

分层信标驱动的无线 Mesh 网多播差错控制协议

席鹏<sup>1,2,3</sup>, 周颢<sup>1,2,3</sup>, 赵保华<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学技术大学计算机科学与技术系, 230027, 合肥; 2. 网络与交换技术国家重点实验室, 100876, 北京;  
3. 安徽省计算与通讯软件重点实验室, 230027, 合肥)

**摘要:** 针对无线 Mesh 网现有媒体访问控制(MAC)层协议在多跳多播方面缺乏可靠性保障且效率较低的问题,在无线局域网 MAC 层的信标帧驱动协议(BLBP)的基础上,提出了一种基于 BLBP 的无线 Mesh 网 MAC 层多播协议(Layer-BLBP).按照每一跳将一次多播分成若干层,每一子层有一个 Leader 来完成确认帧的反馈,Layer-BLBP 利用出错帧/确认帧的反馈及碰撞来保障多播的可靠性,通过分层协调方法来提高多播的效率.理论分析和仿真实验结果表明:Layer-BLBP 在无线 Mesh 网下可使多跳多播可靠完成,在节点差错率大于 10%的情况下,比 BLBP 和原有 MAC 层协议的传输性能提高了 10%以上.

**关键词:** 无线 Mesh 网;媒体访问控制层;多跳多播;分层信标帧驱动协议

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)06-0051-06

Layer-Divided Beacon-Driven Leader Based Protocol for Multicast Error Control in Wireless Mesh Networks

XI Peng<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hao<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Baohua<sup>1,2,3</sup>

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;  
2. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing 100876, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Software in Computing and Communication, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that the existing media access control (MAC) protocols for multihop multicast in the wireless mesh networks (WMNs) are lack of reliability and efficiency, a layer-divided beacon-driven leader based protocol (Layer-BLBP) is proposed based on the wireless local area networks MAC-Layer beacon-driven leader based protocol (BLBP). One single round multicasting is divided into some sub-layers by each hop, and a leader is selected in each sub-layer. The Layer-BLBP uses acknowledge frames and non-acknowledge frames feedback and collision to ensure reliability of multicasting, and adopts sub-layer coordination to enhance the performance. Theoretical analysis and simulation results show that Layer-BLBP is reliable for multihop multicast in WMNs. Comparisons with BLBP and other existing MAC-Layer protocols show that the efficiency of the Layer-BLBP is increased by at least 10% when the node error rate is beyond 10%.

**Keywords:** wireless mesh networks; media access control layer; multihop multicast; layer-divided beacon-driven leader based protocol

无线 Mesh 网(WMN)<sup>[1]</sup>是一种网络结构比较灵活、组建比较方便的新兴无线网络,它具有良好的自组织、自配置等优点,受到了广泛的关注. WMN 下的多播需求也与日俱增,视频会议、数字视频广

收稿日期: 2009-09-22. 作者简介: 席鹏(1981—),男,硕士生;赵保华(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872009,60602016);国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA01Z428,2009AA01Z148);安徽省自然科学基金计划重大项目(ZD2008005-2,ZD200904,JK2009A013,JK2009A025).

播、Vod、VoIP、IPTV 等很多领域都需要可靠的多播纠错和降低传输延时的要求。

目前,无线多播纠错研究主要集中在应用层,在较低的协议层次上很少考虑,例如媒体访问控制(MAC)层,因此 IEEE802.11<sup>[2]</sup> 的 MAC 层协议对多播没有可靠性保障. 该协议只考虑请求发送帧(RTS),而不采用反馈机制,将可靠性保障的任务交给了更高的网络层次,增大了处理延时,这种情况在跳数很少或者只有一跳的无线局域网(WLAN)环境下,已经开始对多播延时产生影响. 在 WMN 的多跳环境中,随着跳数的增大,延时将越来越大。

由于 MAC 层具有低协议层次处理延时短,且其分布式协调作用机制可以让每个节点自动协作完成整个差错控制,因此具有重要的研究意义. 信标驱动的领导者的协议(BLBP)<sup>[3]</sup>、混合的领导者的协议(HLBP)<sup>[4]</sup>等都是无线局域网(WLAN)环境下提出的 MAC 层多播差错控制协议,具有较好的性能,但是它们不能适应 WMN 的多跳环境。

