

无线 mesh 网络多路径 QoS 路由研究^{*}

徐 震, 黄传河

(武汉大学 计算机学院, 武汉 430070)

摘 要: 基于 TDMA 提出了一种多路径路由算法。该路由算法是利用两个节点间多条并行的路径作为一个 QoS 请求的路线。而这多条路径的带宽总和能够满足 QoS 的带宽要求。通过仿真实验结果证明了该算法相比 SPR 能明显提高路由的请求成功率。

关键词: 无线 mesh 网络; 时隙; 服务质量; 带宽计算

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2009)07-2688-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2009.07.081

Research on wireless mesh network multipath QoS routing

XU Zhen, HUANG Chuan-he

(School of Computer, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Based on TDMA the paper presented an effective routing scheme of using multiple paths between two nodes as the route for a QoS request. The aggregate bandwidth of the multiple paths could meet the bandwidth requirement of the request. Simulation results show that compared with the shortest path routing, the interference-aware multipath QoS routing algorithm always increases success ratio of a QoS route request.

Key words: wireless mesh network; timeslot; quality of service(QoS); bandwidth calculation

无线 mesh 网络作为一种新兴发展起来的技术,具有广泛的应用前景,因此其成为国内外的研究热点。在无线 mesh 网络中,节点移动性很小,而且它们的网络拓扑很少发生变化。因此,无线 mesh 网络的研究重点是如何提供带有服务质量保证和如何优化整个网络性能。影响无线 mesh 网络提供带有 QoS 保证的一个主要因素是无线信道广播特性。这种广播特性使得在同一信道上物理位置相邻的并发传输之间会相互干扰。干扰的存在使得网络的总体性能下降。为解决无线网络中的干扰问题,使用 TDMA 协议为网络中的节点分配时隙精心合理安排链路通信是一个比较理想的方式。

无线 mesh 网络的带宽限制和信道访问的竞争性使得无线 mesh 网络中支持 QoS 较为困难。QoS 通常是指带宽、延迟、延时抖动、丢包率等。将带宽作为 QoS 非常重要的指标,其具有重要的研究意义和应用价值。

本文将带宽作为 QoS 的约束条件,研究了在无线 mesh 网络中提供有带宽保证 QoS 路由的问题。当一个带有 QoS 要求的连接请求进入网络时,路由协议要求路径上的资源能够满足端到端的 QoS 要求。如果无法找到这样的一条路径,连接请求将被拒绝。为了减少上述情况的发生,本文提出利用多条并行路径共同完成一次 QoS 单播请求。所有这些路径的带宽之和满足 QoS 请求的带宽要求。

1 系统模型

一个无线 mesh 网络抽象为无向图 $G=(V,E)$ 。其中: V 为节点的集合; E 为双向链路的集合。假设网路中可用的正交信道总数为 C 。每个节点配备有 Q 个全向收发器($Q \leq C$)。每个节点的所有收发器调制到 Q 个不同的信道。每个收发器都有

相同的传输范围 R_t 和干扰范围 R_i , R_i 通常是 R_t 的两倍。如果节点 v_i 和 v_j 各有一个收发器分配在信道 k 上,并且节点 v_i 和 v_j 的欧氏距离不大于传输范围 R_t ,则 v_i 与 v_j 之间存在一条双向链路 $(v_i, v_j; k)$ 。

在 TDMA 系统中,节点工作在同步方式下,信道带宽被分成一系列时隙。基于 TDMA 方式的资源分配问题是,为网络中的节点分配传输时隙,实现相邻节点之间的分组无碰撞的传送,并且获得尽可能高的系统吞吐量。

在无线 mesh 网络中,无线信道的广播特性使得一对节点之间的分组传输时隙不仅与其自身有关,而且还要受到其相邻节点分组传输时隙的影响。如果利用信道 k ,节点 u 向 v 进行无碰撞的发送需要满足三个条件:a)节点 u 的发送和 v 的接收位于同一个时隙上;b)在一个时隙上节点不能同时发送和接收;c)在距离节点 v 三跳之内的节点中,只有节点 u 在 v 的接收时隙上采用信道 k 进行发送。

本文研究的目的是,为了提供多路径 QoS 路由,必须想方设法避免干扰的发生。本文将网络中的干扰分为两种,即流间干扰和流内干扰。前者是指分别位于网络中两个并发连接上的两条链路之间的干扰,即位于其中一个连接上某一链路路上的传输会干扰另一连接上某一链路路上的接收;而后者是指位于同一个连接上两条链路路上的并发传输之间的干扰。目前对干扰的研究更多是使用多信道多收发器的方式,所以都对流间干扰采取了回避。基于 TDMA 本章将探讨如何建立无干扰的时隙分配模型。

