

# 无线 Mesh 网络先验式多树路由协议的研究与 NS-3 仿真

潘琢金, 吴 昊, 罗 振, 杨 华

( 沈阳航空航天大学 计算机学院, 辽宁 沈阳 110015)

**摘 要:** 针对无线 Mesh 网络, 提出一种支持多路径路由的先验式多树路由协议 (Proactive Multi-Tree Routing Protocol, PMTRP). 通过建立先验式多树及比较积累传播时链路度量 (Accumulated Airtime Link Metric, AALM), 来实现在数据传输过程中的路由选择. 在 NS-3 网络仿真环境下实现 PMTRP 路由协议, 将其与 IEEE 802. 11s 协议中缺省路由协议 HWMP 进行对比, 证明 PMTRP 路由协议拥有更好的网络性能.

**关键词:** 无线网状网; 先验式多树; 多路径路由协议; NS-3 仿真

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000—7180(2016)08—0045—05

## A Proactive Multi-Tree Routing Protocol in Wireless Mesh Networks and NS-3 Simulation

PAN Zhuo-jin, WU Hao, LUO Zhen, YANG Hua

(School of Computer Science & Technology, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110110, Shenyang)

**Abstract:** In view of wireless mess networks, rate, a new routing protocol of PMTRP (Proactive Multi-Tree Routing Protocol) that supports multi-path routing is proposed in this paper. By setting up proactive multi-tree and comparing AALM (Accumulated Airtime Link Metric), it does route selection in the process of data transmission. By implementing the PMTRP routing protocol on NS-3 network simulator, the comparing between PMTRP routing protocol and the default HWMP routing protocol in IEEE 802. 11s proves that PMTRP has better network performance.

**Key words:** wireless mesh networks; proactive multi-tree; multi-path routing protocol; NS-3

### 1 引言

无线 Mesh 网络 (Wireless Mesh Network, WMN) 是一种新型动态自组织自配置无线网络, 它为无线局域网 (Wireless LANs) 覆盖范围有限、集中式结构不适应新式应用、网络拓扑结构中最优路径选择等问题提供了一个解决方案<sup>[1]</sup>.

国际标准化组织在多种物理层协议的无线网络技术标准中融入 Mesh 组网方式. 其中 IEEE802. 11s 协议为 IEEE802. 11 协议提供 Mesh 拓扑发现和形成、路径选择和转发、Intra-Mesh 拥塞控制等 Mesh 功能<sup>[2]</sup>.

混合无线 Mesh 协议 (Hybrid Wireless Mesh

Protocol, HWMP) 是 IEEE 802. 11s WLAN Mesh 标准的默认路由协议, 它基于 RM-AODV (Radio Metric AODV) 协议, 结合了反应式路由协议和基于树状拓扑的先验式路由协议的优点, 使其能够在多种多样的 Mesh 网络中高效地进行路径选择<sup>[3]</sup>.

HWMP 协议由于采用了以 MPP 节点为根树的树型拓扑的网络结构, 其路由方式过于依赖根节点, 所以靠近根部的链路和节点会成为整个网络流量的瓶颈, 导致网络拥塞.

针对此问题, 有多种类型的无线 Mesh 路由协议被提出, 文献[4]提出一种基于树的 WMN 路由协议 (Optimized Tree-based Routing, OTR), 文献[5]提出一种多径路由协议 MGMP (Multi-Gateway

Multipath Routing Protocol),文献[6]改进了 ALM 的计算方法,在传输速率和信道质量之外增加链路质量作为路由质量判断依据,优化路由选择结果. 本文提出一种新的先验多树多路径路由协议.

2 网络生成过程

2.1 多树结构

在 HWMP 路由协议中,网络中的节点组成了一棵以 MPP 节点为根节点的先验式树型拓扑结构. 为避免单树结构中的根节点负载过大,PMTRP 路由协议采用多树的网络结构,每个 MPP 节点或 MAP 节点都会拥有一棵以它为根节点的树.

2.2 辅助节点筛选及先验式多树生成

由于 MAP 节点和 MPP 节点的先验式多树生成过程基本相同,为方便描述,本文统称为终端节点(Mesh Terminal Point, MTP). 对于网络中每一终端节点,其树型路由路径的生成过程如下.

首先由终端节点进行辅助节点(Mesh Secondary Point, MSP)的选择. MSP 节点是树中根节点的子节点,PMTRP 路由协议中用 MSP 节点区别通向同一个 MTP 节点的多条路径. 在网络拓扑结构上,选出的 MSP 节点是 MTP 节点的邻居节点之一.

