仿真分析对比了静态信道分配方法,这种信道的时空分配方法能够有效抑制信道分配中产生的波及效应以及信道切换导致的链路失效等消极因素的影响,从而在满足接口数目约束、信道数目约束等约束条件下将无线 mesh 网络吞吐量提高 30% 以上。

关键词:无线 mesh 网络;无线接口;信道分配;图着色算法;吞吐量

中图分类号:TP393

文献标志码:A

Spatio-temporal channel assignment in multi-radio wireless mesh networks

HU Zhi-yuan, GUO Jian-ding, WANG Jing, SU Jia-yong

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A method of spatio-temporal channel assignment based on graph decomposition was proposed to solve the ripple effect and link failure problem in multi-radio wireless mesh networks. Network topology was decomposed into subgraphs in several time slots to extend channel assignment from spatial domain to time domain. Then, graph coloring algorithm was used to optimize the channel assignment on the basis of the subgraph in each time slot. Each subgraph obtained channel resource dynamically according to the network constraints to improve the channel assignment efficiency. Simulation results show that, compared to static channel assignment scheme, the impact of negative factors, such as the ripple effect and link failure caused by channel switching, are effectively confined with this strategy. The network throughput is increased at least by 30% while satisfying the constraints on the number of radios and the number of network channels.

Key words: wireless mesh networks; wireless interface; channel assignment; graph coloring algorithm; throughput

无线 mesh 网络^[1]是由无线路由器组成的多跳网络。对于无线 mesh 网络来说,节点间的干扰会使网络的传输性能严重降级。为了降低 mesh 网络

节点间干扰和提高网络吞吐量,一些研究者提出了多接口^[2]无线 mesh 网络的概念,每个节点都配备有多个接口,即无线收发器单元,每个接口都具有完整

收稿日期:2010-09-21

基金项目:国家高新技术研究发展 863 计划资助项目(2008AA01Z202);国家自然科学基金资助项目(60872038);“211 工程”三期建设资助项目(S-09102);中央高校基本科研业务资助项目(CDJRC10160005)

作者简介:胡致远(1965-),男,重庆大学副教授,主要从事无线接入网络、核心网方向研究,(Tel)13452056752;
(E-mail)hzy@cqu.edu.cn。

的物理层和介质访问控制层,独立工作互不影响。通过给每个接口分配信道可以使同一无线冲突域内的多个节点工作在不同的信道上传输信息而不发生冲突,从而降低了网络干扰和提高了网络的吞吐量。无线 mesh 网络多信道技术下的信道分配问题可分为两类,第一类在网络拓扑不发生变化的情况下为网络节点长时进行静态分配信道,第二类每隔一定的短时间间隔进行动态信道分配^[3](如图 1 所示)。

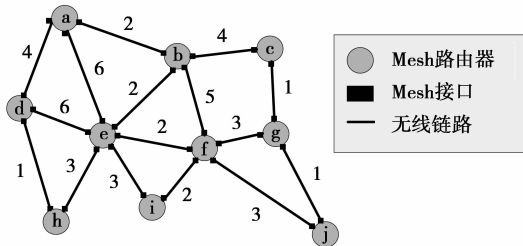


图 1 多接口无线 mesh 网络举例,10 个路由器,6 个信道,链路上的数字表示使用的信道

但是在有限的频谱带宽内,可使用的信道数目是有限的,如 IEEE 802.11b/g 和 802.11a 分别提供了 3 和 12 个非重叠信道。有限的信道资源会使一些逻辑链路在可选择的拓扑条件下复用同 1 个信道,如图 1 中逻辑链路(a,d)和(b,c)同时使用信道 4。另外每个路由器有限的接口数会使该路由器关联的一些链路共享同一个接口,这些逻辑链路由于使用公共信道而不能同时工作,如图 1 中逻辑链路(e,h)和(e,i)共享同一个接口以维持网络连接。接口的共享问题同时会引起信道依赖问题,导致波及效应^[4]。同样在图 1 中链路(a,b)和(b,e)在路由器 b 处共享同一个接口,(b,e)和(e,f)在路由器 e 处共享同一个接口,(e,f)和(f,i)在路由器 f 处共享同一个接口,当链路(a,b)切换到一个新的信道上时,链路(b,e)、(e,f)和(f,i)也要切换到相同信道,这种波及效应很可能会影响其它链路信道分配的有效性。

