

一种多信道 Ad Hoc 网络的多径负载均衡路由协议

郭睿 郭伟 刘军

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室 成都 610054)

摘要 针对移动 Ad Hoc 网络固有的路由耦合问题,提出了一种基于 OLSR 的多信道多径负载均衡路由协议 MMRP_LB。MMRP_LB 将信道的可用带宽作为衡量节点负载轻重的依据,在建立路由时,同时考虑路径的负载和跳数,通过运行多重改进的 Dijkstra 算法,得到多条节点不相交的最优路径;依次给每条路径分配一个信道,并按照加权轮询方式分配业务。仿真结果显示,与单信道下的协议相比,MMRP_LB 在网络吞吐量、平均端到端时延等方面具有良好的性能,有效地避免了路由耦合。

关键词 多信道,多径,负载均衡,Ad Hoc 网络,OLSR

Novel Multi-path Routing Protocol with Load Balancing in Multi-channel Ad Hoc Networks

GUO Rui GUO Wei LIU Jun

(National Key Laboratory of Communication, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract For the inherent route coupling in mobile Ad Hoc networks, this paper proposed a OLSR-based multi-channel multi-path routing protocol with load balancing, which was called MMRP_LB. It regarded the available channel bandwidth as the reference of the node load. In route establish stage, MMRP_LB considered both the path load and hops, got multiple optimal node disjoint paths by running multiple developed-Dijkstra algorithm. Then it assigned a channel to each path in turn and distributed the traffic in a weighted round-robin fashion. Simulation results showed that compared with the protocol in single channel, MMRP_LB has a good performance in network throughput and the average end-to-end delay. MMRP_LB can avoid the route coupling effectively.

Keywords Multi-channel, Multi-path, Load balancing, Ad Hoc networks, OLSR

1 引言

移动 Ad Hoc 网络是由一组无线移动节点组成的无中心分布式多跳网络。移动节点通过共享的无线广播信道相互通信,不需要任何基础设施的支持。由于移动节点的无线覆盖范围有限,两个无法直接进行通信的节点可以借助其它节点进行分组转发。路由协议是实现网络通信的基础,但是传统的路由协议没有考虑网络负载的公平分配,使得建立的大多路由过于集中在某些节点上,导致网络出现拥塞,严重影响网络的性能。

网络负载均衡路由协议从采用的路径数目上可分为单径路由协议和多径路由协议^[1]。多径路由协议通过在多条不同的路径上分配业务实现负载均衡。采用多径路由有很多优点:网络吞吐率高、可靠性高、健壮性好。然而,移动 Ad Hoc 网络的信道具有多跳共享特性,使得网络存在固有的路由耦合^[2],导致路由协议性能下降。路径间只要有相同的节点和链路就会发生路由耦合;即使没有相同的节点和链路,路由耦合也可能发生。文献^[3,4]通过建立多条节点不相交的路径来减少多条路径之间的耦合,但是一条路径经过另一条路径

的无线覆盖区域时,还是无法避免路由耦合。文献^[5]提出了一种基于 DSR 的多信道多径路由协议 MMR,该协议通过给不同的路径指派不同的信道来有效地减少同信道干扰,避免路由耦合,但是它是针对按需路由协议而提出的。

本文提出了一种基于主动路由协议 OLSR^[6]的多信道多径负载均衡路由协议 MMRP_LB。此协议适合大规模的多信道 Ad Hoc 网络,能很好地支持节点的移动性和业务负载的变化。

2 MMRP_LB 协议描述

为方便进一步讨论,本文假设多信道网络满足以下前提条件:

- 1) 网络中有 N 个可用的、无交叠的、带宽相同的信道。
- 2) 网络中的每个节点具有 N 个接口,配有 N 个网卡。节点的每个接口有相同的传输范围。
- 3) 网络使用固定信道分配机制^[8]。在初始化时,所有的节点固定分配相同的信道;在网络运行期间,不进行信道切换。
- 4) 除了多信道网络外,没有其它网络。

到稿日期:2009-08-10 返修日期:2009-11-12 本文受国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2009CB320405)资助。