辅助节点选择过程通过 SREQ(Secondary Request)、SREP(Secondary Reply)、SACK(Secondary Acknowledgement)三种控制帧来实现. MTP 节点先广播 SREQ 帧,其邻居节点在接收到 SREQ 帧之后,将自身信息以 SREP 帧发送回 MTP 节点. 在经过网络设定的时间后,MTP 节点在所有 SREP 帧的发送者中选择链路度量最好的几个作为自己的 MSP 节点,并向对应的 MSP 节点发送 SACK 帧确认选择. 辅助节点选择过程流程图如图 1 所示.

辅助节点选择过程后,MSP 节点向 MTP 节点发送 PGER 帧(Path Generate Reply)来确认接收到 SACK 帧,并开启路径生成过程,如果 MTP 节点在指定时间内未能收到来自 MSP 节点的 PGER 帧,将会重发 SACK 帧. 同时 MSP 节点将向邻居节点广播 PGEN(Path Generate)帧. 如果在邻居节点接收到 PGEN 帧,且此 PGEN 帧能够通过效验,那么它将使用 PGEN 帧的信息更新路由表,同时洪泛的形式继续转发依据邻居节点信息进行更新的 PGEN 帧. 最终使网络中的全部节点加入到 MSP 节点为根的树型结构中. 先验式多树生成过程流程图如图 2 所示.

MTP 节点生成的网络中,除 MTP 节点自身

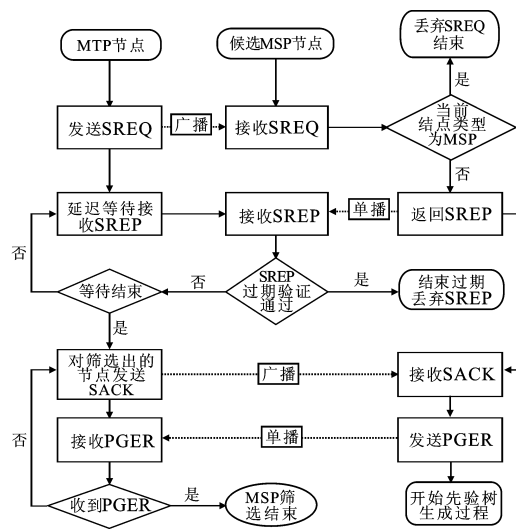


图 1 辅助节点选择过程流程图

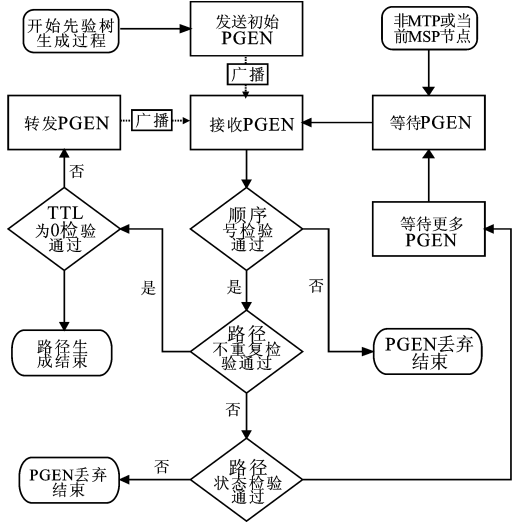


图 2 先验式多树生成过程流程图

外,其他节点全部都会分别加入 MSP 节点对应的子树,并且网络中除 MTP 节点外的其他节点同时属于每棵 MSP 节点为根节点的树型拓扑结构. 即网络中除 MTP 节点自身外的其他节点都有多条通往 MTP 节点的路径,其路径与 MTP 节点所属的 MSP 节点一一对应. 图 3 所示为从右左下节点通向右上节点的三条不同路由路径.

在使用 PMTRP 协议的无线 Mesh 网络中,每个 MTP 节点都会在指定周期内进行路径生成过程,这样,当路径生成过程结束后,网络中的任意一个 MTP 节点都有多条单向路径通往任意的一个其它 MTP 节点. 网络中全部 MTP 节点的路由路径生成完成即说明整个网络的多树结构生成过程结束.