无线 mesh 网络信道分配问题中存在的另外一个问题是不合理的信道分配可能会改变网络拓扑^[5]。考虑 1 个简单的例子如图 2 所示,节点 d 配有 3 个接口,而节点 a,b,c 配有 1 个接口,图 2(a)为所有链路分配信道 1 后维持最大网络连接的原始网络拓扑,而图 2(b)为最小化网络干扰而进行信道分配后的网络拓扑,可见不同的信道分配得到的网络拓扑也不同。网络拓扑的改变会带来一些消极影响。第一,节点的失效会造成网络分化,如图 2(b)

中节点 d 失效后所有的链路都失效;其次,拓扑改变会改变路由,图 2(a)中节点 a 到节点 b 只需要 1 跳,而图 2(b)中节点 a 到节点 b 需要 2 跳;第三,拓扑改变还可能会影响已存在的业务流,即正在发送的业务可能由于信道的突然切换而中断。因此 1 个合理的信道分配算法应该避免以上问题。

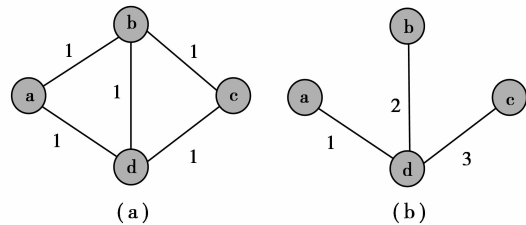


图 2 网络拓扑和可变信道分配

针对以上无线 mesh 网络中存在的一些问题,目前很多研究者对多接口无线 mesh 网络中的信道分配问题作了很多研究工作。文献[6]指出在任意的无线 mesh 网络拓扑下用图着色问题去解决信道分配问题在计算复杂度上是 NP-Hard 的。文献[7]为了适应多信道技术对 IEEE 802.11 MAC 协议进行了修改。文献[8]中的信道分配算法根据每个链路上的总业务量、距离网关节点的跳数和节点的接口数为链路分配优先级,然后按照优先级次序为链路静态分配信道。文献[4]为了避免无线 mesh 网络中的波及效应提出了逻辑拓扑设计和接口分配策略,但可能会改变路由。文献[9]在无线 mesh 网络连接图的基础上生成多接口冲突图,然后用 List-coloring 的方式给冲突图的每个节点分配多个信道以保证邻居节点的信道列表不重叠,以达到最小化网络干扰的目的。文献[10]在给定网络逻辑拓扑的情况下,把信道分配、接口分配和接入控制问题相结合以提高网络总吞吐量。

针对多接口无线 mesh 网络信道分配问题中存在的上述问题提出了一种基于图分解的时隙信道分配策略,该方案把信道分配从空间域拓展到时间域。方案根据通信节点间的传输路径在每个时隙构造 1 个子图,然后针对该子图运用图着色算法优化每个时隙的信道分配,提高时隙链路信道分配效率。该方法相比各种静态信道分配方案具有明显的优势,能够有效抑制信道分配中产生的波及效应以及信道切换导致的链路失效等消极因素的影响,进一步在满足节点接口数约束、信道数约束等约束条件的情况下有效地降低了网络干扰和提高了网络吞吐量。

1 问题描述

1.1 无线 mesh 网络中信道分配问题主要约束

无线 mesh 网络中信道分配问题主要约束^[6]包括:①网络中可用信道数是固定的;②分配给每个 mesh 路由器的信道数受该路由器接口数的限制;③互相通信的 2 个节点必须绑定在 1 个公共信道上;④共享相同信道的各个干扰链路上期望发送的业务负载总量不能超过信道容量。正是由于这些约束使得传统的信道分配问题的研究方法不能直接应用到无线 mesh 网络中,比如传统的节点集合着色不能保证邻居通信节点分配到相同信道^[11]。边着色不能保证每个路由器的接口数和需要着色的边相匹配。约束边着色虽然基本上满足了节点接口数和需要着色边数的匹配,但未考虑链路上的业务负载。

