

面向前向纠错的无线 Mesh 网多播差错控制协议

池信泽^{1,2}, 周颢^{1,2}, 赵保华^{1,2}

(1. 中国科学技术大学计算机科学与技术学院, 230027, 合肥;
2. 中国科学技术大学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层协议进行多播时效率较低的问题, 在分层信标驱动的无线 Mesh 网多播差错控制协议 (Layer-BLBP) 的基础上, 提出了一种面向前向纠错的无线 Mesh 网多播差错控制协议——混合分层信标帧驱动协议 (HLBLBP). 该协议通过引入前向纠错技术和减少多播纠错时控制帧数量来降低重传次数, 从而提高了用于数据传输的实际开销占整个多播过程的时间比例. 仿真实验结果表明, 新协议有效提高了多播网络的总体性能, 提供的实际吞吐率比 Layer-BLBP 提高了 25% 以上.

关键词: 无线网格网; 媒体访问控制层; 前向纠错; 混合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(2011)08-0030-07

Multicast Error Control Protocol in Wireless Mesh Networks Based on Forward Error Correction

CHI Xinze^{1,2}, ZHOU Hao^{1,2}, ZHAO Baohua^{1,2}

(1. School of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;
2. Anhui Province Key Laboratory of Software in Computing and Communication,
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: A hybrid-layer-divided beacon-driven leader based protocol (hybrid-layer-BLBP, HL-BLBP) is proposed on the basis of forward error correction(FEC) to deal with the problem that the existing media access control (MAC) protocols in wireless mesh networks (WMNs) are less efficient. The proposed protocol bases on the wireless local area MAC-Layer layer-divided beacon-driven leader based protocol (Layer-BLBP). Since the proposed protocol employs the FEC technology and reduces the number of the control frames for multicast, the retransmission number is reduced and the ratio of the real data transmission cost in entire multicast stage is increased. The simulation results show that the proposed HLBLBP protocol effectively improves the overall performance of multicast in WMNs and increases the goodput rate more than 25% compared with Layer-BLBP.

Keywords: wireless mesh networks; media access control layer; forward error correction; hybrid-layer-divided beacon-driven leader based protocol

随着人们对无线接入需求量的不断增加, 特别是随着近年来 3G 业务的不断推广, 用户已经不仅仅满足于简单的数据通信, 相应地能够支持大数据通信和严格延时的多媒体通信业务需求量不断增

收稿日期: 2011-01-10. 作者简介: 池信泽(1987—), 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); 国家高技术研究发展计划资助项目(2001AA01Z148); 安徽省高校自然科学基金研究计划重大项目(ZD2008005-2, ZD200904, JK2009A013, JK2009A025).

网络出版时间: 2011-07-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110718.1602.002.html>

加. 无线 Mesh 网(WMN)是一种结构灵活的网络^[1],它支持自组织联网,具备自形成、自组织和自愈合的能力,作为一种多跳的无线网络可以增加现有无线网络的传输距离,因此 WMN 已经作为一种主要技术融合到了下一代无线网络中.

无线网络的特点是带宽窄、丢包率高,而在稳定性和带宽宽的要求下进行多媒体通信,对 WMN 来说是一个巨大的挑战. 现有的无线多播纠错机制几乎都是基于应用层的,这种纠错机制的延迟比较大,特别是在多媒体访问控制(media access control, MAC)层进行多播纠错时更是如此,而在 MAC 层利用 802.11 的标准也无可靠性保障. 为了提高多播的效率,研究 MAC 层下的可靠纠错机制意义重大.

LBP(leader-based error recovery protocol)^[2]通过为一个多播组选定一个引导者(leader)来反馈确认(ACK)信息,以在加强多播纠错可靠性的同时提高多播传输效率. BLBP (beacon-driven leader based protocol)^[3]是在 LBP 的基础上,通过加入信标(beacon)帧来降低数据包冗余传送概率. 与 BLBP 类似,ELBP^[4]也是通过引入一个接收(SEQ)帧来声明包序号,进而有效减少冗余重传. HLBP^[5](hybrid leader based protocol)结合了 BLBP 和数据包层次^[6]的前向纠错(FEC)技术,进一步提高了多播纠错效率. 上述协议都是无线局域网(WLAN)环境下的 MAC 层可靠差错控制协议. WMN 的环境是多跳的,与 WLAN 有所不同,它要求一些多播节点既要接收上层传来的数据,又要通过竞争信道将接收到的数据尽快地向下层节点转发,因此 WMN 比 WLAN 的环境更复杂,竞争信道的概率更大,丢包率也就更高. 层间 BLBP(Layer-BLBP)是针对 WMN 多跳环境和 MAC 层的可靠多播协议,是 BLBP 在 WMN 下的应用.