2.3 路径重复避免

由于每一个 MTP 节点生成过程中,所属全部

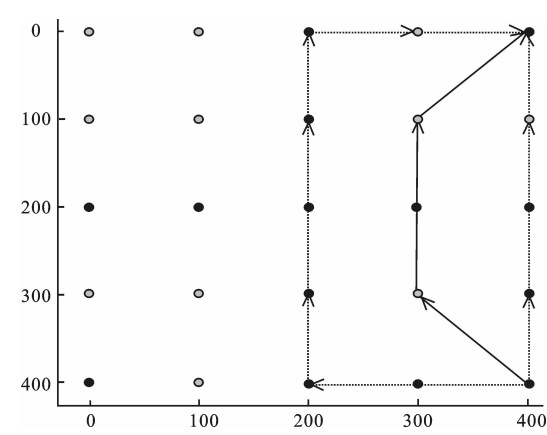


图 3 从右下节点到达右上节点的路径

MSP 节点的 PGEN 帧同时在网络中转发,因此节点收到的不同 MSP 节点的 PGEN 帧可能有相同的发送者.这意味着如果简单的选择最先到达的 PGEN 帧的发送者作为下一跳节点,会导致通往 MTP 节点的多条路由路径重复,如图 4 所示.为避免这种情况,PMTRP 使用路径不重复效来验筛选接受的 PGEN 帧.

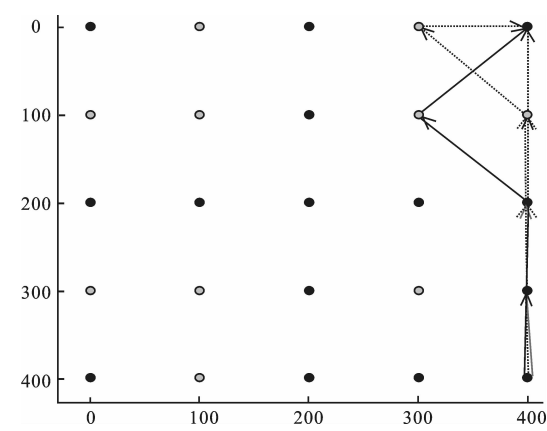


图 4 不使用路径不重复检验的多路径

路径不重复检验以路径重复度作为效验依据,路径重复度的定义是:当前路由路径生成过程中,以某一节点作为 MTP 节点的不同 MSP 节点对应的路径中的下一跳节点的计数.如果没有任何路径采用这个节点作为下一跳节点,那么路径重复度为 0.

为提高路由路径生成速度,在生成过程中只直接接受当前生成周期内路径重复度为 0 的节点的 PGEN 帧,并以此邻居节点 PGEN 帧对应的路由路径的下一跳节点.

在其他的情况下,节点将延迟等待接收更多的 PGEN 帧.如果在等待结束前接收到符合发送节点路径重复度为 0 的 PGEN 帧,则直接接受 PGEN 帧并停止等待,否则将在等待计时到期后采用多个候

选 PGEN 帧中路径重复度最小的一个,如果选出结果不是唯一,则在其中选择链路度量最小的一个.

通过路径不重复检验,可以有效地避免路径重复导致的多路径的冗余降低.如图 3 及图 4 对比,在相同条件下,图 3 使用路径重复检验,路径完全不重复;图 4 中未使用路径不重复检验,可见其中路径部分重复.

2.4 路由路径维护

为保证积累传播时链路度量的实时更新,网络中的节点通过 PUPD(Path Update)帧来通知下一跳节点更新链路度量.如果 PUPD 帧中的路由路径能够在接收节点的路由表中找到,且其记录的下一跳节点为 PUPD 帧的发送节点,那么接收节点将更新其路由表中此路径的链路度量.

如果 PUPD 帧中的路由路径无法在接收节点的路由表中找到,说明路由路径未能在接收节点上生成.它将向 PUPD 帧的发送节点发送 PUPGQ(Path Update Path Generate Request)帧请求继续进行路径生成. PUPGQ 帧引发的路径生成过程与 SACK 帧引发的路径生成过程相同.

通过 PUPD 帧及 PUPGQ 帧可以保证路径生成过程中生成的树型拓扑结构布满整个网络. PUPD 帧的发送周期需要参考实际网络的平均负载,在更好的维护路由路径的同时降低控制帧数量.

3 积累传播时间链路度量积累计算

HWMP 中路由路径的链路度量以节点间的度量直接累加方式进行计算,虽然这种方案计算量较小,但没有考虑路由路径中各个节点间链接的先后顺序.而在实际的网络数据帧传输过程中,节点间的链接质量是实时变化的.在路由路径中,越靠近当前节点的链接,其链接质量越接近真实链路质量,这是因为较远的节点的度量信息需要更多的时间传递.因此,靠近当前节点的链路度量更能准确的描述当前的链路状态,所以它应该在积累运算过程中拥有更大的权重.