1.2 网络模型与假设

假设 mesh 路由器分布在平面上,每个 mesh 路由器的全向天线配有 1 个或多个接口,则 mesh 路由器间的连接可以用无向图 $G(V, E)$ 来表示,称为连接图(connectivity graph),如果节点在彼此的通信距离之内,它们之间就用一条边连接。图 3 中假设节点干扰域为其通信域的 2 倍,图 3(a)为单接口情况下 4 个节点组成的 5 条边组成的连接图。由于连接图的链路之间存在潜在干扰,这样以连接图为基础可以得到描述网络干扰模型的冲突图 $G_c(V_c, E_c)$ (conflict graph),连接图中的每条边对应冲突图中的 1 个节点,如果连接图中的链路相互存在干扰,在冲突图中对应的节点用 1 条边连接,因此,冲突图更直观的表示了网络中的干扰情况。图 3(b)为图 3(a)对应的冲突图,该图的 5 个节点对应 3(a)中的 5 条边。图 3(c)为节点 B 配有 2 个接口的情况下的多接口连接图(multi-radios connectivity graph),图 3(d)为图 3(c)对应的多接口冲突图(multi-radios conflict graph)。由于多接口冲突图比较复杂,常用单接口连接图近似表示多接口冲突图。

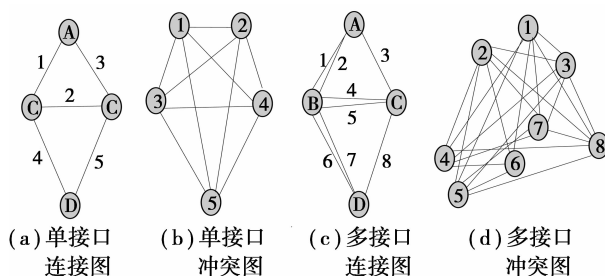


图 3 连接图和冲突图举例

在以上连接图的基础上对网络模型作如下假设:①假设网络中有 N 个节点,对于每个节点 $i \in N$,其对应的接口数为 $R_i, R_i \geq 2$,不要求所有节点有相同的接口数。非重叠信道集合 $\kappa = \{1, 2, \dots, F\}$,图 $G(V, E)$ 和 $G_c(V_c, E_c)$ 分别表示网络连接图和冲突图, $V_c = \{l_{ij} | (i, j)\}$ 为冲突图的顶点集, (i, j) 是通信链路, E_c 为冲突图的边集。如果对冲突图进行节点着色,则网络干扰就是对冲突图着色后单色边的数目;②节点 i 处的传输功率支持链路 (i, j) ,并且功率值 P_{ij} 和节点 i 和 j 的欧氏距离有关系 $P_{ij} = P_0 d_{ij}^{-\alpha}$,其中 α 是值在 2 到 4 之间的衰落参数,节点 i 处的最大传输功率为 $P_{\max}, P_{\max} \geq P_{ij}$,假设节点没有任何功率控制措施,节点可以和其传输范围内的任何节点进行通信。

2 无线 mesh 网络中基于图着色的信道分配问题

在理想条件下,假设每个 mesh 节点都配备足够的接口数用来和邻居节点通信,运用强边着色(距离 2 着色)理论^[13]可知任意网络拓扑下信道分配后所用信道数的范围为 $\Delta \leq \chi \leq 2\Delta^2 - 2\Delta + 1$,其中 Δ 是连接图中节点的最大度。由此可知对于规则的矩形网格拓扑来说,所用信道数的范围为 $4 \leq \chi \leq 25$ 。文献^[14]证明了当 Δ 为偶数时强边染色的上界为 $5/4\Delta^2$,当 Δ 为奇数时上界为 $1/4(5\Delta^2 - 2\Delta + 1)$,因此矩形网格拓扑所用信道数的界限可进一步精确到 $4 \leq \chi \leq 20$,因此对于任意大的矩形网格拓扑来说,节点接口数充足时最多用 20 个信道就能保证网络无干扰通信。