本文在 Layer-BLBP 的基础上,提出了一种基于 FEC 技术的多播纠错协议——HLBLBP. 它可以根据信道的丢包率自适应地选择数据的发送方式,以此减少节点重传次数,进而增加整个多播网络的吞吐量.

1 HLBLBP 协议

1.1 Layer-BLBP

在 WMN 中,Layer-BLBP 将多播过程逐跳分层,并在每一个子层内用改进的 BLBP 来保障可靠传输,进而保证整个多播的可靠性. 层间的数据传输

是通过控制竞争窗口的大小来达到尽快将数据向下层发送的目的. 整个传输过程遵循 2 个准则:①同层数据平等转发,重传优先;②上下层数据下层转发优先. 当子层的节点正确地接收到数据时,发送者通过发送层间畅通(layer-clear, L-C)信息来通知该子层节点已转发成功,子层节点收到 L-C 信息后通过竞争信道向自己的子层转发数据,否则通过发送层间重试(layer-retry, L-R)信息要求数据重传,并让子层中所有节点做好接收重传数据的准备.

本文沿袭了 Layer-BLBP 关于层与子层的定义,即 WMN 中每经过一跳形成一层,若某一层有 n 个节点需要转发数据,就把下一层分为 n 个子层,每一子层与其对应的上一层的转发节点形成一个多播组. Layer-BLBP 就是以 1 个多播组为一个单元进行多播、纠错的. 图 1 为 3 层 WMN^[7],其中 B、C 为 A 的子层, A、B、C 形成一个多播组.

在 Layer-BLBP 中,当任意接收者收到出错数据包时,发送者都要将出错数据包单独重传一次,这大大增加了重传次数. 另外,假设在 WMN 环境下以 11 Mb/s 的速率发送 512 B 的数据,即使传输过程不会出错,数据发送过程中的时间开销也仅为整个多播过程 15%,也就是说,绝大部分的时间开销都用在控制帧的传输上了.

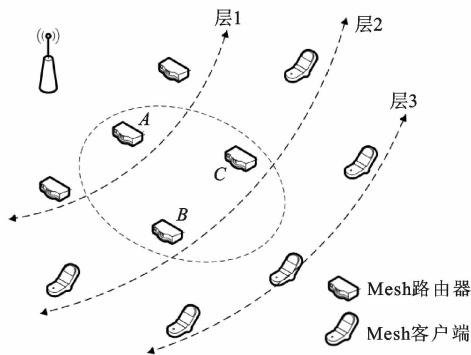


图1 Layer-BLBP 分层示意图

因此,本文的 HLBLBP 在 2 个方面进行了改进:①引入纠错码(eraser code)来降低重传次数;②通过减少控制帧数、精简控制帧的结构来提高网络吞吐量,控制多播延迟.

1.2 纠错码

纠错码是以数据包为单位进行纠错的技术,如 Reed-Solomon 编码等. 纠错码是将 k 个原始数据包编码成 n 个数据包,即假设 $\mathbf{x} = x_0, \dots, x_{k-1}$ 是源数据, $\mathbf{y} = y_0, \dots, y_{n-1}$ 是经编码后得到的数据,则纠错码可以表示为 $\mathbf{y} = \mathbf{G} \mathbf{x}$, 其中 $\mathbf{G}$ 为生成矩阵^[8]. 接收者只要能正确地接收到 n 个数据包中任意 k 个不同

的原始数据包,就能重建原始的 k 个数据包。

为了进一步加以说明,本文定义原始数据可被分割成数据块,而数据块利用纠错码变换成数据包。一个块可以编码成 n 个数据包,先传输 k 个数据包,剩下的 $n-k$ 个作为纠错的数据包,为发生错误时重传所用。在多播环境中,利用纠错码对数据进行编码具有以下优势:单个的纠错数据包能够纠正不同接收者间单个的错误数据包。