设 $T_i(k)$ 和 $R_i(k)$ 分别表示节点 v_i 在信道 k 上已经被占用的发送和接收的时隙的集合。若一个信道 k 并没有被分配到节点 v_i 的任何一个收发器上,则 $T_i(k)$ 和 $R_i(k)$ 是两个空集。

收稿日期:2008-10-10;修回日期:2008-12-22 基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(60633020)

作者简介:徐震(1974-),男,博士,主要研究方向为网络通信等(albert_xu@tom.com);黄传河(1963-),男,教授,博导,主要研究方向为计算机网络、网络安全等。

用 NB_i 来表示距离节点 v_i 不超过三跳所有节点的集合; $TS_i^t(k)$ 和 $TS_i^r(k)$ 表示节点 v_i 在信道 k 上可以用来进行发送和接收的时隙集合。依据时隙分配约束,为了避免流间干扰,则有

$$TS_i^t = S - T_i(k) - \sum_{j \in N_i} R_j(k); 1 \leq k < C \quad (1)$$

$$TS_i^r = S - R_i(k) - \sum_{j \in N_i} T_j(k); 1 \leq k < C \quad (2)$$

其中: $TS_{i,j}(k)$ 表示节点 v_i 在信道 k 上可以用来向邻居节点 v_j 发送的时隙集合。

$$TS_{i,j}(k) = TS_i^t(k) - TS_j^r(k); 1 \leq k < C \quad (3)$$

对于图 G 中一条给定路径 $P = \{(v_i, v_{i+1}; k_i) | 0 \leq i < N\}$, 设 $TS_i(k_i) (0 \leq i < N)$ 表示在路径 P 上为各链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i) (0 \leq i < N)$ 所分配的时隙集合。 $TS_i(k_i)$ 中的时隙既能被节点 v_i 用来在信道 k_i 上进行发送,也能被节点 v_{i+1} 用来在信道 k_i 上进行接收来自节点 v_i 的发送。下面对 $TS_i(k_i) (0 \leq i < N)$ 需要满足的条件进行分析。

首先,为避免流间干扰,要确保节点 v_i 的发送不能影响网络中已经存在的传输,即需要满足

$$TS_{i,i+1}(k_i) \in TS_i(k_i); 1 \leq i < N \quad (4)$$

其次,对于路径 P 上任意一个节点 $v_j \in NB_i (j \neq i+1)$, 即 v_j 不是 v_i 的邻居节点,如果节点 v_i 和 v_j 工作在同一信道上,则节点 v_i 的发送会影响 v_j 的接收。为避免路径 P 上的流内干扰,需要满足

$$TS_{i,i+1}(k_i) \cap TS_{j-1,j}(k_j) = \emptyset; 1 \leq i < M \quad (5)$$

式(4)(5)给出了路径 P 上无干扰时隙分配约束条件。其中式(4)保证了路径 P 上的时隙分配不会干扰网络中已有的传输,即避免流间干扰;式(5)保证了路径上的时隙分配不会产生流内干扰。路径 P 端到端的最大带宽 $BW(P)$ 是由路径上各链路最小带宽决定的,即

$$BW(P) = \min(TS_{i,i+1}(k_i)); 1 \leq i < N \quad (6)$$

2 路径带宽计算算法

基于 TDMA 的网络中,可以将带宽定义成空闲时隙的个数,那么链路带宽就是相邻两个节点的公共空闲时隙数。两个节点是相邻节点时,路径带宽就等于链路带宽。对于非相邻节点的多跳路由,路径带宽取决于路径带宽分配后路径上各链路最小带宽,因此路径带宽计算问题实际上是一个最小化最大带宽的时隙分配问题。路径带宽分配问题已经被证明是一个 NP 完全的问题。笔者提出了一个启发式的多信道路径带宽计算算法来为一条给定的路径上的各条链路分配时隙资源。

考虑一条给定路径 $P = \{(v_i, v_{i+1}; k_i) | 0 \leq i < N\}$, 已知路径上每一条链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i)$ 可用于传输的时隙集合为 $TS_{i,i+1}(k_i)$ 。先将 $TS_i(k_i)$ 初始化为 $TS_{i,i+1}(k_i)$, 然后构造一系列子路径: $P_0 = \{(v_0, v_1; k_0)\}$, $P_1 = \{(v_0, v_1; k_0), (v_1, v_2; k_1)\}$, $\dots$, $P_{m-1} = \{(v_0, v_1; k_0), (v_1, v_2; k_1), \dots, (v_{m-1}, v_m; k_{m-1})\}$ 。