本文在 WLAN 的 MAC 层 BLBP 协议的基础上,提出了针对 WMN 多跳环境的 MAC 层新的多播协议——Layer-BLBP. 将多播的过程逐跳分层,在每个子层内使用改进的 BLBP 协议保障可靠传输,进而保障整个多播的可靠性. 层间通过控制竞争窗口的大小,使得多播更加层次化,从而提高了多播效率。

## 1 Layer-BLBP 协议

### 1.1 BLBP 协议

BLBP 协议是基于 WLAN 环境下的 MAC 层多播协议. 通过选择一个 Leader 作为回复确认帧(ACK)的代表,其他节点只有在没有收到正确数据时,才会回复出错帧(NACK). 采用新增的 Beacon 控制帧来同步所有接收者的时钟,使得 Leader 回复 ACK 和 NACK 的时间一致. 如果发送者收到 ACK,表示本次多播完成,所有接收者均正确地收到报文. 如果收到 NACK,或等待 ACK/NACK 超时,则表示本次多播失败,需要重传. 文献[3-5]论证了 BLBP 在 WLAN 下的性能,即在单跳环境中, BLBP 能保证多播可靠进行且效率较高。

然而, BLBP 只适用于单跳环境的 WLAN,对于多跳的 WMN 环境,却无法从多播的源节点出发使得所有多播目的节点时钟同步,这些目的节点和源节点之间的跳数也不一致,因此无法在 WMN 下使用。

针对以上缺陷, Layer-BLBP 协议先将 WMN 进行逐跳分层,在层内使用改进的 BLBP,而在层间调整了多播的优先次序,使得多播可靠且更有效率。

### 1.2 Layer-BLBP 基本概念

在 WMN 的多跳环境下,按照每一跳将一次多播分成若干个层(Layer),从多播的源出发,直到所有的多播目的节点,每经过一跳,就认为多了一层. 如果上一层有  $n$  个节点需要转发,就会把下一层划分为  $n$  个子层,这些子层根据上一层节点的覆盖范围可能会出现部分重叠。

图 1 是一个 WMN 的概念结构,从源节点出发,每跳形成一个 Layer,而图中 B、C 在本次多播中组成了第 2 层的一个子层,称为 A 的子层. A 是上一层的转发节点,实际上 A 的覆盖范围更大. 图 1 中虚线椭圆仅仅表示和 A 相关的下一层多播有效范围. A 的上层和同层的节点会丢弃 A 转发的相同序号的包,如果 A 的包序号比上层或者同层节点最新的序号大,则上层节点和同层节点也加入 A 的子层,图中的 Layer1~Layer3 的虚线结构就会发生改变. 可见,层和子层的划分是完全实时和动态的。

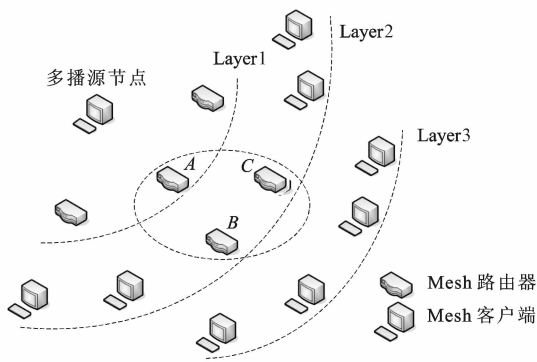


图 1 Layer-BLBP 分层示意图

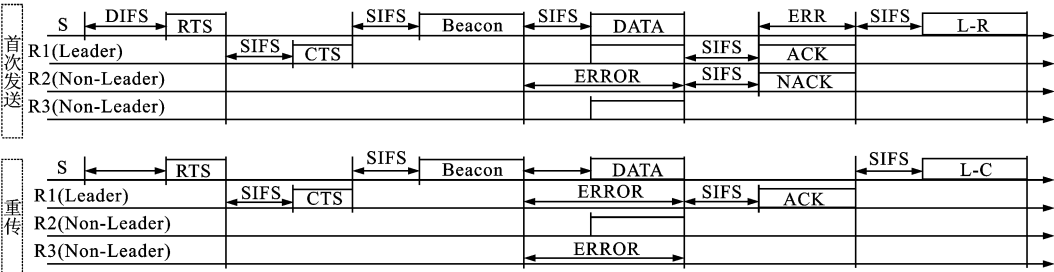
为了在同一子层中完成 BLBP 的功能,每子层都需要一个 Leader 来完成 ACK 的反馈. Leader 由当前转发节点随机在该子层多播节点中挑选,并以修订的 RTS 在对该子层开始多播时,告知该子层所有节点. 修改后的 RTS 帧格式如图 2 所示。