由于不同图着色算法可以适用于不同的网络环境,对于无线 mesh 网络来说也可以在冲突图的基础上采用节点着色算法来分配信道。求最大团(最大完全子图)子问题是信道分配中求信道数下界的有效方法^[15],获得无线 mesh 网络冲突图的最大团数(最大团中的节点个数)可以近似得到理想情况下信道分配所用信道数的下界,特别是对于规则拓扑来说更是如此。

3 约束情况下基于图分解的时隙信道分配策略

3.1 约束条件数学定义

以上分析了理想状态下无线 mesh 网络中的静态信道分配问题,但实际上无线 mesh 网络中可用信道数和节点接口数是有限的,并且静态信道分配不能很好的适应业务负载的变化。因此合理的信道

分配算法应根据网络中的业务负载变化、信道数和节点接口数等约束来优化信道分配。鉴于这种情况,提出了一种基于图分解的时隙信道分配策略,该方案把信道分配从空间域拓展到时间域,在每个时隙根据节点间的通信路径给连接图的部分链路分配信道,在子图上根据业务负载变化、信道数和节点接口数等约束来优化时隙信道分配。从另一个角度来考虑,正是基于图分解的时隙信道分配方案对各种约束条件的良好适应性,才避免了各种静态信道分配所带来的波及效应以及动态信道切换导致的链路失效等消极因素的影响。

定义 $G(V, E)$ 表示 mesh 网络连接图, $G_t(V_t, E_t)$ 表示某个时隙 t 对应的子图, $G_t \subseteq G$, 其中 V_t 为时隙 t 有业务发送的节点集, $V_t \subseteq V$, E_t 表示时隙 t 承载业务的边集, $E_t \subseteq E$ 。定义 $C = [C_{ef}; e \in E_t, 1 \leq f \leq F]$ 表示 $|E_t| \times F$ 二进制信道分配矩阵, 其中 F 为总的可用信道数, f 为分配的可用信道, $C_{ef} = 1$ 表示在时隙 t 子图 G_t 的边 e 分配了信道 f 。定义 $\vec{X} = [X_1, X_2, \dots, X_{|E_t|}]^T$ 表示 $E_t \times 1$ 二进制向量, $X_e = 1$ 表示在时隙 t 边 e 合理地分配了信道而不与 E_t 中的其它边干扰, 因此每个时隙 t 基于图分解的时隙信道分配策略的优化目标为 $\text{maximize} \sum_{e \in E_t} X_e$ 。定义 $Y = [Y_{vf}; v \in V_t, f \in \kappa]$ 表示 $|V_t| \times F$ 矩阵, $0 \leq Y_{vf} \leq 1$, $Y_{vf} = 1$ 表示在时隙 t 子图 G_t 的某个节点 v 关联的至少一条边分配了信道 f , 因此 $\forall v \in N, f \in \kappa, Y_{vf} \geq C_{ef}$, 其中 e 为节点 v 关联的任一条边。基于以上定义, 约束情况下信道数约束和节点接口数约束如下

节点接口数约束

$$\sum_f Y_{vf} \leq R_i; \forall v \in N, f \in \kappa. \quad (1)$$

信道数约束

$$\sum_{e \in E_t} X_e \leq F; \forall e \in E. \quad (2)$$

3.2 算法描述

提出的约束情况下基于图分解的时隙信道分配算法假设在一定的时间间隔内无线 mesh 网络的拓扑结构保持不变, 每个路由器节点承载的总业务量基本不变, 且任意 2 个节点间的通信路径在进行信道分配前已经确定, 可以是最短路径路由或负载均衡路由等, 系统工作在同步时隙模式, 每个时隙的长度为 τ , 每个时隙 1 条链路只能使用 1 个信道而不进行信道切换。

在以上定义和假设的基础上, 算法的输入为连接图 $G(V, E)$ 、可用信道数 F 、每个节点可用接口数

R_i 以及通信节点间的传输路径。算法采用启发式贪心算法, 即在每个时隙总是尽最大能力提高时隙的信道分配效率, 而在每个时隙进行信道分配时采用启发式强边着色算法。算法流程如下

1) 首先, 在连接图中, 根据第一个时隙要发送业务的各个源目的节点对 (s, d) 所确定路径的第一跳边构造子图 G_1 ;