郭睿(1986-),女,硕士生,主要研究方向为 Ad Hoc 网络路由算法,E-mail:guorui0204@gmail.com;郭伟(1964-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为移动通信与扩频通信、Ad hoc 网络技术、无线局域网;刘军(1973-),男,博士,主要研究方向为 Ad Hoc 组网技术、MAC 层技术。

2.1 协议概述

MMRP_LB是在OLSR协议的基础上进行改进的路由协议。OLSR是应用于Ad Hoc网络中的一种主动路由协议。每个节点维护一张全网的路由表,根据这张路由表为传输到任何其他节点的数据提供路由。节点需要周期地与网络中其他节点交换控制信息,主要是HELLO报文和TC报文,并且通过掌握的网络拓扑信息分布式计算和更新自己的路由表。MMRP_LB的主要设计思想是利用扩展的HELLO报文和TC报文广播节点的负载信息,在路由建立时节点利用自身掌握的全网拓扑信息和负载信息,运行多重改进的Dijkstra算法,计算到达其它各个节点的 N 条最优路径。最优路径指跳数较小、带宽较宽并且节点不相交。计算出 N 条最优路径后,MMRP_LB依次给每条路径分配一个可用信道,采用某一路径传输的分组就会在相应的信道上传输。为了保证路由的独立性,MMRP_LB采用源路由^[10]的方式传输分组,分组的头部含有完整的路径信息,中间节点不需查找路由表。

众所周知,Ad Hoc网络的信道是共享广播信道,并且带宽有限,其物理信道的固有特征是影响网络性能的根本原因。Ad Hoc网络可以由单信道组成,也可以由多信道组成。在单信道系统中,节点发送和接收使用同一个信道。邻近的发射机使用MAC协议访问信道,当一个发射机取得信道的使用权后,它才向邻近的接收机发送数据。因为所有的节点都在同一信道上侦听,所以发射机的邻居都能接收到数据。这样,这些节点不能同时从其它的源节点接收数据。然而,在多信道系统中,上述情况就可以解决。多信道系统支持数据的同时传输,给每个接收机分配不同的信道,这样在接收某一源节点发送的数据的同时亦能接收其它源节点发送的数据。

MMRP_LB就是充分利用多信道的优势而设计的一个路由协议,并且原理简单。其主要设计目标是尽可能地减少路由耦合的发生,通过给不同的路径分配不同的信道,数据可以沿着不同的路径在不同的信道上同时并行传输,减少分组的传输时延,提高网络的性能。图1是信道 $N=2$ 时的路由示意图,可以看出,节点S到节点D存在两条最短的不相交路径:S-A-B-D和S-C-E-D。在单信道时,虽然两条路径没有相同的节点和链路,但由于节点A和节点C、节点B和节点E距离较近,两条路径仍然会发生耦合,节点A发送数据的时候,节点C不能发送数据,B和E也有同样的情况;在双信道时,两条路径分别使用信道1和信道2,不会有同信道的干扰,从而避免路由耦合。

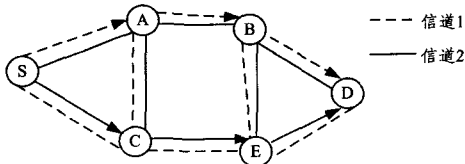


图1 MMRP_LB路由

图2是系统的整体实现框架。系统主要由业务模块、MMRP_LB模块、IP模块和接口模块组成,其中MMRP_LB模块和IP模块是框架的核心。MMRP_LB模块负责路由协议的运作,维护节点的路由表;IP模块负责业务层数据的转发和处理,为传输到其他节点的数据寻路,主要包括路径选择和信道选择;接口模块负责节点负载信息的估计,即可用带宽的估计,并将统计结果交给MMRP_LB模块处理;业务模块