路径带宽计算方法如下所述:对于子路径 P_0 , 两个节点的公共时隙均可以用做带宽分配。对于子路径 P_1 , 链路 $(v_0, v_1; k_0)$ 和 $(v_1, v_2; k_1)$ 上可用时隙集合分别为 $TS_{0,1}(k_0)$ 和 $TS_{1,2}(k_1)$ 。如果 $k_1 \neq k_0$, 则这两条链路位于不同信道上,互相不干扰。因此,当两条链路的时隙分配结果为 $TS_{0,1}(k_0)$ 和 $TS_{1,2}(k_1)$, 如果 $k_1 = k_0$, 则链路 $(v_0, v_1; k_0)$ 和 $(v_1, v_2; k_1)$ 存在相互干扰,时隙集合 $TS_{0,1}(k_0)$ 与 $TS_{1,2}(k_1)$ 需要重新分配。重新分配后的 $TS_{0,1}(k_0)$ 和 $TS_{1,2}(k_1)$ 必须满足 $TS_{0,1}(k_0) \cap TS_{1,2}(k_1) = \emptyset$ 。对于子路径 P_2 , 链路 $(v_2, v_3; k_1)$ 是在节点 v_0 的 3 跳范围内,除满足 $TS_{2,3}(k_2) \cap TS_{1,2}(k_1) = \emptyset$ 外,还必须满足 $TS_{2,3}(k_2) \cap TS_{0,1}(k_0) = \emptyset$ 。

不失一般性,假设已经依次在子路径上 $P_0, P_1, \dots, P_{m-1} (0 < m < N)$ 进行过带宽分配,各条链路上分配时隙集合结果为 $TS_{i,i+1}(k_i); 0 \leq i < m$ 。在这些子路径 $P_0, P_1, \dots, P_{m-1} (0 < m < N)$ 上,已经依次消除了链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i), 0 \leq i < (m-1)$ 相互之间干扰。因此路径 $P_m = P_{m-1} \cup \{(v_m, v_{m+1}; k_m)\}$ 上只需考虑路径上末端链路 $(v_m, v_{m+1}; k_m)$ 和路径上其他链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i), 0 \leq i < (m-1)$ 两两之间的干扰。由于干扰只发生在同一信道且三跳范围内的邻居节点上,在链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i), 0 \leq i < (m-1)$ 中挑出与链路 $(v_i, v_{i+1}; k_i)$ 会发生干扰的链路集合,然后重新分配这些会发生干扰的链路的时隙集合。在子路径 P_m 上的带宽分配结束后,采用同样方法计算下一条子路径 P_{m+1} 上的带宽分配,直到路径上所有链路时隙分配结束。根据式(6)路径的带宽就是最小链路的带宽。

3 多路径 QoS 路由

具有带宽保证的多路径路由算法是在规定延迟的范围内寻找多条并行的路径,使得这多条路径的带宽之和能够满足一次 QoS 请求的带宽要求,并在这些路径上预留所需要的带宽资源。笔者选择 AODV 作为路由协议。基于 AODV 是按需路由,无须周期性地交换路由信息,从而大大减少了路由维护开销。设一个新的带有带宽要求 B 的连接请求进入网络,源节点 s 如果发现没有去住宿节点 d 的路由,节点则向网络泛洪一个 RREQ 的分组。将这个请求分组记为 $RREQ(s, d, Seq_Id, PacketType, Node_list, Chan_list, Slot_list, B, TTL)$ 。其中, $Node_list$ 记录源节点到当前节点的节点列表; $Chan_list$ 和 $Slot_list$ 分别表示路径信道和时隙列表数组,用来记录路径上的信道和时隙分配情况。

当一个邻居节点 v_i 收到来自源节点 s 的 RREQ 消息时,它首先检查自己是否被分配到信道 k , 如果没有则丢掉该 RREQ 消息;否则,节点依照式(2)和(3)计算 $TS_i^t(k)$ 和 $TS_{i,i}(k)$, 根据带宽计算方法得到子路径 P_0 的带宽 $BW(P_0)$ 。对于分配在节点 v_i 上的每一个信道 k' , 节点 v_i 用式(1)计算 $TS_i^t(k')$, 然后把连接请求信息 $\langle s, d, B \rangle$ 、节点所选用的信道 k' 、当前路径 $P = \{(s, v_i; k)\}$ 、路径带宽分配结果 $TS_i(k')$ 和 $TS_i^t(k')$ 放入 RREQ 消息头部,并发送给所有邻居,并且 TTL 减 1。