2) 对 1) 中的子图 G_1 检验该子图中每个节点关联的边数是否满足节点接口数约束式(1), 对于关联的边数大于节点接口数的节点, 随机删除必要的边使其关联的边数恰好等于节点接口数, 重新构造子图。由于节点接口约束删除的边延迟到下个时隙进行信道分配;

3) 对 2) 中重新构造的满足接口数约束的子图进行信道分配, 这里采用强边着色算法对子图进行信道分配, 并使其满足信道数约束式(2)。若在分配过程中某些边违反约束式(2), 则在子图中删除必要的边, 并补充这些边到下个时隙的子图中进行信道分配;

4) 在对 3) 中的子图成功进行信道分配的基础上, 适当增加一些节点对的下一跳边补充到已完成信道分配的子图上, 并在满足约束条件式(1)和(2)的基础上对这些边进行信道分配。这样做的目的是使每个时隙为尽可能多的边分配信道以提高时隙的信道分配效率。同时把该时隙对应子图的所有边的信道分配情况记录到时隙信道分配表 $L_1 = (L_e = f; e \in E_1, f \in \kappa)$ 中;

5) 下一时隙根据各个源目的节点对所确定的通信路径上未分配信道的下一跳边构造子图, 并把 2) 和 3) 中不满足约束条件的边补充到该子图上组成新的子图, 然后回到步骤 2) 重新检验约束条件以更新每一时隙的子图来合理进行信道分配。若该时隙的子图包含的边中有部分边在上一时隙已经分配了信道, 则这些边在该时隙分配的信道应尽量和上一时隙分配的信道保持一致以尽量减少信道切换带来的开销;

6) 依次重复 5) 中的过程, 直到所有的源目的节点对所确定的通信路径的所有边在经过一定的时隙后都完成了信道分配, 算法终止。

需要指出的是, 可能同一时隙有某些源目的节点对所确定的通信路径上的下一跳边或由于接口约束和信道数约束补充到该时隙子图上的边是同一条边, 这样在子图上可能形成多重边, 这种情况下每个时隙只对该多重边中的一条进行信道分配, 因此多重边情况下需要几个时隙才能完成信道分配, 且每

个时隙应尽量分配相同的信道以减少信道切换带来的开销。因此各个源目的节点对间的通信路径应尽量不交叉,以避免子图中出现多重边的情况。

如图 1 所示的无线 mesh 网络连接图,假设在一定时间间隔内节点对 (h,a) 、 (i,b) 、 (j,c) 和 (d,g) 之间有业务发送, (h,a) 通信经过 $h-d-a$ 和 $h-e-a$ 2 条路径, (i,b) 通信经过 $i-e-b$ 和 $i-f-b$ 2 条路径, (j,c) 通信经过 $j-f-b-c$ 和 $j-g-c$ 2 条路径, (d,g) 通信要经过路径 $d-e-f-g$, 同时假设网络可用信道数 $F=4$ 。按照上述信道分配算法各时隙子图信道分配情况如图 4 所示。可以看出完成节点对之间的通信需要 3 个时隙, 每个时隙子图信道分配都要满足节点接口数约束和信道数约束。同时注意到路径 $i-f-b$ 和 $j-f-b-c$ 在同一时隙都要经过链路 $f-b$, 因此 2 个时隙的子图中都要包含边 $f-b$, 为了减少信道切换带来的开销, 2 个时隙对链路 $f-b$ 分配的频道应尽量保持一致。

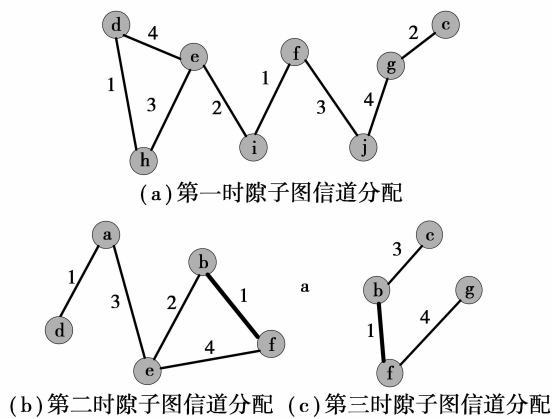


图 4 基于图分解的时隙信道分配举例分析

4 仿真与性能分析

搭建计算机仿真平台,对比分析提出的基于图分解的时隙信道分配算法和文献[3]中的分布式贪心固定信道算法以及随机信道分配算法。为了便于比较算法的性能,固定信道分配算法在信道分配的基础上根据每个时隙源目的节点间的路径和约束条件对应 1 个子图。

