

# 一种基于跨层的无线 Mesh 网络路由协议

邵 艳,苏 杰,肖明波

(厦门大学 福建 厦门 361005)

**摘 要:**无线 Mesh 网络的很多技术特点和优势来自于 Mesh 多跳路由。因此,路由协议的研究与设计是无线 Mesh 网络技术的一个重要课题。由于无线 Mesh 网络有自身负载均衡、路由容错与网络容量等要求,因此运用跨层设计,采用更好的路由参数,使用多径路由等方法已经成为无线 Mesh 网络路由协议设计的重要思路。根据无线 Mesh 的网络特点,按照其路由协议的设计要求,分析了路由协议 DSR 在 Mesh 网络中的不足,引入跨层设计的方法,提出了采用路由质量路径帧投递率(PFDR)为路由准则,并具有负载均衡、拥塞避免的路由协议 CMRP。分析和仿真结果表明,CMRP 在保持 Mesh 网络自身优点的同时,比起 DSR 在网络性能上有了较大的提升,在吞吐率方面有了很大的提高,相应的时延、抖动参数均有了大幅的下降,更加适用于无线 Mesh 网络。

**关键词:**路由协议;无线 Mesh 网络(WMN);跨层设计;链路帧投递率(LFDR)

中图分类号:TN915.02

文献标识码:A

文章编号:1004-373X(2009)19-027-03

## Routing Protocol of Wireless Mesh Network Based on Cross-layer

SHAO Yan, SU Jie, XIAO Mingbo

(Xiamen University, Xiamen, 361005, China)

**Abstract:** Wireless Mesh Network (WMN) is a technology with outstanding technical characteristics and advantages, many of which originate from the multi-hop routing. Therefore, the study and design of routing protocol is of utmost importance for WMN. In order to satisfy the requirements of WMN such as load balancing, fault tolerance, network capacity, techniques such as cross-layer design and multi-path routing may have to be considered in protocol design for WMN. The deficiencies of Dynamic Source Routing (DSR) protocol applied in WMN is analysed, and an improved routing protocol Cross-layer Multi-path Routing Protocol (CMRP) is proposed, using PFDR (Path Frame Deliver Rate) as the measure. Analysis and simulation results show that CMRP greatly improved the network performance, in load balancing, congestion avoidance, link failure sensing mechanism and the capability of multi-path routing.

**Keywords:** routing protocol; wireless Mesh network; cross-layer design; link frame deliver rate

## 0 引言

无线 Mesh 网络(WMN)是在移动自组织网络(MANET)和无线局域网(WLAN)基础上发展起来的一项网络技术,它作为下一代因特网核心网的无线版本,有效地解决“最后一公里”瓶颈问题<sup>[1]</sup>,是一种具有动态自组织、自配置、高速率、大容量等特性的分布式宽带无线网络。

当前,WMN 的 MAC 协议大多采用 IEEE 802.11,使用这种 MAC 协议的 Mesh 网络也称为 Wi-Mesh。跨层设计的主要思想在网络各层共享相关的信息,对无线网络进行整体设计,因此所有层间可以交互信息,使得协议栈能够以全局的方式适应特定应用所需的 QoS

和网络状况的变化,并根据系统的约束条件和网络特征来进行综合优化,实现对网络资源的有效分配,提高网络的综合性能<sup>[2]</sup>。跨层路由<sup>[3]</sup>便是将跨层的设计思想引入路由的设计中,进而提高网络性能。WMN 的很多技术特点和优势来自于 Mesh 多跳路由<sup>[4]</sup>,该文的目的是在尽量保持网络分层结构的基础上,运用跨层的方法设计出一个适用于 Wi-Mesh(后文中直接统称 WMN)的高性能路由协议。

动态源路由(DSR)是一种以最小跳数为度量,基于源路由机制,采用按需路由策略的路由协议,它允许节点从多跳无线网络中动态地发现一条通向任何目的节点且跳数最少的路由。DSR 的路由发现与维护按需进行,不需周期性传递控制包,可节省大量带宽,但 DSR 在路由选择时采用的最小跳数度量准则,可能导致每一跳传输距离过大,从而导致接收端信号减弱,给网络带来不必要的重传,而且 DSR 没有充分利用所获得的多