1.3 HLBLBP 的控制帧结构

HLBLBP 定义的子层内多播概念及纠错过程与 Layer-BLBP 有类似之处,但是具体的多播机制受制于控制帧的结构。针对 Layer-BLBP 在控制帧上的时间开销比较大的问题,本文的 HLBLBP 在多播过程中通过引入纠错码技术对控制帧和数据帧的结构、数量进行了相应的修改,其中块序号(BN)域和包序号(PI)域是引入纠错码后需要对数据包标记的信息。

与 Layer-BLBP 相比,HLBLBP 新增或修改的帧为 MRTS(modified request to send)帧、L-R 帧、L-C 帧、数据(DATA)帧,各帧结构如图 2~图 4 所示,图中数字表示域在帧中所占的字节数。本文将 Layer-BLBP 中用到的 beacon 帧与请求发送(RTS)帧通过融合形成了新的 MRTS 帧(见图 2),即新增了 LA、BN、PI 3 个域。LA 表示本次多播当前层次的 leader 节点地址;BN、PI 是为了配合引入纠错码时为数据包加入的新域,主要是为接收者正确反馈信息时所用;RA 和 TA 是基于原多通道电视声频(MTS)的帧结构,其中 RA 是多播的组地址,TA 是当前转发节点地址。修改后的 MRTS 帧既具有原有 RTS 帧的功能,又能携带相关数据包的序号信息。

从图 3 可以看出,HLBLBP 定义的 L-C 和 L-R 将 Layer-BLBP 中相应帧的 4 B 序列控制(sequence control, SC)域分割成 2 B 块序号域和 2 B 包序号域。

从图 4 可以看出,HLBLBP 的 DATA 帧格式是将原来由 2 B 表示的序列号域扩大到了 4 B,4 B 中原来的 2 B 则用于块序号域,新增的 2 B 用于包序号域。

2	2	6	6	6	2	6	2	0~2 3 12	4
frame control	duration	RA	TA	LA	block number	address 4	packet index	DATA	FCS

图 4 修改后的 DATA 帧格式

1.4 HLBLBP

1.4.1 HLBLBP 多播纠错机制流程 HLBLBP 的子层间多播纠错机制可参考 Layer-BLBP 的多播机制,该子层内多播机制如图 5 所示。图 5 中机制采用了数据包分层的 FEC 技术,整个过程分为 I、II、III、IV 4 个阶段,步骤描述如下。

(1)发送者首先以 802.11 规定的标准多播形式传送最先的 $k-c$ 个数据包。当传送第 $k-c+1$ 个数据包时,需要通过请求发送/允许发送(RTS/CTS)协议来竞争信道,以避免隐藏站问题。发送者在 DATA 帧数据发送完成后,立即进入下一轮的竞争信道阶段,准备发送第 $k-c+2$ 个数据包,其过程类似于 $k-c+1$ 的情况。发送者重复以上过程,直至发送的包序号为 k 时执行第(2)步。

(2)发送者和接收者首先执行 RTS/CTS 握手协议(此时 RTS 帧已经修改为 MRTS 帧),发送者在转发数据包后会等待接收者的反馈信息。当接收者收到数据包后,如果接收者是 leader 且成功地收到了 k 个正确的数据包,则反馈 ACK,若接收到的正确数据包的数量小于 k ,则不反馈任何信息;如果接收者是非引导者(non-leader)且成功地收到了 k 个正确的数据包,则不反馈任何内容,若接收到的正确数据包的数量小于 k ,则反馈未确认(NACK)信息。

(3)发送者收到接收者的回馈后,若接收到 ACK(表示每个接收者成功接收到了正确的数量不小于 k 的数据包)信息,便发送 L-C 帧,以表示整个数据块发送成功。子层节点只有在收到相应的 L-C 帧后才能向自己的子层节点转发数据,否则需要发送 L-R 帧,以表示需要进行纠错,并执行第(4)步。

(4)发送者和接收者首先执行 RTS/CTS 握手协议。发送者先发送用于纠错的数据包,接收者收到该数据包后根据情况(是 leader 或者是 non-leader)反馈 ACK 或者 NACK 信息(具体过程参考第 2 步)。发送者接收到反馈后执行第(3)步。