当节点 v_{m+1} 收到来自节点 v_m 的 RREQ 消息,从 RREQ 消息头部中取出节点 v_m 当前选用的信道 k_m , 当前路径 $P_{m-1} = \{(v_i, v_{i+1}; k_i) | 0 \leq i < m\}$, 路径上时隙分配结果 $TS_i(k_i) (0 \leq i < m)$ 和节点 v_m 可用于发送的时隙集合 $TS_m^t(k_m)$ 。首先,节点 v_{m+1} 检查自己是否被分配信道 k_m 。如果没有,则丢弃该 RREQ 消息,然后节点 v_{m+1} 检查自己是否已经在路径 P_{m-1} 上。如果已经在上面,该 RREQ 消息也被丢弃;否则,节点 v_{m+1} 运用式(1)~(3)分别计算 $TS_{m+1}^t(k_m)$ 、 $TS_{m+1}^r(k_m)$ 和 $TS_{m,m+1}(k_m)$, 并建立一条新路径 $P_m = P_{m-1} \cup \{(v_m, v_{m+1}; k_m)\}$, 在新路径上运行路径带宽分配算法分配时隙。如果节点 v_{m+1} 不是宿节点 d , 则节点 v_{m+1} 需转发 RREQ 消息。对节点 v_{m+1} 上分配的每一个信道 k' , 运用式(1)计算 $TS_{m+1}^t(k')$, 然后把节点所选用的信道 k' 、当前路径 P_m 、路径带宽分配结果 $TS_i(k_i) (0 \leq i \leq m)$ 和 $TS_{m+1}^t(k')$ 放入 RREQ 消息头部中的 $Chan_list$ 和 $Slot_list$, 并发送给所有邻居节点。

当 RREQ 分组到达宿节点,一条由源节点到宿节点的路径就确定下来。宿节点将获得该条路径的有关信息,如路径上节点、路径上各链路的时隙分配结果等。宿节点可能会收到多个 RREQ 消息,将等待一段既定的时间,或者是等到接收到一定

数量的 RREQ 分组。接着宿节点从这些候选路径中选择一组合适的路径,使它们的带宽之和能够满足 QoS 请求的带宽要求。宿节点选择路径的方法是最大跳数—带宽优先策略,即将所有候选路径根据它们的跳数—带宽值按降序排列,然后由大到小中选出的一组路径,使得它们的带宽之和刚好满足 QoS 请求所要求的带宽。

在宿节点选择好多条从源节点到宿节点的路径后,接着依据带宽分配结果在这些路径上预留带宽资源。首先,路径上时隙分配结果被拷贝到 RREP 消息头部,沿着选中最短路径反向发送该 RREP 直到源节点,在进行 RREP 消息传送的同时进行相应的资源预留,而且沿途上的节点需要一个更新(update)消息把这次预留结果通知给三跳内所有邻居节点以避免流间干扰。在数据发送完毕后,源节点需要终止连接,同时释放在网络中所预留的带宽资源。源节点在所建立的路径上发送一个路由释放消息给宿节点。而路径上每一节点在接收到该消息时,则释放为该连接所预留的时隙,然后发送一个 update 消息通知三跳内的所有邻居节点。

4 模拟实验与结果分析

通过模拟实验来评估在多信道多收发器无线 mesh 网络环境下,本文提出路由协议的性能。在模拟中采用自由空间模型,25 个节点随机地分布在 1 000 m × 1 000 m 的矩形区域内,每个节点的传输半径为 250 m,干扰半径是 550 m。每个数据帧包含 32 个数据时隙,请求的源节点和宿节点随机产生。

笔者使用请求成功率作为性能评价参数。请求成功率 = 成功的 QoS 请求次数/总的 QoS 请求次数。图 1 和 2 分别表示了本文基于干扰的 QoS 路由和经典的最短路由的请求成功率。这两种方案分别表示为 BW-AODV 和 SPR。在 SPR 算法中它首先查找最短路径,然后在上进行带宽计算。如果路径带宽满足 QoS 要求,则接受;否则拒绝。图 1 表明当带宽需求很低时,两种算法几乎有相同的请求成功率。随着带宽的增加,BW-AODV 算法的优势越来越明显,主要是本文的路由算法能利用多条路径来满足日益增长的带宽需求。图 2 示出了随着会话数目的增加,BW-AODV 算法的明显优于 SPR。其主要原因是会话的增加使干扰问题越来越突出,而本文 BW-AODV 算法在考虑了干扰问题的基础上能充分利用网络资源。

