

◎网络、通信、安全◎

多信道无线网状网跨层优化研究

孙素云,唐林燕

SUN Su-yun,TANG Lin-yan

广东轻工职业技术学院 计算机系,广州 510300

Department of Computer,Guangdong Industry Technical College,Guangzhou 510300,China

E-mail:sunsy81@126.com

SUN Su-yun,TANG Lin-yan.Research on cross-layer optimization for multi-channel wireless mesh networks.Computer Engineering and Applications,2009,45(23):85-87.

Abstract: Aiming at the capacity problem in multi-network interface card,multi-channel wireless mesh network,based on wireless channel interfere model and wireless nodes' transmission power to be given in physical layer,a cross-layer union optimization algorithm is proposed by jointing rate control in transport layer,routing algorithm in network layer and channel assignment in MAC layer,and using the strategy of executing routing computation twice in the paper.Simulation results show that the network throughput can be improved significantly by the proposed algorithms.

Key words: wireless mesh networks;cross-layer design;channel assignment;scheduling;wireless channel

摘要:针对多网卡多信道无线 Mesh 网络容量问题,基于无线信道干扰模型,在给定各节点物理层发射功率的条件下,联合考虑无线 Mesh 网络传输层的流速控制、网络层的路由算法和 MAC 层的信道分配等问题,通过采用二次路由计算策略,提出了一个跨层联合优化算法,仿真结果表示,提出的算法能提高网络吞吐量。

关键词:无线网状网;跨层设计;信道分配;调度;无线信道

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2009.23.024 **文章编号:**1002-8331(2009)23-0085-03 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP393

1 前言

无线 Mesh 网络(Wireless Mesh Networks,WMN)是一种由网状分布的无线节点构成,通过自动的节点发现、拓扑维护和多跳路由转发来实现节点间的互通,为用户提供高速率、高容量的互联网宽带无线接入。由于 WMN 灵活的网络结构、便利的网络配置和容错能力,使得 WMN 大大提升了现有 WMNs 网络的性能,可以作为解决“最后 1 公里”网络接入方案^[1]。现有的无线 Mesh 网络基本上是采用单信道 MAC 协议,由于无线信道是共享信道,节点之间的通信存在着竞争,因此,在一个干扰域内只能有一对节点可以进行通信。虽然现在使用的 IEEE 802.11a 的带宽可以达到峰值速率 54 Mb/s,在实际的应用中,由于多用户接入冲突、丢包错包等,实际可利用的速率只有峰值的一半,限制了整个网络的数据传输速率与网络容量,不能满足人们对网络带宽日益增长的需求。另一方面,IEEE 802.11b/g 标准和 IEEE 802.11a 标准分别提供了 3 个和 12 个正交信道,因此,如果网络中的节点上安装多个无线网卡(Network Interface Card,NIC),那么节点之间就能同时使用多个信道同时进行通信,则可以大大地提高无线 Mesh 网络的吞吐量。

多信道无线 Mesh 网络相对单信道而言能显著的提高网络吞吐量,许多近期的文献^[2-5]基于 IEEE802.11 协议研究了多信道模式下的无线 Mesh 网络的性能,文献[2]提出了多信道和多跳的 ad hoc 网络结构,并通过实验表明提出的结构在合适的信道分配和路由算法条件下能显著地提高网络性能,文献[3]通过分析 WMNs 中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的集中式信道分配与路由的启发式算法,文献[4]提出了一个多网卡与多信道的无线 Mesh 结构,并基于树结构模型和无线节点位置关系,提出了一个分布式的信道分配策略和负载均衡路由算法,文献[5]在无线 Mesh 网络多信道网络中,联合速率控制、路由和调度,应用整数线性规划研究了跨层设计中最大化网络吞吐量的问题。文献[6]基于跨层设计的思路,由物理层向网络层报告关于无线信道条件,MAC 层向网络层提供链路质量和拥塞状况信息,结合最小跳数,设计一种新的混合路由判据,提出一种 AODV 跨层路由优化机制。文献[7]在干扰模型的多信道分配策略的基础上,按照优先级逐层进行信道分配,通过降低信道间的干扰来提高每个节点的吞吐量,进而提高整个网络的吞吐量。在无线