仿真环境中暂时不考虑网络节点的移动性,且网络流量平稳。仿真模型中 40 个节点随机分布在 500×500 的区域中,节点的传输距离为 150 m,干扰距离为 300 m,每个源目的节点对之间产生相同的 2 M 左右的流量需求,节点间通信使用最短路径路由。初始时设置网络中的信道数为 8,每个节点配有 2 个 802.11a 接口,当然,节点接口数、网络信道数和源目的通信节点对数可在合理的范围内自由变化。由于完成源目的节点对之间的通信要经过一定

的时隙,算法不同所用时隙数也不同,因此可以把网络吞吐量定义为单位时隙内目的节点成功接收的业务量。在仿真中通过变化网络中通信的源目的节点对数、网络信道数和节点接口数来分析不同算法对网络吞吐量产生的影响。

图 5 比较了节点接口数为 2 和可用信道数为 8 时通过变化源目的节点通信对数来比较不同算法对网络吞吐量的影响,可以看出提出的算法明显优于其它算法。例如在源目的节点通信对数为 20 时,基于图分解的时隙信道分配算法比贪心固定信道分配算法吞吐量高 30% 左右。但节点接口数限制了吞吐量的进一步的提高。

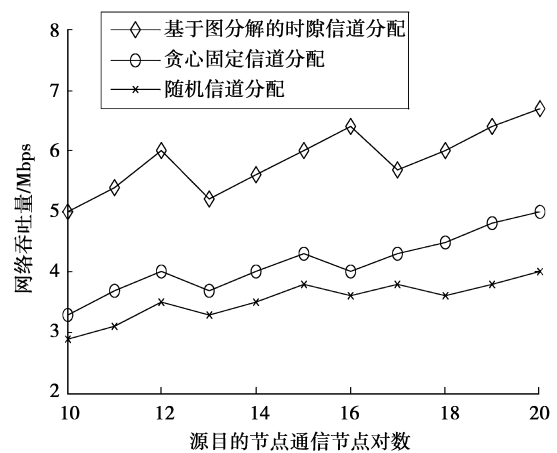


图 5 节点接口数为 2 和可用信道数为 8 时源目的节点通信对数的不同对网络吞吐量的影响

图 6 给出了 8 个可用信道和 20 对源目的节点通信时通过变化节点接口数来比较不同算法对网络吞吐量的影响,可以看出提出的算法优于贪心固定信道分配等算法。例如在节点接口数为 5 时,提出的算法比贪心固定信道分配算法吞吐量提高大约 30%,比随机信道分配算法提高 1 倍左右。

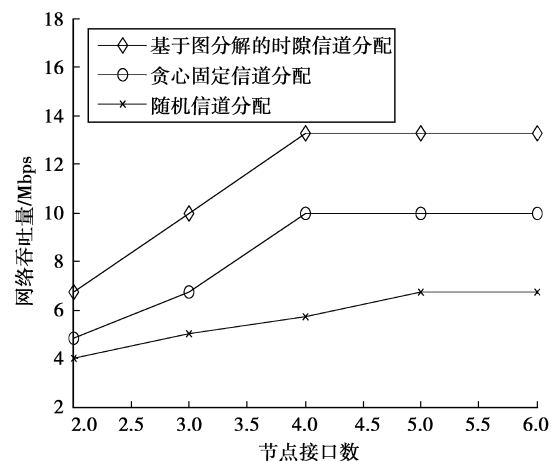


图 6 8 个可用信道和 20 对源目的节点通信时各种算法在节点接口数不同情况下的网络吞吐量比较

图 7 给出了在 20 对源目的节点通信时,通过变化网络可用信道数和节点接口数来分析提出的算法对网络吞吐量的影响。从图中可以看出,不论是节点接口数还是信道数的单方面增加,网络吞吐量都有较大的提高,例如在节点接口数为 5 时,12 个信道比 8 个信道情况下吞吐量提高约 50%。但是当节点接口数达到一定值时,继续增加节点接口数吞吐量并无明显提高。这说明节点接口数不是越多越好,而是要和信道数保持一定的比例关系。