(上接第 2687 页)路径时在保证传输实时性的前提下兼顾节点的剩余能量,延长网络的寿命;并且由于得到了多条路径,还可以有效地缓解网络拥塞。

参考文献:

- [1] XU Ya, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Geography-informed energy conservation for Ad hoc routing [C]//Proc of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. 2001:70-84.
- [2] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALALAKRISHNAN H. Energy efficient communication protocol for wireless micro sensor networks [C]//Proc of Hawaii International Conference on System Sciences. 2000:3005-3014.
- [3] BONABEAU E, DORIGO M, THERAULAZ G. Inspiration for optimization from social insect behavior [J]. *Nature*, 2000, 406(6791):39-42.
- [4] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1(1):53-66.
- [5] BULLNHEIMER B, HART R F, STRUSS C. Applying the ant system to the vehicle routing problem [C]//Proc of the 2nd Metaheuristic In-

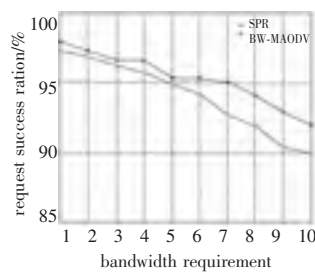


图 1 带宽需求图

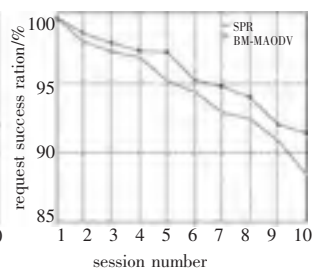


图 2 请求会话的数目

5 结束语

基于 TDMA 本文分析了无线 mesh 网络中的干扰,通过将干扰分为流内干扰和流间干扰,提出了相应的无干扰时隙分配约束条件。依据这些约束条件,本文又提出一种分布式的路径带宽计算方法。将该算法与 AODV 路由协议相结合,提出了一个新的利用多条并行路径共同满足 QoS 要求的路由协议。通过仿真实验结果验证了该路由协议相比 SPR 能明显提高 QoS 路由的请求成功率。

参考文献:

- [1] TANG Jian, XUE Guo-liang, CHANDLER C. Interference-aware routing and bandwidth allocation for QoS provisioning in multihop wireless networks [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2005, 5(8):933-943.
- [2] ZHU Chen-xi, CORSON S M. QoS routing for mobile Ad hoc networks [C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2002:958-967.
- [3] ALICHERY M, BHATIA R. Joint channel assignment and routing for throughput optimization in multiradio wireless mesh networks [C]//Proc of IEEE Mobi Com. 2005:58-72.
- [4] WANG Wei-zhao, WANG Yu, LI Xiang-yang, et al. Efficient interference-aware TDMA link scheduling for static wireless networks [C]//Proc of IEEE MobiCom. 2006:262-273.
- [5] WU Hua-yi, JIA Xiao-hua, HE Yan-xiang, et al. Bandwidth-guaranteed QoS routing of multiple parallel paths in CDMA/TDMA Ad hoc wireless networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2005, 18(9):803-816.
- [6] CHENG Hong-ju, YU Nuo, LIU Qin, et al. Bandwidth guaranteed routing in wireless mesh networks [C]//Proc of Wireless Algorithm, System and Architecture. 2006:597-608.
- [7] SIM K M, SUN Weng-hong. Ant colony optimization for routing and load-balancing: survey and new directions [J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetic*, 2003, 33(5):560-572.
- [8] GUTJAHR W J. A generalized convergence result for the graph-based system metaheuristic [R]. Manuscript; University of Vime, 2000.
- [9] GUTJAHR W J. A graph-based ant system and its convergence [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2000, 16(8):873-888.
- [10] GUTJAHR W J. ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution [R]. [S. l.]; University of Vinna, 2001.
- [11] STUTZLE T, DORIGO M. A short convergence proof for a class of ACO algorithms [R]. 2000.
- [12] 梁华为, 陈万明, 李帅, 等. 一种无线传感器网络蚁群优化路由算法 [J]. *传感器技术学报*, 2007, 20(11):2450-2455.
- [13] TIAGO C, CARLOS C, JORGE S S, et al. Ant colony optimization and swarm intelligence [M]. 2006:49-59.
- [14] HEINZELMAN W R. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Trans on Wireless Communication*, 2002, 1(4):660-670.