子层内多播机制如图 3 所示. 对比 IEEE802.11MAC 协议<sup>[2]</sup>,图 3 中新增的帧分别是

|     |      |    |    |    |     |
|-----|------|----|----|----|-----|
| 2   | 2    | 6  | 6  | 6  | 4   |
| 帧控制 | 持续时间 | RA | TA | LA | 校验码 |

阴影部分为新增域; LA 为本次多播当前层次的 Leader 节点地址; RA 为多播的组地址; TA 为当前转发节点地址

图 2 修改后的 RTS 帧格式



S 为发送者;R1~R3 为接收者;SIFS 为最短的帧间隔;DIFS 为 IEEE802. 11 分布式协调机制中的基本帧间隔;  
ERROR 和 ERR 为帧错误;CTS 为允许发送帧  
图 3 子层内多播以及重传机制图

Beacon、子层发送成功帧 (Layer-Clear, L-C)、子层重新发送帧 (Layer-Retr, L-R). 子层内多播保留了 Beacon 帧<sup>[3]</sup>且格式不变,并对 BLBP 进行了改进. 在本子层所有节点收到正确数据后,发送者以 L-C 帧通知子层本次转发成功,否则发送 L-R 帧通知子层所有节点准备接收重传数据. L-C/L-R 帧如图 4 所示.

图 4 中,Sequence Control 域表示当前传送成功或者需要重传的帧序号,Retr 域长度只有 1 b, Retr 域为 0 表示子层内发送成功即 L-C 帧,Retr 域为 1 表示需要重传,即 L-R 帧.

|     |      |    |    |                  |      |     |
|-----|------|----|----|------------------|------|-----|
| 2   | 2    | 6  | 6  | 4                | 1    | 4   |
| 帧控制 | 持续时间 | RA | TA | Sequence Control | Retr | FCS |

阴影部分是新增域

图 4 L-C/L-R 帧格式

子层间的多播安排利用状态转换机制做了适当调整,使得多播更加有层次,基本准则如下.

**准则 1** 同层间转发平等,重传优先. 假定 A、B 处于同一层,均有数据需要转发且互相可以侦听到对方的 RTS,则可以平等竞争. A 竞争到信道后成功完成本次数据转发,通过 A 的是 L-C 帧,而 B 在等待 DCF 帧间隔 (DIFS) 后竞争信道. A 若仍然有数据需要转发,则将竞争窗口 (W) 设置为最小窗口 (minW) 的 2 倍后才去参与竞争,以保证待转发的同层节点以更大概率优先发送.

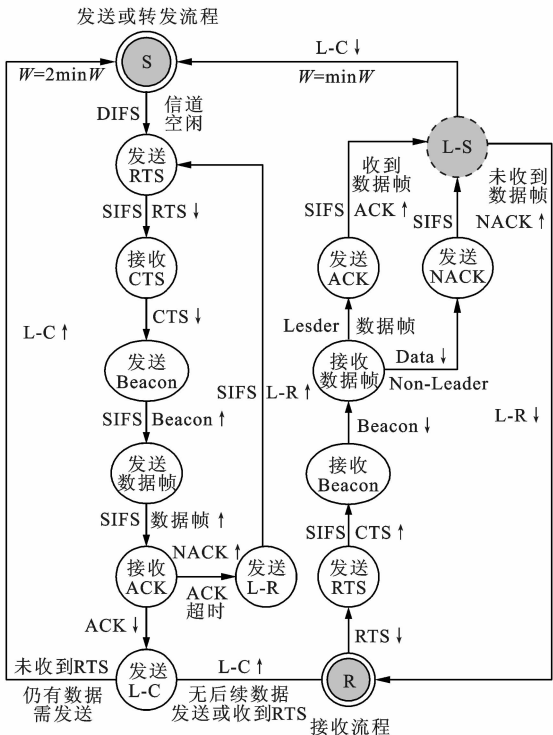
若 A 本次转发失败需要重传,则 B 在侦听到 A 的 L-R 帧后可以根据其持续时间域调整自己继续等待,以保证其重传优先,而 A 则在 L-R 帧之后最短的帧间隔 (SIFS) 无退避的进行重传,以保证子层内部 BLBP 的原子性.