1.4.2 HLBLBP 讨论 上述定义的 c 是一个变量($1 \leq c \leq k$),发送者可以根据其了解到的信道情况来动态决定它的大小。通常情况下,丢包率较小、附近的节点竞争信道较少时, c 值比较小。因为信道情况

2	2	6	6	6	2	2	4
frame control	duration	RA	TA	LA	block number	packet index	FCS

图 2 MRTS 帧格式

2	2	6	6	2	2	1	4
frame control	duration	RA	TA	block number	packet index	retr	FCS

图 3 修改后的 L-C/L-R 帧格式

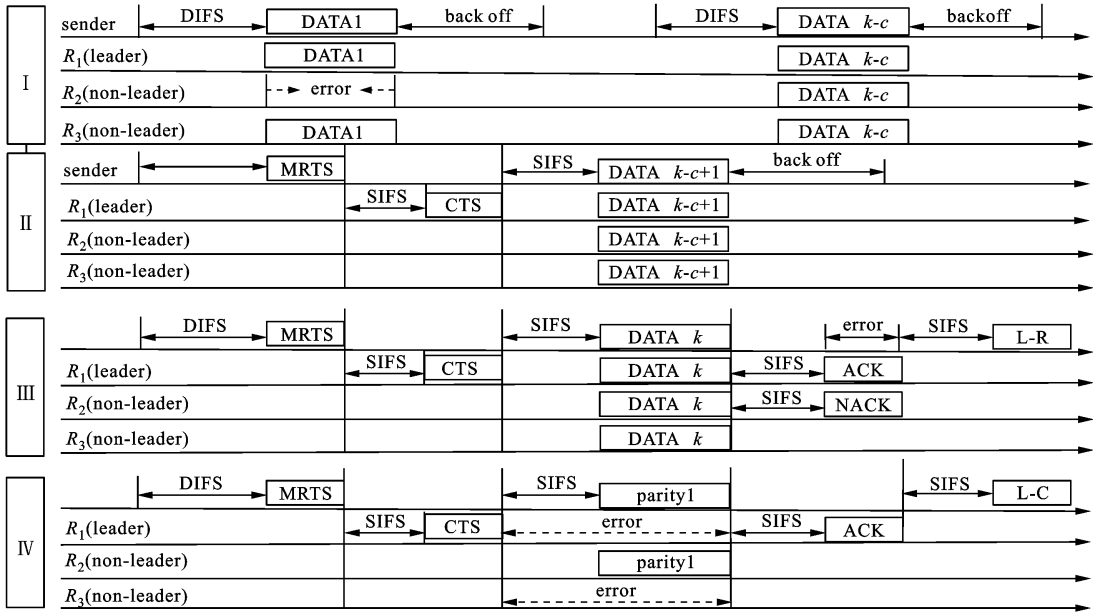


图 5 子层内多播及重传机制图

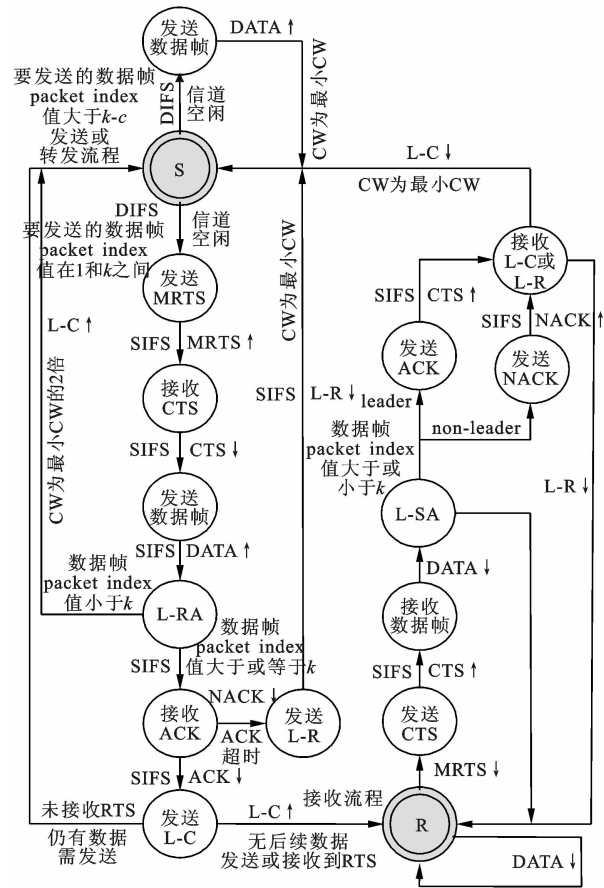
越好,丢包的概率就越小,隐藏终端问题不太显著,此时可以用标准多播的形式传送最先的 $k - c$ 个数据包,这样能最大程度地减少控制帧的时间开销,进而增加系统的吞吐率.反之, c 值比较大,就需要通过 RTS/CTS 来竞争信道,以保证数据能够以更大的概率被成功接收,进而避免隐藏终端问题造成过多的重传.