收稿日期:2009-03-11

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(A0710022)

径路由,也没考虑负载平衡来提高网络性能。这里对 DSR 进行适当的改进,希望既保持 DSR 的优点,又避免上述缺陷。

## 1 改进的路由协议 CMRP

### 1.1 新路由准则:路径帧投递率(PFDR)

用来表征链路质量的参数有多种,如 mETX<sup>[5]</sup>, ENT<sup>[5]</sup>等,这些链路质量参数都可从网络层直接获得,文献[6]分析了上述参数的优劣。网络层的链路质量参数主要都是基于一个最基本的链路性能:链路包投递率(Link Packet Deliver Rate, LPDR)。LPDR 表征了数据包经过某条链路时,在网络层可成功传送的概率。但仅限于网络层不足以精确衡量某一链路的质量,而在 MAC 层则可相对客观地反映链路的质量。对于无线网络,当信号差、误码率较高,接收的数据帧多次校验错误,使多次重传失败时的丢包能较好地反映链路质量。此时链路质量与节点位置、距离、发射功率、调制技术等有关,路由协议根据此情况下获得的参数,可得到较优的路由。文中采用跨层交互的方法,在 MAC 层计算出与 LPDR 类似的参数:链路帧投递率(Link Frame Deliver Rate, LFDR),作为度量链路质量和选路的参数。

一般来说,LFDR 是由链路的前向节点计算的,在按需式路由的路由请求中,上游节点要将全部已知下游节点的地址与相应的链路质量都加入请求信息包中,这大大增加了请求信息包长度,且使其长度变得很不稳定。CMRP 采用后向计算的方法获得 LFDR,整条路由的 PFDR 就是路由中每段链路 LFDR 的连乘<sup>[7]</sup>。

对于链路中的两个节点,当下游节点接收到上游节点发给它的 RTS 时,说明上游节点成功获得预定信道,将有数据帧发送给此下游节点。下游节点用计数器  $T_{\text{tran}}$  记录接收到的此类 RTS 的次数。 $T_{\text{tran}}$  表示下游节点感知到的上游节点传送给它的数据帧的发送次数。

每当下游节点成功接收到上游节点发送的数据帧并校验无错时,表明上游节点成功将数据帧发送给此下游节点。下游节点使用一个计数器  $T_{\text{rec}}$  记录接收到的此类帧次数。 $T_{\text{rec}}$  表明下游节点成功接收来自上游节点的数据帧次数。

因此,链路的后向帧传递率计算公式为:

$$\text{LFDR} = (T_{\text{rec}} / T_{\text{tran}}) \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中的 LFDR 就是链路帧传递率。

(1) 路径帧传递率(Path Frame Deliver Rate, PFDR)

LFDR 只能反映某条链路情况,而由概率知识可知,整条路由的 PFDR 与路由中的每段链路 LFDR 的关系是:

$$\text{PFDR} = \prod_{i=1}^{n-1} \text{LFDR}_{i,i+1} \quad (2)$$

式中: $n$ 表示此路径的节点总数; $i$ 表示此路径从源节点起算的第  $i$  个中间节点, $i=1$  表示源节点, $i=n$  表示目的节点; $\text{LFDR}_{i,i+1}$  则表示第  $i$  个节点到第  $i+1$  个节点的链路帧传递率。

(2) PFDR 参数与 CMRP 的结合

CMRP 主要选路原则:最优的 PFDR。

LFDR 的获取:在 CMRP 中,每个节点都维护着其他节点到本节点的 LFDR 信息。LFDR 是按需更新的,当需要(收到 RREQ)时,节点提取从 MAC 计算出来的 LFDR,存放到自身状态变量中。

PFDR 的获取:在 CMRP 的路由发现过程中,中间节点收到 RREQ 后,在做任何处理前,先将本节点 LFDR 值与 RREQ 中的 PFDR 值相乘,用相乘结果更新 RREQ 的路由质量值。

PFDR 的使用 1:在 CMRP 的路由发现过程中,目的节点会收到多条从源节点发来经过不同路径的同一类 RREQ,通过这些 RREQ 中的路由质量信息,CMRP 可以选择优质路由。