**准则 2** 上下层之间下层转发优先. Layer-n 层节点 A 在成功转发数据后,如果还有数据需要发送,则必

须将当前 W 设置为 minW 的 2 倍后参与信道竞争,而 Layer-(n+1) 层属于 A 的子层,其接收到数据后置 W 为 minW 开始竞争信道,从而保证转发帧尽可能快地向下传递.

1.3 Layer-BLBP 详细流程

Layer-BLBP 同样属于分布式的自动协调机制,它根据收到的 Layer-BLBP 中的报文进行状态转换. Layer-BLBP 协议状态转换图如图 5 所示. 图 5 中,子层内的发送是从 S 状态开始到发送 L-C 状态结束. 子层内的接收是从 R 状态开始到正确收到 L-C 帧时结束. 图中的 L-S 状态是为了更方便地说明接收过程结束的状态变化而设定的一个假想状态. 该状态是指所有接收节点根据收到的 L-C/L-R



↓表示接收到对应的帧;↑表示发送出对应的帧

图 5 Layer-BLBP 协议状态转换图

帧中的 Retr 值来判断,是等待子层重传还是子层发送成功。

## 2 Layer-BLBP 的性能分析

### 2.1 传输次数

性能分析类似于文献[3],并假设所有用到的控制帧 RTS、CTS、L-C/Retr、ACK/NACK、Beacon 都可以没有差错地到达接收节点,且每个节点收到数据帧的错误率在概率上相互独立.文献[3]给出了在 WLAN 环境中单个数据包完成单跳的传输次数的期望值和由于出错重传造成的冗余传输次数

$$E[N] = \sum_{n=0}^m P[N > n] = \sum_{n=0}^m \left(1 - \prod_{r=1}^G (1 - p_r^n)\right) \quad (1)$$

$$I = E[N] - 1 \quad (2)$$

式中: $p_r$  是接收节点  $r$  的错误率; $G$  是接收节点的总数; $m$  是重传次数的上限值。

在 Layer-BLBP 协议中,一个子层的一次成功的转发可以看成是一次单跳的 BLBP.某一层转发单个数据包的总传输次数应该等于该层所有节点传输次数的总和,终端节点的转发次数和冗余转发次数都为 0.分析中用到的参数如下: $U$  为 WMN 中参与多播的节点总数; $L$  为 Layer-BLBP 的总层数,即最大跳数; $k$  为层数, $k=0,1,2,\dots,L$ ,其中 0 表示源节点; $U_k$  为 Layer-BLBP 的第  $k$  层中参与多播的节点数; $G_k$  为第  $k$  层中参与多播的非终端节点数,即收到数据后需要继续转发的节点, $G_k \leq U_k$ ; $R_{ik}$  为第  $k$  层中第  $i$  个节点在第  $k+1$  层中有效的接收节点数, $i=1,2,\dots,G_k$ .这里要说明的是,如果节点  $i$  与节点  $j$  的子层有重叠的部分,则  $i$  的子层中的部分接收节点可能已经从  $j$  收到了同样序号的包,这些接收节点对  $i$  发出的包会采取丢弃处理,即不是  $i$  的有效接收节点,不包括在  $R_{ik}$  中。

首先可以得到一个数据包,它从  $k$  层传输到达所有  $k+1$  层节点所需要的期望传输次数为

$$E(N_k) = \sum_{i=1}^{G_k} E(N_{ki}) = \sum_{i=1}^{G_k} \sum_{n=0}^m \left(1 - \prod_{r=1}^{R_{ki}} (1 - p_r^n)\right) \quad (3)$$