接收者从收到第 1 个数据包到收到第 $k - 1$ 个数据包时,都不需要反馈 ACK 或者 NACK 信息,因为根据纠删码的性质,即便全部正确地接收到了先前发送的 $k - 1$ 个数据包,也不可能还原原始数据,因此不需要反馈信息,而发送者也不必等待反馈信息便可直接准备发送下一帧.当接收者接收到第 k 个数据包时,就需要为接收到的前 k 个数据包反馈信息,而发送者也需要根据接收者反馈的情况来决定是否需要传输纠错数据包进行纠错.

HLBLBP 规定:在发送 L-R 帧之后需要进行退避,以公平地竞争信道;竞争窗口(CW)设为最小 CW,同层节点听到 L-R 帧后将自己的 CW 设置为最小 CW 的 2 倍(与 Layer-BLBP 的不同之处).这样,既可以保证同层节点间能以更大的概率重传数据,同时又考虑到节点之间的公平性和 WMN 网络的异构性.也就是说,某个节点因为丢包率高,长期占用信道重传数据,就必将影响整个网络的吞吐量,同时也会影响其他信道转发数据.

1.4.3 HLBLBP 状态流程 本文利用状态机来描述 HLBLBP 多播纠错机制的流程,状态转换如图 6

所示.图 6 中,子层内发送数据是从 S 状态开始,接收数据从 R 状态开始.



↓:接收对应的帧;↑:发送对应的帧

图 6 HLBLBP 状态转换图

2 HLBLBP 性能分析

许多研究者在对 MAC 层纠错协议进行性能分析时都假设 MAC 层控制帧(本文中包括 MRTS、CTS、L-R/L-C、ACK/NACK)可以无差错地被相应的接收者接收^[3,5,7],本文也采用了这种假设.实际中的控制帧比较短且可以较低的速度传输,故这种假设具有现实意义.性能分析的主要参数为重传次数和数据包占用信道的时间期望.

2.1 重传次数

在 WLAN 环境下,文献[5]给出的成功转发单个数据块传输次数的期望值为

$$E[N] = k + \sum_{i=1}^m P[N \geq k+i] = k + \sum_{i=1}^m \left(1 - \prod_{r=1}^R \sum_{j=k}^{k+i-1} \binom{k+i-1}{j} (1-p_r)^j p_r^{(k+i-1-j)} \right) \quad (1)$$

式中: p_r 是节点 r 的数据包出错率; m 是重传次数的上限值; R 是所有接收节点总数.

HLBLBP 是以一个数据块为单位的,也就是一次成功的转发过程为接收者正确接收到了一个完整的数据块(能够还原出 k 个原始数据包).在 WMN 环境下,数据块完成一次全网多播所需的重传次数应等于所有节点重传次数之和,而终端节点不需要转发数据,故终端节点重传次数为 0,因此整个多播过程的重传总次数应等于所有非终端节点重传次数之和.假设:WMN 中共有 $(L+1)$ 层,其中多播源节点位于第 0 层; T_s 表示第 s 层的非终端节点数,是既要负责接收上层传来的数据,又要将接收到的数据向下层转发的节点; R_{si} 为第 s 层的第 i 个非终端节点在第 $s+1$ 层中的接收节点数.因此,全网多播一个数据块所需要的总期望传输次数和期望重传次数分别为

$$E(N) = \sum_{s=1}^L \sum_{i=1}^{T_s} \left(k + \sum_{j=k}^{R_{si}+k-i-1} \binom{k+i-1}{j} (1-p_r)^j p_r^{(k+i-1-j)} \right) \quad (2)$$

$$I = E(N) - k \sum_{s=1}^L T_s \quad (3)$$

由式(2)可以看出:每次的重传数据包对于任意的接收者来说都是有效的(因为任意一个纠错数据包都能纠正一个出错的数据包);在 Layer-BLBP 中,接收者必须接收到其所丢失或者错误接收的那

个数据包,相比之下 HLBLBP 的重传次数更低.