PFDR 的使用 2:在 CMRP 的源路由数据包传输过程中,通过路由质量信息,可以基于路由质量的变化情况对路由进行主动维护。

PFDR 的使用 3:在 CMRP 的源路由数据包传输过程中,若存在非相关多径路由,源节点可以通过路由质量信息分配流量给这些路径。

### 1.2 拥塞避免

WMN 的数据业务具有很大的随机性与突发性,使得网络中容易出现某些节点的负载突然加重,局部发生拥塞。队列长度是拥塞的主要标志,MAC 层的剩余带宽、延迟等参数也主要由队列长度决定。再加上队列的长度相对于其他 MAC 层参数变化慢,能较稳定地反映网络拥塞程度,许多文献都以节点队列长度所定义的节点负载度来衡量拥塞的程度<sup>[8]</sup>。因此,该文选用 MAC 层接口队列来度量节点负载。

节点负载度与拥塞系数:

当 MAC 层输出队列的长度到达一定程度(拥塞门限)时,记为  $Q_{\text{th}}$ ,网络出现拥塞。定义此时 MAC 层输出队列的长度  $Q_{\text{th}}$  与最大长度  $Q_{\text{max}}$  的比值为拥塞系数:

$$= Q_{\text{th}} / Q_{\text{max}}, \quad 1 \quad (3)$$

将 MAC 输出队列当前长度  $Q$  与最大长度  $Q_{\text{max}}$  的比值,定义为节点负载度  $L_d$ :

$$L_d = Q / Q_{\text{max}} \quad (4)$$

这样,当队列当前长度  $L_d < 1$  时,网络未出现拥

塞;当  $L_d$  时,网络出现拥塞。

通过建模和分析可以得出拥塞系数的参考值,它可用仿真时的指导。根据文献[9],可以取  $\alpha = S_{max}$ ,其中  $S_{max}$  为 MAC 层的最大归一化吞吐量。另外,在 CMRP 中还通过引入预警门限 Pre (Pre 值略小于  $\alpha$ ),增加了预测拥塞的能力。

### 1.3 CMRP 的其他性能改进

在 CMRP 中除了提出新的路由准则 PFDR 和拥塞避免参数  $L_d$  之外,还在非相关多径路由、断链判定和主动路由方面进行了考虑,进一步提高网络的性能。中间节点通过对 RREQ 的转发次数进行限制,使目的节点可以根据 PFDR 选择最优非相关路由进行回复。在 CMRP 中,根据下游节点是否可以收到上游节点的 RTS 情况来判断是否断链,并且在断链的上游节点处进行维护。除此之外,CMRP 还改进了侦听路由缓存机制,CMRP 将按需路由与主动路由相结合,适用于节点变化小而业务要求高的 WMN 中。

## 2 网络仿真与分析

本文使用 QualNet 网络仿真工具<sup>[10]</sup>,对改进的 CMRP 与原 DSR 进行路由协议的性能进行仿真比较,以证实改进思路的正确性与改进结果的有效性。仿真中采用的性能参数分别是网络平均吞吐量、网络平均时延、网络平均抖动。

WMN 是准静态网络,仿真场景中节点全部设置静态,如图 1 所示,场景中节点分布呈 8 × 8 的正方形网格结构,节点间距为 180 m,仿真中比较的是 DSR 与 CMRP 的性能,仿真时间设定为 200 s。

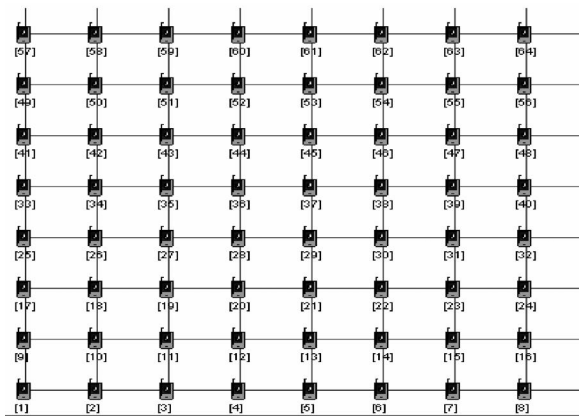


图 1 随机业务模型场景

为了更加真实地模拟因特网数据业务流的情况,突出业务流的随机特性与突发特性,采用 Quagnet 中的应用层协议 Traffic Gen 来产生具有某种分布特性的随机业务流。根据研究,以 Pareto 分布,ON/OFF 模型生成业务流的叠加符合因特网业务流的特性<sup>[11]</sup>。