基金项目:广东省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Guangdong Province of China under Grant No.8151030007000002);广东轻工职业技术学院自然科学基金资助项目(No.KY200807)。

作者简介:孙素云(1977-),女,讲师,主要研究方向:无线网络和分布式计算;唐林燕(1962-),女,教授,主要研究方向:无线网络和数据库技术。

收稿日期:2008-10-14 **修回日期:**2008-12-29

Mesh 网络中,由于无线信道是共享信道,节点之间的通信存在着竞争,而且同一信道在邻近区域存在干扰;同时,传输层的流速控制受到网络层、MAC 层和物理层性能的影响;另外,MAC 层的媒体控制接入又依赖网络层路由策略和传输层的流速分配,因此,无线网络通信有别于有线通信,各层协议之间不是相互透明而是相互依赖。该文在已有的研究基础上,通过分析多信道无线 Mesh 网络的特点,在给定无线 Mesh 网络节点分布状态、节点发射功率、节点网卡数目、无线信道数目和网络业务请求的基础上,通过联合传输层、网络层和媒体接入控制层(MAC)的相互关系,应用启发式算法解决无线 Mesh 网络流速分配、信道分配和路由等问题,以达到最大化网络吞吐量的目的。

2 网络模型

假定 WMNs 每个无线 Mesh 路由器配置了 N 个网卡(Network Interface Cards, NIC),在 WMNs 中可以使用 C 个正交无线信道,同时假定网络中所有节点的发射功率和干扰一定,即每个节点的发射距离 R_r 和干扰距离 R_i 也均相等。使用 $G(V, E)$ 表示多信道无线 Mesh 网络物理拓扑图,其中, V 表示 WMNs 中所有节点的集合, E 表示 WMNs 所有无向边的集合,每个属于 V 的顶点 v 代表一个静止的无线 Mesh 路由器,对于 WMNs 中的两个顶点 m, n ,其中 $m, n \in N$,如果 n 在 m 点的通信范围内,即 $d(m, n) \leq R_r$,其中 R_r 表示发射距离,则顶点 m 和 n 之间存在无向边,由于通信连接是对称的,即:如果存在一条边 $e_{mn} \in E$,则当且仅当 $e_{nm} \in E$ 。对于无线 Mesh 网络中的两个节点 u 和 v ,如果满足 $e_{uv} \in E$ 和任何一个信道 $i \in \{1, 2, \dots, C\}$,定义一个可用链路信道 x_{uv}^i ,当且仅当节点 u 和节点 v 有可用的网卡和在 u 到 v 的链路上信道 i 可以使用,则 $x_{uv}^i = 1$,否则 $x_{uv}^i = 0$ 。如果将物理拓扑 $G(V, E)$ 中的所有顶点 v ,以及所有 $x_{uv}^i = 1$ 构成的边组成的网络结构称为当前无线 Mesh 网络 $G(V, E)$ 对应的虚拟拓扑 $G'(V', E')$,其中 $u, v \in N, i \in \{1, 2, \dots, C\}$ 。很显然,如果两个在通信范围内的节点 u 和 v 之间有多个可以使用的信道,且节点 u 和 v 都有多个可使用的网卡,则在图 $G'(V', E')$ 中点 u 和 v 之间可存在多条边,因此,图 $G'(V', E')$ 可能是多重图,同样,如果在 u 和 v 之间没有可以使用的信道或者节点 u 和 v 没有可以使用的网卡,则点 u 和 v 之间不存在边,即 $x_{uv}^i = 0, i \in \{1, 2, \dots, C\}$ 。