负责应用业务数据的产生和处理。下面将分4部分介绍协议的关键技术。

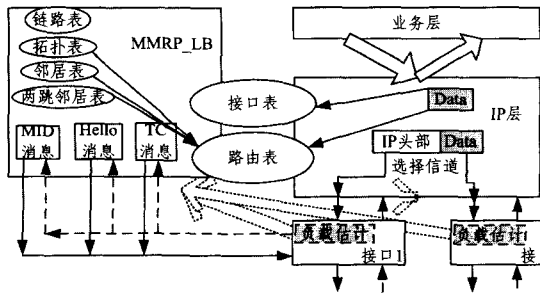


图2 系统实现框架

2.2 多接口声明

MMRP_LB运行在多接口和多信道网络中。由研究前提条件可知,MMRP_LB只需运行在一个接口上就能维护整个网络的路由。为了不引入额外的控制消息开销,MMRP_LB只运行在一个接口上,我们将该接口称为主接口,相应的地址称为主地址,其它的接口称为数据接口。主接口发送控制报文和数据报文,数据接口只发送数据报文。OLSR协议适用于多接口节点的网络。如果多个接口参与Ad Hoc网络和运行OLSR协议,必须通过交换多接口声明消息(MID)定义各个接口与主地址的关系。虽然MMRP_LB只需运行在一个接口上,但是由于数据传输时需要节点的各个接口的地址信息,因此仍然需要周期性地发送多接口声明消息(MID)。

表1是在双信道网络下的信道分配和IP地址分配的示例表,以IP地址/掩码的形式标识每个接口的地址。从表1可以看出,每个节点占用两个信道,并且分配两个属于不同子网的IP地址。假设节点的接口0运行MMRP_LB,通过交互MID消息,网络中每个节点都会保存一张类似表1的接口表。在下面的阐述中,如无特殊说明,所有的操作都是以节点主地址为标示的。

表1 信道分配和IP地址分配表

接口(信道)	IP地址-A	IP地址-B	IP地址-C
0(wlan0-信道1)	192.168.0.1/24	192.168.0.2/24	192.168.0.3/24
1(wlan1-信道6)	192.168.1.1/24	192.168.1.2/24	192.168.1.3/24

2.3 负载估计与负载信息交互

MMRP_LB根据信道的可用带宽来衡量节点负载的轻重。信道可用带宽越宽,说明节点的负载越轻;反之,负载越重。之所以选取信道可用带宽来衡量节点的负载,是因为它能考虑邻居节点间对共享信道的公平占用问题。信道可用带宽估计有很多方式,本文借鉴文献[7]的方法并加以改进。

在给定时间 T 内,节点侦听信道的状态,统计信道的繁忙时间 T_{busy} 。信道的可用带宽定义为 $B_{idle} = \frac{T - T_{busy}}{T} B$,其中 B 为信道的最大带宽。为了使算法对带宽的估计更加精确,防止抖动,MMRP_LB采用了加权平滑的方法。采用加权平滑后的可用带宽定义为

$$B_{available}(k) = B_{available}(k-1) \times \alpha + B_{idle} \times (1-\alpha)$$

式中,平滑系数 $\alpha \in [0, 1]$, $B_{available}(k-1)$ 表示上一次的带宽估计值, $B_{available}(k)$ 表示本次的带宽估计值。

设多信道网络中的节点A有 N 个信道, $B_{available}(chan_k)$ 表示第 k 个信道的可用带宽,则节点A的负载定义为 $Load_A = \min(B_{available}(chan_k))$ 。

路径 path 的负载为

$$Load_path = \min(Load_node_1, Load_node_2, \dots, Load_node_i)$$

式中, $Load_node_k (k=1, 2, \dots, i)$ 为路径 path 除源节点和目的节点外每个中间节点的负载值。

如图 3 和图 4 所示, MMRP_LB 使用扩展的 HELLO 报文和 TC 报文向全网广播各节点的负载信息。节点收到扩展的 HELLO 报文和 TC 报文后更新邻居表、两跳邻居表、MPR Selector 表和拓扑表。

Link Code		Reserved	Link Message Size
Neighbor Interface Address			
Neighbor Interface Address			
.....			
Link Code		Reserved	Link Message Size
Neighbor Interface Address			
Neighbor Interface Address			

图 3 扩展的 HELLO 报文

ANSN	
Advertised Neighbor Main Address	
Advertised Neighbor Main Address	
.....	