随机选取 16 条 Traffic Gen 业务流,ON 期间比例分别为 20%,40%,60%,80%,100%,也就是 Traffic Gen 业务流的发送概率从 0.2 增加到 1.0,相应业务流的突发性就越来越低了。第二组随机选取 16 条 Traffic Gen 业务流,其余设置同于第一组。Traffic Gen 的 ON 期间长度分布由均一分布改为 Pareto 分布。仿真结果如图 2 ~ 图 4 所示。

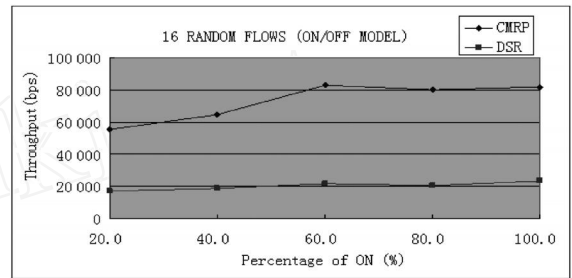


图 2 平均吞吐量 - 发包率的性能曲线

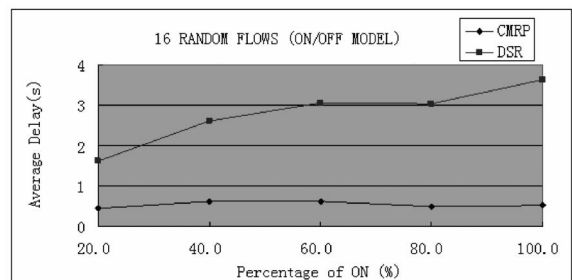


图 3 平均时延 - 发包率的性能曲线

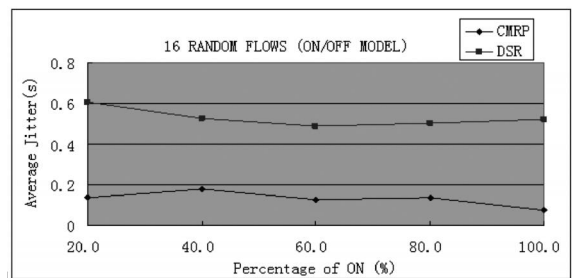


图 4 平均抖动 - 发包率的性能曲线

从图 2 ~ 图 4 可以看出,对于重负载下 16 条随机业务流的情况,DSR 与 CMRP 的差距非常明显,CMRP 的性能优越更加体现出来。CMRP 在保持性能平稳的同时,平均吞吐量约为 DSR 的三倍,而平均时延及平均抖动都在 DSR 的 40% 以下。

仿真结论如下:

为了真实地模拟因特网数据业务流量特性,设置了 16 条随机连接的 ON/OFF 业务流场景中,比较平均吞吐量、平均时延、平均抖动三个网络性能参数可以看到,CMRP 的性能比起 DSR 有了极大的提高,能够适应网络中业务流的随机特性与突发特性。

(下转第 41 页)

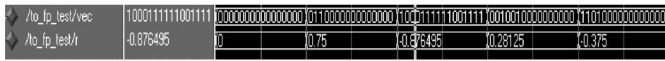


图 5 16 位补码转换为实数的仿真波形图

在完成了对输入、输出数据的转换之后,编写 Testbench(测试台)程序,对基于流水线设计的四输入 MAC 进行行为级仿真,仿真波形如图 6 所示。

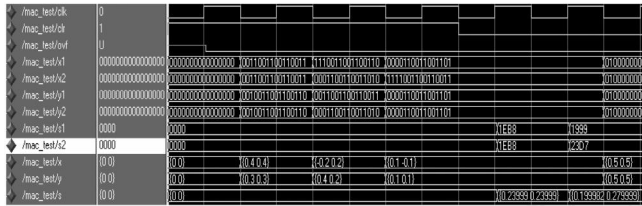


图 6 MAC 行为级功能仿真图

综上所述,在基于流水线的乘法设计中,虽然每一步操作后都加入了寄存器,消耗了更多的资源,但却可以将系统延时降低到最慢步骤所需要的时间,极大地提高了同步电路的运算速度。