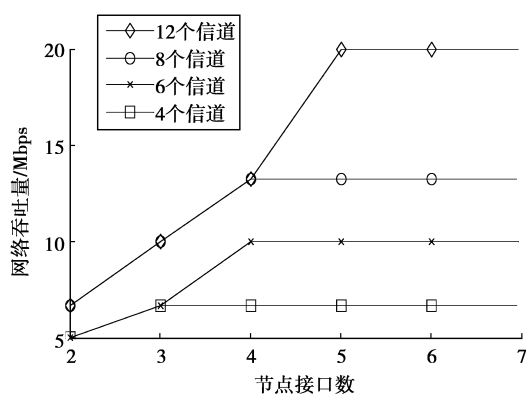


图 7 20 对源目的节点通信时信道数和节点接口数的不同对网络吞吐量的影响

基于图分解的时隙信道分配策略根据节点间通信路径在每个时隙对应连接图的 1 个子图,该子图可以根据节点接口数约束进行动态更新,然后在具体分配信道时又考虑网络信道数等约束,子图可以再次更新,算法保证了每个时隙在考虑各种约束的情况下优化时隙信道分配以提高时隙的信道分配效率。另外由于每个时隙给予子图分配信道对整个连接图来说属于局部性信道分配,能够有效避免信道分配中产生的波及效应以及信道切换导致的链路失效等消极因素的影响。值得注意的是,由于该算法按时隙分配信道,对时间的开销相对较大,尤其是随着网络规模的增加,时间复杂度会增大。该算法更适用于网络规模受控,(如虚拟层次化网络)和网络节点接口支持快速切换的情况。但是,目前各种固定信道分配算法在实施信道分配算法时为了达到网络干扰最小而对整个连接图进行分配信道,虽然能够满足节点接口数和信道数约束,但不能避开接口共享和波及效应的影响。因此本文提出的信道分配策略在时延可以接受的条件下优于其它固定信道分配方案,在降低网络干扰的同时有效地提高了网络吞吐量。

5 结 论

对多接口-多信道无线 mesh 网络中的信道分配

问题进行了介绍和研究,针对多接口无线 mesh 网络信道分配中存在的共享接口信道依赖问题和网络拓扑改变所导致的链路失效问题,提出了一种基于图分解的时隙信道分配策略,该方案把信道分配从空间域拓展到时间域以提高时隙信道分配效率,在满足信道和接口约束的条件下有效地提高了网络吞吐量。研究时隙信道分配中如何减少时延因素带来的影响以及如何采取更有效的分布式算法是下一步研究方向。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ L F, WANG X D, WANG W L. Wireless mesh networks: a survey, broadband and wireless networking (BWN) lab[J]. School of Electrical and Computer Engineering, 2004, 47(4): 445-487.
- [2] KYASANUR P, VAIDYA N H. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless Networks [C/OL]//2005 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Seoul, Korea, March 13-17, 2005 [2005-05-02]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1424834.
- [3] SUBRAMANIAN A P, KRISHNAN R, DAS S R, et al. Minimum interference channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[J]. Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2007, 7(4): 481-490.
- [4] RAD A H M, WONG V W S. Logical topology design and interface assignment for multi-channel wireless mesh networks[C]//Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference, November 27-December 1, 2006, San Francisco, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [5] RAMACHANDRAN K N, BELDING E M, ALMERTOTH K C, et al. Interference-aware channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[C]//Proceedings of 2006 International Conference on Computer Communication, April 23-29, Barcelona, Spain. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006.
- [6] RANIWALA A, GOPALAN K, CHIUEH T C. Centralized channel assignment and routing algorithms for multi-channel wireless mesh networks[C]//ACM Mobile Computing and Communications Review (MC2R), 2004, 8(2): 50-65.
- [7] KIM S H, SUH Y J. Local channel information assisted channel assignment for multi-channel wireless mesh networks[C/OL]//IEEE Vehicular Technology Conference, Singapore, May 11-14, 2008 [2008-05-20]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4526129.