因此,多播所需要的总的期望传输次数和总的冗余期望传输次数的计算式分别为

$$E(N) = \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^{G_k} \sum_{n=0}^m \left(1 - \prod_{r=1}^{R_{ki}} (1 - p_r^n)\right) \quad (4)$$

$$I = E(N) - \sum_{k=1}^L G_k \quad (5)$$

### 2.2 端到端平均延时

在不考虑控制帧丢失的情况下,一个数据包单跳成功进行一次转发的时间为

$$T = T_{\text{backoff}} + T_{\text{RTS}} + T_{\text{CTS}} + T_{\text{beacon}} + T_{\text{data}} + T_{\text{ACK}} + T_{\text{LC}} + T_{\text{DIFS}} + 5T_{\text{SIFS}}$$

式中: $T_{\text{backoff}}$  为退避时间。

一个节点  $A$  在获得发送权后完成一次成功的转发所需要的期望时间为

$$E(T) = TE(N_A) \quad (6)$$

假设  $k$  层中一个节点  $i_k$  的邻居节点数为  $F_{i_k}$ , $i_k$  和邻居节点均等地竞争信道,则  $i_k$  竞争到信道的概率为  $P_{i_k} = 1/F_{i_k}$ .如果  $i_k$  没有竞争到信道,则需要等待其邻居中竞争到信道的节点完成一次多播传输后才可以再次参与竞争.假设节点  $i_k$  经过  $s$  次竞争才获得了发送权,则节点  $i_k$  成功完成转发需要的延时为

$$D_{i_k s} = E(T) + (s-1)(E(T) + T_{\text{DIFS}}) + T_{\text{backoff}}$$

$$T_{\text{backoff}} = T_{\text{timeslot}} \text{rand}(0, W+1) \quad (7)$$

式中: $\text{rand}(\cdot)$  为随机函数。

在考虑平均延时的情况下, $s$  的取值为

$$s = (F_{i_k} + 1)/2$$

一个数据包从源到达第  $X$  层一个终端目的节点的端到端平均延时为

$$D_X = \sum_{k=0}^{X-1} D_k \quad (8)$$

式中: $D_k$  表示数据包在第  $k$  层选中的某个节点转发的平均延时.由相关参数可以看出,Layer-BLBP 的端到端延时与跳数及邻居节点竞争关系最大,因此需要通过路由层等协助来减少跳数。

### 2.3 最大吞吐量

对于一个多播数据流来说,经过多跳的最大吞吐量取决于其中吞吐量最小的一跳<sup>[6]</sup>.为了得到第  $X$  跳某个终端节点  $d$  在多播中获得的吞吐量,只要节点  $d$  在流中存在有意义的最小一跳的吞吐量即可。

每一跳的吞吐量用平均吞吐量来衡量,对于第  $k$  层的某个节点  $i_k$ ,假设目的节点  $d$  是  $i_k$  的后续可达节点,则节点  $i_k$  上的多播流对于  $d$  就是有意义的.这样的节点越多,到达目的节点的可选路径就越多,从而导致该层相对于  $d$  的吞吐量就越大.某个节点的平均吞吐量为

$$H_{i_k} = \chi P_{i_k} / T_{i_k}$$

$$T_{i_k} = P_{i_k} E(T) + (1 - P_{i_k})(E(T) +$$

$$T_{\text{DIFS}} + T_{\text{backoff}})$$
 (9)

式中: $\chi$  表示实际发送的有效数据载荷; $T_{i_k}$  为节点  $i_k$  在一次成功转发过程中花费的平均概率时间<sup>[7]</sup>. 在  $k$  层中,如果有  $C_k$  个节点对于目的节点  $d$  可达,则该层的平均吞吐量为

$$H_k = \sum_{i=1}^{C_k} H_{i_k}$$
 (10)

因此,从源出发到节点  $d$  的最大吞吐量为

$$H_{\text{max}} = \min H_k, k = 1, 2, \dots, X$$
 (11)

根据以上公式,Layer-BLBP 的吞吐量与网络结构关系更加密切. 由于子层多播的原子性和其因反馈减少了多播次数,所以随着错误率的提高和跳数增加,Layer-BLBP 的吞吐量损失仍比较平稳.