根据无线信道干扰协议模型^[3],如果物理拓扑 $G(V, E)$ 上存在两条边 $m \leftrightarrow n \in E$ 和 $p \leftrightarrow q \in E$,且 $\min\{d(m, p), d(m, q), d(n, p), d(n, q)\} \leq R_r$,那么就称这两条边为“潜在”干扰边,根据此定义,使用 $N(e)$ 表示所有和边 e 存在“潜在”干扰的边集合,在这里之所以使用“潜在”是为了表示当且仅当 $N(e)$ 中的边和边 e 在使用相同信道同时进行通信的时候,则它们之间才存在干扰,否则,当它们使用不同的信道,则它们之间不存在干扰。当网络中所有节点的信道分配结束后,那么 $G(V, E)$ 对应的虚拟拓扑结构 $G'(V', E')$ 也唯一确定。当 $G'(V', E')$ 确定后,即可以确定虚拟拓扑上链路之间是否存在干扰,因此,同时使用 $\phi(e)$ 表示所有和链 e 存在干扰的链路。由于无线网络是共享信道,所以对于 $\phi(e)$ 中的链路不能同时工作,否则就存在干扰。如果使用 $f(e_0)$ 表示链路 e_0 上的流速,那么在单位时间 T 内

则可以通过链路 e_0 上的通信量为 $f(e_0) * T$,如果假定网络中每条链路的容量为 $c(e_0)$,则通信量为 $f(e_0) * T$ 的通信时间为 $\frac{f(e_0)}{c(e_0)} T$,因此,冲突集 $\phi(e)$ 所有链路的通信时间总和一定要小于 T ,否则称不可以调度,即: $\sum_{e_0 \in \phi(e)} \frac{f(e_0)}{c(e_0)} \leq 1, \forall e \in E$ 为通信链路可调度度的充分条件^[3]。如果 $\phi(e)$ 中链路越多,则平均每条链路可用的时间越短,因而每条链路上可通过的通信量也越少。虽然无线 Mesh 网络中干扰可能无法消除,但是,可以通过合理分配无线信道,使整个网络中的干扰尽可能减少,从而提高整个网络的吞吐量。

3 跨层联合优化算法(CLCOA)

研究多网卡和多信道无线 Mesh 网络的容量问题,主要的研究方法是在给定网络节点分布和业务连接请求的情况下,联合考虑物理层的功率控制、媒体接入控制层(MAC)的信道分配和调度策略、网络层的路由算法和传输层的流速分配,通过跨层优化设计得到给定网络可用资源条件下的网络最大容量。假定各节点物理层的发射功率一定的情况下,提高网络的容量必须使传输层的流速合理控制,然而传输层的流速分配又取决于网络层的路由算法和 MAC 层的信道分配和调度策略,另外,为了使 MAC 层的信道分配能提高网络性能,在给定路由算法的情况下,在进行 MAC 层的信道分配的时候就必须考虑信道干扰和链路预期的传输流量,因此,跨层联合优化算法的设计必须综合考虑传输层、网络层和 MAC 层等相互关系。在具体进行跨层联合优化算法设计的时候,采用两次路由策略,即通过第一次路由计算得到预期通过各节点和各链路的预分配流量,然后基于各节点和各链路的预分配流量进行信道分配,由于无线信道的干扰和网络资源约束等,使信道分配完成后得到的无线 Mesh 网络虚拟拓扑 $G'(V', E')$ 和物理拓扑 $G(V, E)$ 存在差异,需要在虚拟拓扑 $G'(V', E')$ 上进行第二次路由计算得到各连接请求的实际路由。由于跨层联合优化算法在信道分配的时候考虑了预期的流速分配和无线信道之间的干扰,因此,信道分配后确定的网络虚拟拓扑 $G'(V', E')$ 不仅能满足传输层的流速分配,而且充分考虑无线信道的共享特点,从而保证了无线 Mesh 网络的性能。

算法的输入条件:

给定各节点的网卡数目 N 和无线网络的可用信道数 C ;各节点的发射距离 R_r 和干扰距离 R_i ;各节点对的业务连接请求;

算法的输出条件:

信道分配后确定的虚拟拓扑 $G'(V', E')$ 和业务连接请求的路由。

跨层联合优化算法(CLCOA)算法主要步骤:

(1)在无线 Mesh 网络物理拓扑 $G(V, E)$ 上利用最小跳步(即最短路径)算法进行路由,得到各业务连接请求的路由分配;

(2)应用文献[2]中的公式 $\phi_l = \sum_{s,d} \frac{P_l(s,d)}{P(s,d)} * B(s,d)$ 进行流量预计算,得到通过各链路 L 的流量,其中, $P_l(s,d)$ 表示 (s,d) 节点对流量请求通过链路 L 的路径数目, $P(s,d)$ 表示 (s,d) 节点对流量请求所有的可用的路径数, $B(s,d)$ 表示 (s,d) 节点对流量请求带宽;

(3)按照各链路预分配流量进行网卡和信道分配,使链路

L 上的可利用的带宽容量不小于 ϕ_l , 即满足 $\phi_l \leq \sum_{e \in C} \sum_{e_0 \in \phi(e)} f(e_0) * T, \forall e \in E$, 得到 $G(V, E)$ 对应的虚拟拓扑 $G'(V', E')$, 其中, C 为可用信道数, $\phi(e)$ 表示与链路 e 存在干扰链路集合, $f(e_0)$ 表示通过链路 e_0 的流量, T 为调度周期;

① 计算与节点所有相关链路(出边和入边)流量 ϕ_l 的总和

$\lambda_i = \sum_{l \in L} \phi(l), i \in E$, 其中, L 表示节点 i 的度, 并依据通过各节点流量 λ_i 大小降序排列, 依次对各节点的网卡进行分组, 使每个节点的分组数不大于节点拥有的网卡数目, 由于每个分组将使用相同的信道, 所以各分组内的链路上流量总和尽可能相等;

② 根据各链路预分配流量 ϕ_l 大小降序排列依次进行信道分配, 为了保证分配的信道在 MAC 层是可以调度的, 在给链路 e 分配信道 c 的时候, 使用 $\sum_{e_0 \in \delta(e)} \frac{f(e_0)}{c(e_0)} \leq 1, \forall e \in E$ 进行约束,

其中 $\delta(e)$ 表示和链路 e 存在干扰且已经分配了信道 c 的链路;

(4) 根据 $G'(V', E')$ 每条链路上的可用带宽, 对各业务连接请求再次利用最短路径算法进行路由计算, 得到各业务连接请求的实际路由路径;

(5) 返回 $G'(V', E')$ 和各业务连接请求的实际路由。

CLCOA 算法的主要思想是根据业务连接请求进行初始流量预分配, 通过在 $G(V, E)$ 上链路的预分配流量, 然后根据预分配流量排序进行网卡分组和信道分配, 最后再次对业务连接请求在 $G'(V', E')$ 上进行路由计算, 得到各业务连接请求实际的路由。由于进行信道分配前, 各节点对其网卡进行了分组, 且每个节点的分组数不大于每个节点的网卡数目, 所以给每个分组分配相同的信道是可行的; 同时由于在进行信道分配的时候, 使用 $\sum_{e_0 \in \delta(e)} \frac{f(e_0)}{c(e_0)} \leq 1, \forall e \in E$ 进行约束, 因此, 也使得分配的信道在 MAC 层是可以调度的; 另外, 由于在进行网卡分组和信道分配的时候, 通过对各节点或各链路预分配的流量进行排序, 从而在信道分配的时候考虑了各链路的预分配流量, 使信道分配能满足传输层的流量分配和网络层的路由算法。