图 4 扩展的 TC 报文

2.4 多径路由建立

与传统的 OLSR 协议一样, MMRP_LB 的路由计算是全分布式的。节点根据掌握的网络负载信息和拓扑信息, 在内部运用多重改进的 Dijkstra 算法 (multiple_D_Dijkstra), 计算本节点到网络中其它节点可能存在的多条路径。此外, 为保证数据传输的独立性, 需要在路由建立时保存完整的路径信息 $Path = \{nexthop_1, nexthop_2, \dots, nexthop_i, dest\}$ 。

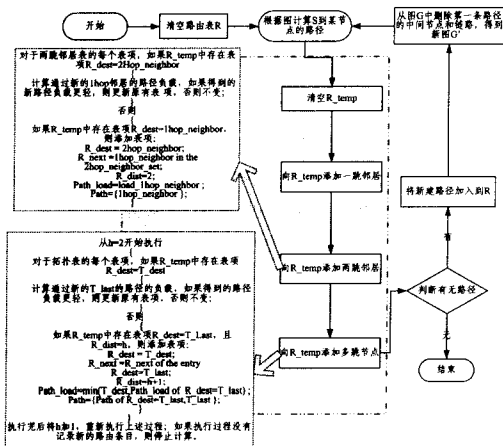


图 5 multiple_D_Dijkstra 算法

为方便研究, 将网络拓扑结构图转换成无向图 $G=(V, E)$, V 是网络中所有的节点集合, E 是网络中的所有链路集合, 假设网络中的链路都是双向的。设 R 代表节点路由表, R_temp 为临时路由表, 图 5 为 multiple_D_Dijkstra 算法的流程图。如果无法计算出到达某一节点的路径, 则停止计算; 当计算出一条新的路径后, 节点会在图 $G=(V, E)$ 中删掉新路径的中间节点及相关联的边, 生成新的图 $G'=(V', E')$, 然后再

计算新的路径, 如此反复, 直到没有发现新的路径。路由建立完成后, MMRP_LB 依次给每条路径分配一个信道, 以后使用该路径传输的分组就会在相应的信道上传递, 真正实现分组的并行传输。

图 6 显示了在图 1 的网络拓扑下建立节点 S 到节点 D 的路径的过程。如图 6 所示, 节点 S 通过运行 multiple_D_Dijkstra 算法最终建立两条路径: S-A-B-D 和 S-C-E-D, 并分别分配信道 2 和信道 1。此外, 节点的路由表结构亦有相应的变化, 路由表新增路径和信道两个表项, 路径会记录每条路径的完整信息, 信道记录为该路径分配哪个信道。

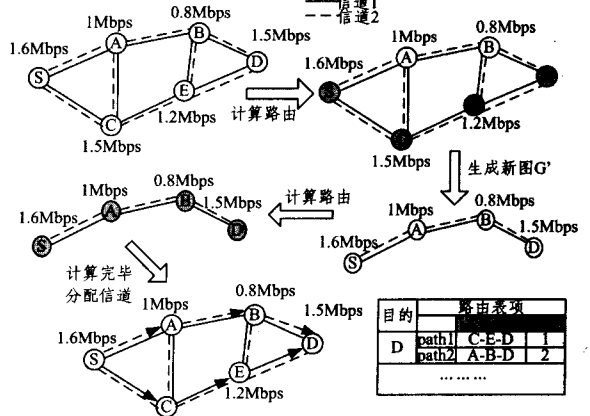


图 6 路由建立

2.5 数据转发

数据转发阶段主要包括路径选择、信道选择、业务流调度和分组在并行路径上的同时传输等。MMRP_LB 使用加权轮询方式进行业务流调度, 每条路径的权值相等。由于信道在路由建立的时候已经分配, 因此为分组选择路径后, 也选择了相应的信道。MMRP_LB 使用源路由机制, 保证多条路径传输的独立性和有效性。源节点在分组的头部填入完整的路径信息, 中间节点不需查找路由表, 只需通过查看分组头部的信息, 就可以决定如何转发分组。