从编码率讲,未加入纠错码的编码码率为 1,加入纠错码的编码码率降为 k/n .HLBLBP 是在需要时才重传冗余的 $n-k$ 个数据包.码率为 1 时需要为单独出错的数据包逐个重传,而加入纠错码后冗余的 $n-k$ 个数据包具有较强的纠错能力,从而大大降低了重传次数.

2.2 数据包占用信道的时间期望

数据包占用信道的时间期望是指一个数据包从被发送到成功地被接收所花费的平均时间.这个值越小,表示发送数据包的开销越小,整个网络的实际吞吐率相应地就会增大.HLBLBP 通过减少控制帧的数量来缩短数据包占用信道的时间.图 5 中,假设 T_1 、 T_2 分别为 I、II 段占用信道的时间, T_3 是 III、IV 段占用信道的时间, T_{L-R} 是发送 L-C 帧或 L-R 帧的时间,它们的计算式如下

$$T_1 = T_{DIFS} + T_{DATA} \quad (4)$$

$$T_2 = T_{DIFS} + T_{MRTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + 2T_{SIFS} \quad (5)$$

$$T_3 = T_{DIFS} + T_{MRTS} + T_{CTS} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{L-R} + 4T_{SIFS} \quad (6)$$

依据图 5 可以得出 HLBLBP 的单个数据包占用信道的时间期望值为

$$E[T]_{HLBLBP} = ((k-c)T_1 + (c-1)T_2 + (E[N] - k + 1)T_3)/k \quad (7)$$

在 Layer-BLBP 中的单个数据包占用信道的时间期望值为

$$E[T]_{Layer-BLBP} = (T_{DIFS} + T_{RTS} + T_{CTS} + T_{beacon} + T_{DATA} + T_{ACK} + T_{L-R} + 5T_{SIFS})E[N_A] \quad (8)$$

式中: $E[N_A]$ 为节点 A 在获得转发权后成功地转发一个数据包的期望传输次数^[7].从式(7)、式(8)可以看出,HLBLBP 数据包占用信道的时间期望值比 Layer-BLBP 小得多,这是因为在 HLBLBP 中每个数据块的前 $k-1$ 个数据包可以在 T_1 或者 T_2 内发送,而且 $E[N]$ 越小,即 T_3 所占比例越小,这种可能性就越大.

3 仿真实验

本文通过仿真实验对 HLBLBP 和 Layer-BLBP 进行了对比.仿真中除了新增或修改的帧之外,还采用了文献[9]中标准帧结构和物理层头部来计算各类控制帧和数据帧的大小,实验参数如表 1 所示.

表 1 实验的主要参数

参数	数值
控制帧速率/Mb · s ⁻¹	1
数据帧速率/Mb · s ⁻¹	11
重传次数上限	7
数据包出错率/%	≤16

本实验随机生成了 21 个节点,其中非终端节点 7 个,终端节点 14 个.由于本文只关心 MAC 层纠错机制,所以实验中假设多播路由是已知的,而且每个节点知道自己的邻居节点,源节点多播的是大小固定的稳定数据流.本文主要以重传次数、网络节点的实际吞吐率和数据包占用信道的时间期望作为评价标准.

图 7 为 Layer-BLBP 和 HLBLBP 在不同出错率下的总重传次数.从图 7 可以看出,HLBLBP 的重传次数明显的少于 Layer-BLBP,而且重传次数的增幅也低于 Layer-BLBP.这是由于,引入纠错码中单个的纠错数据包能够纠正不同接收者间单个的错误数据包,从而避免了 Layer-BLBP 中每转发一个出错的数据包就要为其单独重传一次的情况.