4 仿真结果与分析

采用 NS-2 网络仿真工具建立类似文献[4]的仿真场景, 搭建无线 Mesh 网络仿真环境。每个无线 Mesh 节点的发射距离和相应的干扰距离比值为 1/2, 在 9x9 正方形格子结构场景中随机生成 10 个包含 60 个无线 Mesh 路由器节点的网络结构, 60 个节点中根据节点分布位置选择 4 个节点充当网关节点连接到外部有线网络上, 在这种节点分布结构下, 每个节点最多可以和 4 个节点直接通信。每个节点配置 N 个网卡, 采用 IEEE802.11a 标准协议的无线链路, 无线链路传输速率设置为 54 Mb/s, 可用的正交信道数为 $C=12$, 为了有效地实施多跳路由, MAC 层协议采用 IEEE802.11 无线局域网的分布式协调功能(DCF), 并利用 RTS/CTS 机制将数据分组传输到相邻节点, 在每个网络拓扑结构上, 生成 30 个节点对业务连接请求, 其中, 在 56 个非网关节点中随机选择 15 个源节点与目的节点对进行通信, 另 15 个为 56 非网关节点中随机选择 15 个源节点与外部有线节点通信, 即通过 4 个网关节点与外部有线网络节点建立连接, 实验采用连续比特速率(CBR)的流量模式, 每个

节点对的通信量在 0 到 3 M 中随机生成。

为了比较提出的 CLCOA 算法网络性能, 分别对 CLCOA 算法与文献[4]中的最短路径路由 SPR 算法在 $N=2, C=12$ 和 $N=3, C=12$ 网络状态下进行模拟比较, 实验结果如图 1、2 所示。

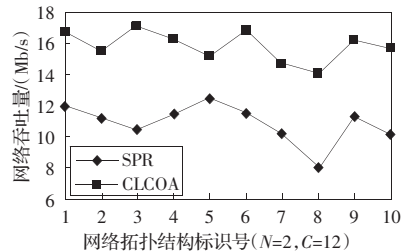


图1 不同网络结构下的网络吞吐量

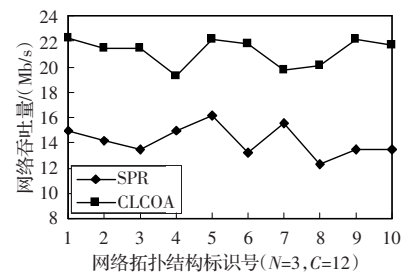


图2 不同网络结构下的网络吞吐量

从图 1、2 可以看出, 在不同的网络结构和状态下, 运行 CLCOA 算法总是比运行 SPR 算法的网络吞吐量明显增大, 其主要原因为文献[4]在进行信道分配的时候没有考虑链路预期通信量, 同时运行 SPR 算法总是以最短路径进行路由, 导致一些关键链路上出现带宽瓶颈, 从而使得整个网络的吞吐量受到制约; 然而, 尽管 CLCOA 算法也使用最短路径算法进行路由, 但是 CLCOA 算法由于将传输层、网络层和 MAC 层的问题进行跨层联合优化, 在进行信道分配前对业务连接请求进行了预路由计算, 并根据预路由计算的结果进行信道分配, 使得信道分配后确定的网络虚拟拓扑 $G'(V', E')$ 是考虑传输层的流速控制和网络层的路由算法, 同时利用公式 $\sum_{e_0 \in \delta(e)} \frac{f(e_0)}{c(e_0)} \leq 1, \forall e \in E$ 对信道分配进行约束, 保证了关键路径上不会出现带宽瓶颈, 从而提高整个网络的吞吐量。

5 结束语

无线 Mesh 网络将成为下一代无线 Internet 的主要技术, 针对无线 Mesh 网络路由与信道分配等问题, 在对无线信道间的干扰进行量化的基础上, 联合传输层、网络层和 MAC 层优化问题, 提出了一种新的多跳无线网状网中多网卡多信道分配策略, 有效改善了整个网络的传输性能, 仿真结果表明, 提出的算法能显著提高网络的吞吐量。由于无线 Mesh 网络无中心控制节点, 当网络规模变大的时候, 集中式优化算法不再适应无线 Mesh 网络, 因此, 下一步的工作是根据无线 Mesh 网络的特点, 研究适合大规模无线 Mesh 网络分布式的跨层联合优化算法。

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Wang Xu-dong, Wang Wei-lin. Wireless mesh networks: A survey[J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.