3 仿真结果

仿真实验模拟了整个 Layer-BLBP 协议的作用过程. 为了只对 MAC 层进行分析,假定路由是静态的,即每个节点知道自己的邻居节点,源多播的是每个数据包大小固定、稳定的数据流. 收集的数据包括总的多播发送次数、对应每层的终端节点的端到端延时和每个终端节点的平均吞吐量.

3.1 网络结构和参数

除了新增或修改的控制帧之外,仿真实验中采用了文献[2]中的标准控制帧结构以及物理层头部来计算各类控制帧和数据帧的大小. 实验的参数如表 1 所示.

表 1 实验的主要参数表

| 参数                                     | 数值        |
|----------------------------------------|-----------|
| 控制帧速率/ $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ | 1         |
| 数据帧速率/ $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ | 11        |
| 数据帧载荷/B                                | 1 024     |
| 重传数上限                                  | 7         |
| 节点错误率/%                                | $\leq 10$ |

实验随机生成了 21 个多播参与节点,其中有 12 个转发节点(含源节点)、9 个终端节点,终端节点不参与转发. 从 1~4 跳的终端节点中选择 4 个节点来分析不同的跳数对延时和吞吐量的影响. 路由在生成节点时给定.

3.2 实验结果和分析

通过实验证明了所有接收和转发节点均成功收到了所有的数据,同时证明了 Layer-BLBP 协议的可靠性.

图 6 对比了 Layer-BLBP 和 BLBP 协议的总的冗余传输次数. 从中可以看出,Layer-BLBP 协议在

性能上优于 BLBP 协议,当节点错误率为 0.1 时,Layer-BLBP 协议的性能提高了近 10%. 在 WMN 中,错误率会更高,因此 Layer-BLBP 协议性能的提升程度会更大,其根本原因是新增的层间协调机制减少了竞争,提高了传输效率.

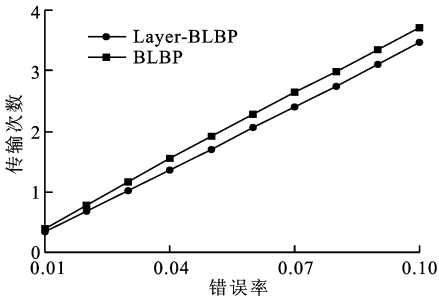


图 6 2 种协议在不同错误率下的冗余传输次数对比

图 7 清楚地显示了 Layer-BLBP 协议从节点 1~节点 4 端到端延时的变化趋势. 节点 1 到节点 4 分别对应 1 跳到 4 跳. 伴随着节点间跳数的增加,延时明显增加且增加的幅度越来越大. 由此可见,跳数、节点错误率以及邻居竞争情况对延时的影响较大,但可以通过优化路由等方法减少竞争和跳数,由此更好地发挥 Layer-BLBP 的性能.

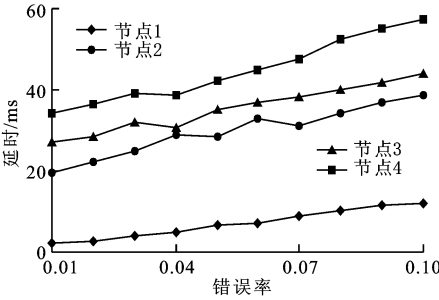


图 7 Layer-BLBP 协议在不同错误率下 4 个节点的延时

Layer-BLBP 协议在不同错误率下 4 个节点的吞吐量如图 8 所示. 从图中可以看出,吞吐量最重要的影响因素是目的节点和源节点之间的有效路径流量总和. 节点 3 的吞吐量最大,是因为它与源之间存在最多的路径. 实验结果表明,在 Layer-BLBP 协