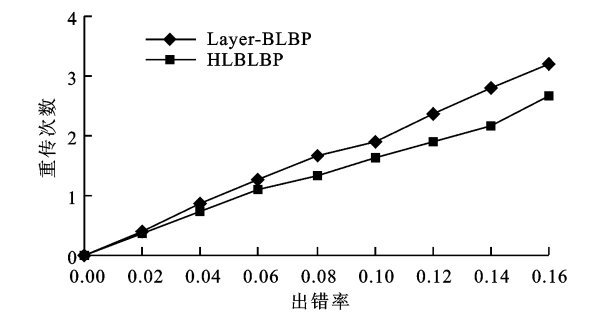


图 7 不同出错率下 2 种协议的总重传次数

图 8 是 HLBLBP 和 Layer-BLBP 在不同出错率下数据包占用信道的时间期望值比较.从图 8 可以清楚地看到,HLBLBP 的信道占用时间明显低于 Layer-BLBP.在出错率为 0 时,前者花费的时间仅为后者的 72%,随着信道丢包率的增加这种优势越来越明显,因此 HLBLBP 能够更好地应用在高出错率信道的 WMN 环境中.

图 9 是 HLBLBP 和 Layer-BLBP 所有节点实际吞吐率在不同出错率下的变化趋势.从图 9 可以看到,即使出错率为 0.16,HLBLBP 的吞吐率还是大于出错率为 0 时的 Layer-BLBP.从图 7 和图 8 还

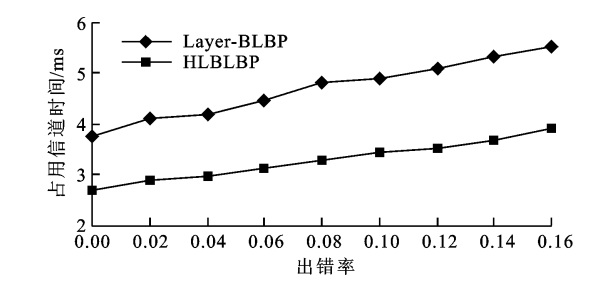


图 8 不同出错率下 2 种协议数据包占用信道的时间

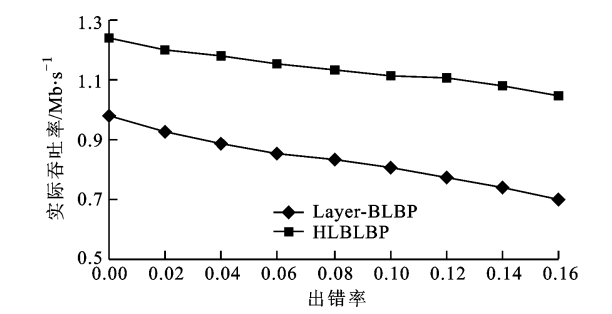


图 9 不同出错率下 2 种协议的实际吞吐率

可以看出,HLBLBP 性能明显优于 Layer-BLBP,主要原因有 2 点:①HLBLBP 重传次数的减少使得在单位时间内能够发送更多的有效数据;②HLBLBP 可以大量地减少用于保证多播可靠性的控制帧数量.在整个多播过程中,控制帧的传输占据了大量的时间开销,因此控制控制帧的数量、降低数据包占用信道的时间,对于提高网络实际吞吐率意义重大.

4 结束语

针对 WMN 环境下网络丢包率高而导致重传率高和实际吞吐率低的问题,本文在 Layer-BLBP 的基础上,有针对性地通过减少控制帧的数量、精简控制帧的结构和引入纠错码来降低重传次数.理论和实验表明,HLBLBP 能够较大程度地提高网络的实际吞吐率,降低数据包占用信道的平均时间,从而为上层的多播服务提供了保证.

参考文献:

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

[2] KURI J, KASERA S K. Reliable multicast in multi-access wireless LANs [J]. ACM/Kluwer Wireless Networks Journal, 2001,7(4): 359-369.