特别需要注意的是, 因为在建立路由时, 节点是以主地址标示的, 所以路径信息也是以主地址标示的, 因此在数据传输时节点需要根据采用的信道, 查找接口表, 将下一跳主地址映射为相应的接口地址。图 7 为 MMRP_LB 的数据传输示意图, 假设源节点 S 使用信道 2 通过路径 S-A-B-D 发送数据到目的节点 D。源节点 S 在分组头部写入路径信息, 并查找接口表得到下一跳节点 A 的接口 2 的地址 A_2 , 最后通过接口 2 将分组转发给节点 A; 节点 A 收到包后, 查看 IP 头部, 先将自己从路径中删掉, 然后查找下一跳的接口地址, 通过接口 2 将分组转发给节点 B; 中间节点按照上述方法依次处理数据, 直到数据到达目的节点 D。

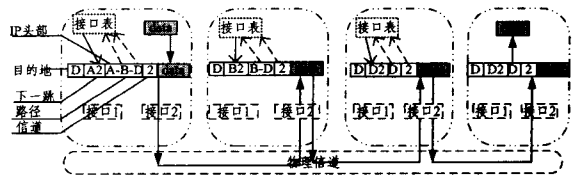


图 7 数据传输

3 仿真

在 OPNET 14.5 下对 MMRP_LB 的性能进行了仿真实

验,并且与 OLSR 和 SMRP_LB 的性能进行了比较。其中 SMRP_LB 为 MMRP_LB 在单信道下的特例。

仿真环境如下:50 个移动节点随机分布于 1000m×1000m 的区域内,每个节点装有两块无线网卡,均使用 IEEE 802.11b MAC 协议,信道通信距离为 250m,信道传输速率为 2Mb/s。IEEE 802.11b 允许使用 11 个信道,但同时只能提供 3 个互不重叠的信道^[10]。仿真时,MMRP_LB 工作在信道 1 和信道 6,OLSR 和 SMRP_LB 工作在信道 1。节点的业务层产生 CBR 业务,每个分组的大小为 512bytes,仿真时随机选取源节点和目的节点。节点移动模型采用典型的 Random waypoint Model^[9],通过改变暂停时间来控制网络的拓扑。仿真时间为 600s,负载估计参数: $\alpha=0.1, T=1s$ 。

仿真性能指标为:平均端到端时延、分组成功递交率、归一化路由开销。

$$\text{分组成功递交率} = \frac{\text{目的节点总共接收的数据分组数}}{\text{源节点总共发送的数据分组数}}$$

$$\text{平均端到端时延} = \frac{\text{目的节点接收到的数据分组的端到端时延总和}}{\text{目的节点总共接收的数据分组数}}$$

$$\text{归一化路由开销} = \frac{\text{目的节点接收的数据分组数}}{\text{网络总的路由控制分组数}}$$

图 8、图 9 和图 10 是网络中有 10 个源节点时在不同的移动速度下 3 种协议的仿真结果。从图 8 可以看出,由于同信道干扰的存在,SMRP_LB 并没有明显地减少时延,而 MMRP_LB 比 OLSR 降低了大约 50%。如图 9 所示,MMRP_LB 的分组成功递交率大约为 92%,SMRP_LB 大约为 84%,OLSR 为 70%左右。图 11 和图 12 显示网络的负载对协议性能的影响。随着网络负载的增加,网络性能受到很大影响,平均端到端时延增大,分组成功递交率降低,但是 MMRP_LB 的时延都要比 SMRP_LB 的时延低 10%~30%左右。在分组成功递交率方面,MMRP_LB 比 SMRP_LB 高 5%~10%。

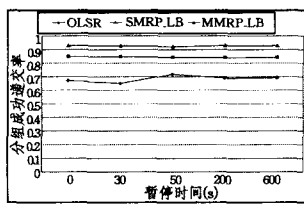
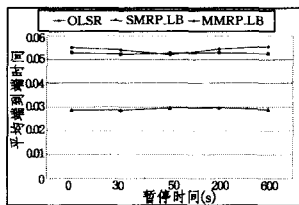