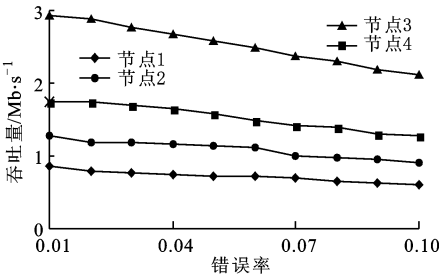


图 8 Layer-BLBP 协议在不同错误率下 4 个节点的吞吐量

议下,由于子层的多播更加可靠和高效,所以错误率变化使得带宽下降受到了很好的控制。

## 4 结束语

本文在 WLAN 的 BLBP 协议基础上,针对 WMN 的多跳多播提出了一种可靠的 MAC 层协议 Layer-BLBP. 从理论和实验 2 方面证明了新的协议可以在 MAC 层保证 WMN 多播的可靠性,并分析了 Layer-BLBP 在 WMN 下的性能,同时为其与高层协议间的跨层协作指明了新的研究方向。

### 参考文献:

[1] AKYILDIZ I F, WANG Xudong, WANG Weilin. wireless mesh networks: a survey [J]. Computer Networks, 2005, 47(4): 445-487.

[2] IEEE Standards Department. IEEE std 802.11 Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007.

[3] ZHAO Li, HERFET T. BLBP: beacon-driven leader based protocol for MAC layer multicast error control in wireless LANs[C]//Proceedings of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE,

2008:1-4.

[4] ZHAO Li, HERFET T. HLBP: a hybrid leader based protocol for MAC layer multicast error control in wireless LANs [C] // IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 5420-5425.

[5] ZHAO Li, HERFET T. Beacon-driven leader based protocol over a GE channel for MAC [J]. International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2008,1(2):144-153.

[6] 张牧,张顺颐,刘伟彦. 多速率多播最大吞吐量研究 [J]. 电子与信息学报,2008,30(1):16-20.

ZHANG Mu, ZHANG Shunyi, LIU Weiyan. On the optimal multi-rate throughput for multicast[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(1):16-20.

[7] 张蕾,杨寿保,王大鹏,等. 无线 Mesh 网中 TCP 公平性建模与分析[J] 中国科学院研究生院学报,2007,24(3):342-350.

ZHANG Lei, YANG Shoubao, WANG Dapeng, et al. Modeling and analyzing of TCP fairness in wireless mesh network[J]. Journal of The Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, 2007, 24(3):342-350.

(编辑 刘杨 苗凌)

## [西安交通大学科研成果介绍]

### 快速成形集成制造系统

此成果属于国家“十五”重点科技攻关项目,国内领先,国际先进.快速成形集成制造系统以快速成形技术为核心,集成逆向工程、CAD、CAE、快速工模具制造等先进技术,能够实现原型、功能零件和模具的快速制造,缩短新产品快速开发的周期,降低生产成本,是实现敏捷制造的重要使能技术.该系统能够满足当前企业新产品快速开发的需求,并可推向汽车车型的快速开发这一重要应用领域。

快速成形集成制造系统主要包括以下 6 个方面的研究成果以支持其实际应用。

(1)基于离散点云数据的 RE/CAD 快速复合建模技术.开发了面向大型覆盖模具及工件的三维重构软件,实现了由 RE 测量点云数据直接复合构造三维 CAD 模型,解决了 RP&M 集成制造的瓶颈问题。

(2)面向 RT 的 RP 原型设计.开发了基于 STL 模型的数据集成工具软件和面向 RP/RT 工艺与精度集成的 STL 模型再设计软件。

(3)金属喷涂覆盖模具快速制造工艺、设备和材料.采用该工艺可大大缩短大型板料冲压模具的制造周期,降低制造成本,采用特殊工艺可使模具表面状态接近钢模具,既可用于样车试制,又可以为钢模具 CNC 制造提供可靠的设计数据。

(4)基于 RP 原型和消失模铸造的近净成形金属铸造模具快速制造集成工艺.提供消失模铸造用中空蜂窝状 SL 原型的设计软件、可焙烧气化 SL 树脂以及模具铸造精度控制方法。

(5)刀切法 LOM 技术实现大型、精密无拼接快速原型制造.提供一套刀切法 LOM 快速原型制造设备及成熟的工艺方法。

(6)化学液相金属微滴沉积直接制模系统.提供原型机,能直接成形零件或金属模具,模具精度可达到  $\pm 0.1\text{ mm}$ 。

(来源:西安交大科技在线 <http://www.xjtust.com>)