(下转第 51 页)

学自动化学院,2009.

- [8] KRISMER F, LAR J W. Accurate power loss model derivation of a high-current dual active bridge converter for an automotive application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(3): 881-891.
- [9] PENA J DE LA, RIVAS M, HUERTAS A, et al. Wide input range module for rectified ac power distribution demonstrator for telecommunication system [C/OL]//Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, March 10-14, 2002 [2002-08-07]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=989397.
- [10] ALOU P, GARCIA O, COBOS J A, et al. Flyback with active clamp a suitable topology for low power and very wide input voltage range applications[C/OL]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, March 10-14, 2002[2002-08-07]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=989254.
- [11] 勤格勒图, 刘文里. Matlab 电力系统模块中非线性电源的实现方法[J]. 黑龙江电力, 2009, 31(1): 20-23.
- QIN GE-LE-TU, LIU WEN-LI. Implementing method of non-linear power source in electric power system block with Matlab[J]. Heilongjiang Electric Power, 2009, 31(1): 20-23.
- [12] GU Y, CHEN H, LU Z, et al. A family of asymmetrical dual switch forward DC-DC converters[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition; APEC, March 6-10, 2005. [S. L.]: Pam Wagner, 2005, 3: 1556-1560.
- [13] LEE J P, MIN B, YOO D, et al. A new topology for PV DC/DC converter with high efficiency under wide load range[C]//2007 European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-5, 2007, Aalborg. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2005: 1-6.
- [14] PETERSEN L, ANDERSEN M A E. Efficient wide range converters (EWiRaC): A new family of high efficient AC-DC converters [C]//Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 19-23, 2006. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 247-253.
- [15] ROSADO S, MA X, FRANCIS G, et al. Model-based digital generator control unit for a variable frequency synchronous generator with brushless exciter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 42-52.
- [16] PARK S, YU J, LEE S, et al. Output voltage control of synchronous generator for ships using a PMG type digital AVR[C]//2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2009, San Jose, CA. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009: 417-421.
- [17] MILIVOJEVIC N, STAMENKOVIC I, KRISHNAMURTHY M, et al. A digital control strategy for brushless DC generators[C]//2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 21-25, 2010, Palm Springs, CA. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2010: 1957-1962.

(编辑 侯湘)

(上接第31页)

- [8] SKALLI H, DAS S K, LENZINI L, et al. Traffic and interference aware channel assignment for multi-radio wireless mesh networks[C]//Proceedings of IEEE of the 13th annual ACM International conference on mobile computing and networking, September 9-14, Montreal, Quebec. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2007: 15-26.
- [9] CHO S, KIM C. Interference-aware multi-channel assignment in multi-radio wireless mesh networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, E91-B(5): 1436-1445.
- [10] RAD A H M, WONG V W S. Joint channel allocation, interface assignment and MAC design for multi-channel wireless mesh networks[C/OL]//proceedings of IEEE international conference on computer communications, anchorage, AK, May 6-12, 2007[2007-05-29]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4215755&tag=1.
- [11] JENSEN T R, TOFT B. Graph coloring problems[M]. New York: Wiley Interscience, 1995: 50-95.
- [12] ALAZEMI H M K, DAS A, VIJAYKUMAR R, et al. Fixed channel assignment algorithm for multi-radio multi-channel MESH networks[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2008, 8(6): 811-828.
- [13] BARRETT C L, ISTRATE G, KUMAR V S A, et al. Strong edge coloring for channel assignment in wireless radio networks[C/OL]//Fourth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, Pisa, March 13-17, 2006 [2006-03-27]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1598948.
- [14] PROSKUROWSKI, SYSLO M M. Efficient vertex and edge coloring of outerplanar graphs[J]. SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods, 1986, 7(1): 131-136.
- [15] ALLEN S M. Frequency assignment problems: subgraph generation for lower bounds[R]. Division of Mathematics and Computing, University of Glamorgan, 1998.

(编辑 侯湘)