为此本文提出一种带权值的累加方案,即积累传播时间链路度量(Accumulated Airtime Link Metric, AALM),其路由路径中第  $i$  跳节点中积累传播时间链路度量的值由递推公式(1)计算出:

$$AALM_i = \frac{ik_i c_i + (i-1)AALM_{i-1}}{i+1} \tag{1}$$

或由通项公式(2)计算出:

$$AALM_i = \sum_{j=1}^i \frac{j^2 k_j c_j}{(i+1)i} \tag{2}$$

其中  $k$  为节点类型区分参数,用于增加 MPP 和 MAP 等特殊节点的权值,降低此类节点的负载.  $c$  为每跳节点间链路度量,除使用 ALM 外,AALM 还可以采用其他可以计算节点间链路度量的度量机制,保证其优点的前提下提高原有机制度量值的实时性.

式(2)中,AALM 中路由路径中链路度量的权值与其距离目标节点的跳数成正比,即距离当前节点越近,权值越大.

4 仿真实验及分析

仿真实验使用 NS-3 仿真软件来实现,版本为 NS-3. 23. 此版本支持 IEEE 802. 11 INT 1-2012 协议中 Mesh 网络相关标准<sup>[7]</sup>.

为了评估 PMTRP 协议性能,以相同的参数对 PMTRP 协议和 HWMP 协议进行仿真,从数据包投递率(Packet Delivery Ratio,PDR)、吞吐量、及延迟三方面进行对比.

在仿真过程中,随机放置 5 对 NS-3 应用层模块 OnOffHelper 进行仿真. 模块的启动间隔为 6~10 秒,每对应用模块的运行时间为 26 秒. 仿真实验参数如表 1 所示.

| 表 1 实验仿真参数设置 |                                                |
|--------------|------------------------------------------------|
| 参数           | 取值                                             |
| 节点拓扑结构       | 正方形                                            |
| 节点个数         | 4×4、5×5、6×6、7×7                                |
| 节点间距         | 100 m                                          |
| 物理层协议        | IEEE 802. 11g(ERP-OFDM <sup>[8]</sup> ,9 Mb/s) |
| 信道数量         | 单信道                                            |
| NS-3 应用层模块   | OnOffHelper                                    |

数据包投递率是源节点应用层发送的数据包与目标节点接收到的数据包的比值关系,即正确传输数据包的统计度量. 实验表明,随着网络节点总数增加,网络数据包投递率逐步降低. 尽管在局部路径上,PMTRP 协议表现较差,但总体平均统计结果上 PMTRP 协议表现较好. 从不同大小的网络布局的仿真结果来看,PMTRP 协议的优势随着网络规模的增加而更加明显.

由仿真结果可见,在网络吞吐量方面,PMTRP 协议有着与数据包投递率相近的结果,虽然局部路径有所差异,但是在总体平均统计平均结果上,PMTRP 仍然有更好的表现.

由表 2 中所列仿真结果可见,在平均延迟上

PMTRP 协议相比 HWMP 协议能够有效的降低延迟,并且在较大规模的网络中有着更加明显的效果.

| 表 2 平均延迟   |               | 秒             |
|------------|---------------|---------------|
| 数据收发对      | PMTRP         | HWMP          |
| 4×4:14->10 | 0. 002 277 23 | 0. 001 164 42 |
| 4×4:8->7   | 0. 002 542 39 | 0. 001 217    |
| 4×4:6->13  | 0. 002 341 43 | 0. 003 731 21 |
| 4×4:2->10  | 0. 002 362 79 | 0. 002 762 23 |
| 4×4:16->11 | 0. 002 220 6  | 0. 002 720 06 |
| 5×5:6->2   | 0. 002 245 77 | 0. 003 763 04 |
| 5×5:7->23  | 0. 003 622 27 | 0. 005 214 5  |
| 5×5:11->22 | 0. 002 313 73 | 0. 017 987 2  |
| 5×5:13->23 | 0. 003 457 77 | 0. 113 508    |
| 5×5:7->10  | 0. 005 204 69 | 0. 007 315 32 |
| 6×6:2->24  | 0. 016 742 7  | 0. 019 924 4  |
| 6×6:20->5  | 0. 020 404 5  | 0. 048 444 6  |
| 6×6:33->2  | 0. 007 646 46 | 0. 031 950 3  |
| 6×6:13->29 | 0. 011 926 7  | 0. 026 282 5  |
| 6×6:9->29  | 0. 023 479 2  | 0. 020 938 8  |
| 7×7:25->7  | 0. 070 345 1  | 0. 169 697    |
| 7×7:26->21 | 0. 030 017 8  | 1. 327 65     |
| 7×7:30->26 | 0. 045 167 1  | 5. 249 79     |
| 7×7:21->1  | 0. 023 103 6  | 1. 212 14     |
| 7×7:45->37 | 0. 003 185 57 | 0. 020 876 3  |
| 4×4:平均     | 0. 002 348 88 | 0. 002 315 97 |
| 5×5:平均     | 0. 003 368 85 | 0. 029 399 9  |
| 6×6:平均     | 0. 016 001 4  | 0. 029 984 8  |
| 7×7:平均     | 0. 027 677 8  | 1. 460 68     |