### 3 结 语

介绍了基于三层前馈 BP 神经网络的图像压缩算法,提出了基于 FPGA 的实现验证方案,详细讨论了实现该压缩网络组成的重要模块 MAC 电路的流水线设计。在对 BP 神经网络的电路设计中,对传输函数及其导函数的线性逼近也是近来研究的热点之一,本文使用的压缩查找表虽然能够满足设计要求,但仍然消耗了大

量资源。该研究结果对整个压缩解压缩算法的实现以及多层神经网络的相关研究工作提供了参考。

### 参 考 文 献

- [1] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社,2007.
- [2] 赵宏怡. DSP 技术与应用实例[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 刘艳萍. DSP 技术原理及应用教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [4] 苏涛,蔺丽华. DSP 实用技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [5] 田华,冯勤群,胡喜飞. 基于 DSP 和 FPGA 的高速图像压缩系统设计[J]. 电子工程师,2005,31(8):51-52.
- [6] 张秀艳. 基于 FPGA 的神经网络硬件实现中的关键问题研究[J]. 科技情报开发与经济,2005,15(5):273-275.
- [7] 冯春丽. 基于改进型 BP 网络图像压缩方法的研究[D]. 锦州:辽宁工学院,2007.
- [8] 张锐菊,周诠. 神经网络用于遥感图像压缩的一些研究结果[J]. 中国电视学与图像分析,2003,8(3):183-186.
- [9] Ferreira P, Ribeiro P, Antunes A, et al. Artificial Neural Networks Processor: A Hardware Implementation Using a FPGA[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Field - Programmable Logic and Applications[C]. Antwerp,2004:1 084 - 1 086.
- [10] Ashenden P.J. The Designer's Guide to VHDL[M]. Second Edition. USA:Elsevier Science,2002.

(上接第 29 页)

### 3 结 语

根据 WMN 的节点准静态特性,基于 DSR 设计了一种跨层多径路由协议 CMRP,在其中添加主动路由的思想,增加了链路质量判决、拥塞避免及多径路由、路由断链判定等机制。仿真结果表明,比起原来的 DSR,CMRP 在平均吞吐率、平均时延、平均抖动等网络性能上都有较大的提高,达到了预期的目标,可以更好地适用于 WMN。

### 参 考 文 献

- [1] 方旭明. 下一代无线因特网技术:无线 Mesh 网络[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.
- [2] 罗明胜,黄联芬,姚彦. 无线网络跨层设计的研究现状及展望[J]. 移动通信,2005,29(7):95-98.
- [3] 方旭明,马忠建. 无线 Mesh 网络的跨层设计理论与关键技术[J]. 西南交通大学学报,2005(12):711-719.
- [4] Bruno R,Conti M, Gregori E. Mesh Networks: Commodity Multihop Ad Hoc Networks [J]. IEEE Communications

Magazine,2005,43(3):123-131.

- [5] Koksai C E,Balakrishnan H. Quality Aware Routing Metrics for Time - varying Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2006:1 984 - 1 994.
- [6] Ekram Hossain, Kin K Leung. Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols[M]. Springer,2007.
- [7] 沈强,方旭明. 无线 Mesh 网中一种基于综合准则的 DSR 扩展路由方法[J]. 电子学报,2007,35(4):614-620.
- [8] 郭嘉丰,张信明,谢飞,等. 基于节点空闲度的自适应移动 Ad Hoc 网络路由协议[J]. 软件学报,2005,16(5):960-969.
- [9] 于明刚. 论无线网状网路由分组接收率的提高与网络性能的改进[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [10] Scalable Network Technologies [EB/OL]. http://www. QualNet.com,2005.
- [11] Hans - Peter Schwefel, Lester Lipsky. Impact of Aggregated, Self - Similar ON/OFF traffic on Delay in Stationary Queueing Models (Ext. Version)[A]. Performance Evaluation[OL]. 2000.