[3] LI Zhao, HERFET T. BLBP: beacon-driven leader based protocol for MAC layer multicast error control in

- wireless LANs [C]//Proceeding of International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:1-4.
- [4] BAO Chongwei, LIAO Wanjiun. Performance analysis of reliable MAC-layer multicast for IEEE 802.11 wireless LANs [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Piscataway, NJ, USA, IEEE, 2005:1378-1382.
- [5] LI Zhao, 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: 1-6.
- [6] Angus T W, LEE S H, CHAN G, et al. Optimal allocation of packet-level and byte-level FEC in video multicasting over wired and wireless networks [C] // IEEE Global Telecommunications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001:1994-1998.
- [7] 席鹏,周颢,赵保华. 分层信标驱动的无线 Mesh 网多播差错控制协议[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(16):51-56.
- XI Peng, ZHOU Hao, ZHAO Baohua. Multicast error control protocol in wireless mesh networks based on forward error correction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(16):51-56.
- [8] RIZZO L. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1997, 27(2):24-36.
- [9] IEEE Standards Department. Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications [S]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000.
- [本刊相关文献链接]**
- 一种利用天线旋转的无线传感器网络定位算法. 西安交通大学学报, 2011,45(4):60-66.
- 无线网络中应用机会式网络编码的广播重传方法. 西安交通大学学报, 2011,45(2):68-72.
- 一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议. 西安交通大学学报, 2010,44(12):32-37.
- 无线自组织网络高准确度自私节点检测机制. 西安交通大学学报, 2010,44(8):25-29.
- 面向目标覆盖的无线传感器网络确定性部署方法. 西安交通大学学报, 2010,44(6):6-9.
- 无线传感器网络多轮任务调度算法. 西安交通大学学报, 2010,44(6):27-32.
- 利用蚁群优化的非均匀分簇无线传感器网络路由算法. 西安交通大学学报, 2010,44(6):33-38.
- 针对事件驱动型传感器网络的多路径编码路由协议. 西安交通大学学报, 2010,44(6):39-45.
- 面向移动节点不确定性特征的自组网路由协议. 西安交通大学学报, 2010,44(6):46-50.
- 分层信标驱动的无线 Mesh 网多播差错控制协议. 西安交通大学学报, 2010,44(6):51-56.
- 无线局域网自适应安全管理框架及其应用. 西安交通大学学报, 2010,44(4):34-38.
- 一种能量高效的无线传感器网络等值线监测技术. 西安交通大学学报, 2010,44(2):56-60.
- 利用离去角度的无线传感器网络分布式节点定位方法. 西安交通大学学报, 2010,44(2):61-66.
- 基于隐马尔可夫模型的无线局域网媒体接入控制层入侵检测方法. 西安交通大学学报, 2009,43(12):26-30.
- 无线传感器网络地理位置路由度量方法. 西安交通大学学报, 2009,43(12):55-59.
- 无线局域网 802.1X 协议安全性分析与检测. 西安交通大学学报, 2009,43(10):52-55.
- 最大化网络有效寿命的传感器网络覆盖保持协议. 西安交通大学学报, 2009,43(10):66-70.
- 分簇无线传感器网络可靠高效的数据传输方案. 西安交通大学学报, 2009,43(8):28-32.
- 大规模传感器网络局部半定规划的节点定位算法. 西安交通大学学报, 2009,43(8):38-42.
- 无线传感器网络分布式射频干涉定位方法. 西安交通大学学报, 2009,43(8):48-52.
- 非均匀分簇的无线传感器网络数据传送机制. 西安交通大学学报, 2009,43(4):14-17.
- 一种相邻节点协作的无线传感器网络可靠传输方案. 西安交通大学学报, 2009,43(2):33-37.
- 一种高信道利用率的分簇传感器网络数据聚合协议. 西安交通大学学报, 2009,43(2):38-42.
- 双忙音媒体接入协议中的隐藏节点问题及其改进. 西安交通大学学报, 2008,42(12):1459-1463.
- 多输入多输出的异构无线传感器网络时分多址调度算法. 西安交通大学学报, 2008,42(11):1402-1407.
- 无线传感器网络分区能耗均衡的非均匀分簇算法. 西安交通大学学报, 2008,42(4):389-394.
- 用于无线传感器网络的比例公平队列调度算法. 西安交通大学学报, 2008,42(2):129-132.
- 无线传感器网络低时延能量均衡安全路由. 西安交通大学学报, 2008,42(2):161-165.

(编辑 苗凌 武红江)