5 结束语

本文提出一种基于先验式多树的多路径路由协议. 该协议通过生成多棵先验式树的方式,避免了 HWMP 协议中单棵树根节点负载较高的问题. 采用路径重复检验的方法,避免多路径路由中由于路径重复导致的路径冗余下降. 提出一种新的链路度量累计方式,可以更好的体现真实路径状况. 经过仿真验证,本文提出的协议能够有效地降低丢包率,提高网络吞吐量,降低延时.

参考文献:

[1] Guido R Hiertz, Dee Denteneer, Sebastian Max, et al.

- IEEE 802.11s: the WLAN mesh standard. [J]. IEEE Wireless Commun., 2010, 17(1):104-111.
- [2] 张牧,严军荣. 802.11s 无线 mesh 网络研究进展与挑战[J]. 计算机工程与应用,2010,46(22):75-79.
- [3] 杨孟珂,杨亚涛,白中英. 基于 HWMP 协议的无线 Mesh 网络多网关路由协议研究[J]. 微电子学与计算机,2009,26(12):4-8.
- [4] 姬文江,马建峰,马卓,等. 无线网格网中一种基于树的先验式路由协议(英文)[J]. 中国通信,2012,8(1):25-33.
- [5] Hu Yun, He Weiqing, Yang Shoubao, et al. Multi-gateway multi-path routing protocol for 802.11s WMN [C]// proceedings of IEEE 6th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob'10). Ontario, Canada, 2010:308-315.
- [6] 李茜,刘经纬,周雅楠,等. 基于 IEEE 802.11s 的无线 Mesh 网络路由协议研究[J]. 现代电子技术,2013,36(23):36-40.
- [7] NS-3 developers. NS-3 Tutorial 2015[EB/OL]. [2015-11-15]. <https://www.nsnam.org/documentation/>. 2015.
- [8] IEEE 802.11 INT 1-2012, IEEE Std 802.11-2012 用 IEEE 标准解释文件. 信息技术用 IEEE. 系统间通信和信息交换. 局域网和城域网. 专门要求. 第 11 部分:无线 WAN 媒体访问控制(MAC)和物理层(PHY)规范[S]. 美国,加利福尼亚,电气和电子工程师协会,2012.

### 作者简介:

**潘琢金** 男,(1962-),教授,硕士生导师. 研究方向为嵌入式系统、计算机检测与控制.

**吴昊(通讯作者)** 男,(1988-),硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统. E-mail:whimsyduke@163.com.

**罗振** 男,(1981-),博士,讲师. 研究方向为以太网路由技术、嵌入式系统.

**杨华** 男,(1974-),博士,副教授. 研究方向为计算机系统结构、智能人机交互、仿人机器人、机载计算和智能控制.

(上接第 44 页)

- [8] 何宾. Xilinx FPGA 设计权威指南[M]. 北京:清华大学出版社,2014.
- [9] Xilinx. Vivado design suite user guide: high-levelSynthesis [EB/OL]. [2015-11-10]. [http://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals/xilinx2012\\_2/ug902-vivado-high-level-synthesis.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals/xilinx2012_2/ug902-vivado-high-level-synthesis.pdf).
- [10] 袁春兰,熊宗龙,周雪花,等. 基于 Sobel 算子的图像边缘检测研究[J]. 激光与红外,2009,39(1):85-87.

### 作者简介:

**刘伟** 男,(1990-),硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统设计与集成. E-mail:313165240@qq.com.

**柴镇** 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为嵌入式软件.

**周浩杰** 男,(1981-),博士,高级工程师. 研究方向为计算机系统结构、大数据处理.

**吴东** 男,(1971-),博士,高级工程师. 研究方向为 FPGA 高效能计算机.

**柴志雷** 男,(1975-),博士,副教授. 研究方向为嵌入式系统设计技术、高性能视觉系统、基于 FPGA 的可重构计算和 FPGA 操作系统等.