图 8 速度对端到端时延的影响 图 9 速度对分组成功递交率的影响

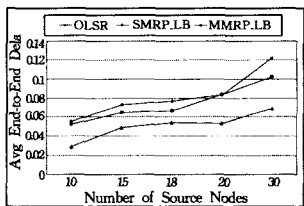
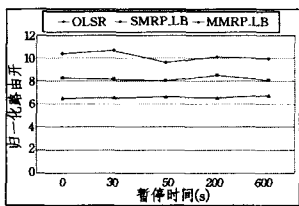


图 10 速度对路由开销的影响 图 11 网络负载对平均端到端时延的影响

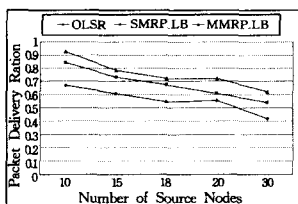


图 12 网络负载对分组成功递交率的影响

从仿真结果可以看出,在不同的移动速度和不同的网络负载下,MMRP_LB 的性能都优于 OLSR 和 SMRP_LB。由于 MMRP_LB 利用多条路径分流均衡网络的负载,并且采用不同的信道并行传输数据分组,避免同信道干扰,尽可能地减少路由耦合,因此它能有效地改善网络的数据传输性能。MMRP_LB 只需运行在一个接口上,没有因为使用多信道而引入额外的路由开销,并且在相同的条件下 MMRP_LB 比 OLSR,SMRP_LB 的分组传送率高,因此其路由开销反而低于 OLSR 和 SMRP_LB 的。

结束语 本文设计和阐述了一种基于 OLSR 的多信道多径负载均衡协议 MMRP_LB,并通过仿真验证了该算法的可行性。MMRP_LB 利用多条不相交的路径分配业务均衡网络的负载,使用不同的信道减少同信道干扰,降低路由耦合的发生;付出的代价就是稍微增加组网的成本,节点需要配置多个网卡。仿真结果显示,与单信道下的情况相比,MMRP_LB 在平均端到端时延、吞吐率等方面都有很明显的改善,适合大规模的多信道 Ad Hoc 网络,能很好地支持节点的移动性和业务负载的变化。

参 考 文 献

- [1] 郑相全,郭伟. 自组网中的负载均衡路由协议[J]. 计算机科学, 2004,31(11):40-45
- [2] Pearlman M R, Haas Z J, Sholander P, et al. On the impact of alternate path routing for load balancing in mobile ad hoc networks[C]// 2000 First Annual Workshop on Mobile and Ad Hoc Networking and Computing, August 2000;3-10
- [3] Lee S J, Gerla M. Split multipath routing with maximally disjoint paths in Ad hoc networks[C]// IEEE International Conference on Communications, Vol10, 2001;3201-3205
- [4] Zhou Xun, Lu Yu, Xi Bin. A novel routing protocol for ad hoc sensor networks using multiple disjoint paths[C]// the 2nd IEEE International Conference on Broadband Networks, 2005; 21-25
- [5] Yan B, Gharavi H. Multi-path Multi-channel Routing Protocol [C]// Fifth IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, July 2006;27-31
- [6] Clausen T, Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) RFC3626-OLSR[EB/OL]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>, October 2003
- [7] Sarr C, Chaudet C, Chelius G, et al. A node-based available bandwidth evaluation in IEEE 802.11 ad hoc networks[C]// Proceedings of 11th International Conference on Parallel and Distributed Systems 2005, July 2005;68-72
- [8] Kyasanur P, Vaidya N. Routing and interface assignment in multi-channel multi-interface wireless networks [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), vol. 4, March 2005;2051-2056
- [9] Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks[C] // Imielinski T, Korth H, eds. Mobile Computing. Chapter 5, Kluwer Academic Publishers, 1996; 153-181
- [10] 雷维礼,马立香. 接入网技术[M]. 北京:清华大学出版社,2006