

低占空比、低碰撞的异步无线传感器网络 MAC 协议

李哲涛^{1,2,3}, 朱更明⁴, 王志强⁴, 裴廷睿^{1,3}, 潘高峰⁵

- (1. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 国防科学技术大学 计算机学院, 湖南 长沙 410073;
3. 湘潭大学 智能计算与信息处理教育部重点实验室, 湖南 湘潭 411105;
4. 湖南科技大学 计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201; 5. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715)

摘要: 提高信道监听质量是降低能量消耗和提高通信效率的有效方法。提出了一种低占空比、低碰撞的 PB-MAC(predict-base MAC)协议。通过发送节点精确预测接收节点的唤醒时间, 降低占空比; 采用基于预测的重建连接机制和数据重传机制, 有效地避免碰撞和实现高效重传。OMNet++仿真实验结果表明: 在 50 节点随机网络中, PB-MAC 的平均占空比、发送消息能耗和平均碰撞次数分别比 RI-MAC 少 68.60%、24.75%、68.05%, 比 X-MAC 少 64.39%、64.05%、70.54%。同时, 在网格网络中 PB-MAC 的性能也优于 RI-MAC 和 X-MAC。

关键词: 无线传感器网络; 低占空比; 伪随机; MAC 协议

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)10-0009-08

Low duty cycle and low collision asynchronous MAC protocol for wireless sensor network

LI Zhe-tao^{1,2,3}, ZHU Geng-ming⁴, WANG Zhi-qiang⁴, PEI Ting-rui^{1,3}, PAN Gao-feng⁵

- (1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
2. School of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
3. Key Laboratory of Intelligent Computing & Information, Ministry of Education, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;
4. School of Computer Science & Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
5. School of Computer & Information Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Improving the quality of channel listening is an effective way to reduce energy consumption and improve communication efficiency. PB-MAC(predict-base MAC), a novel low duty cycle and low collision asynchronous MAC protocol was presented. PB-MAC lowers sensor duty cycle by enabling senders to predict receiver wakeup times. An efficient prediction-based reconnection and retransmission mechanism was introduced to achieve low collisions and high efficiency retransmission. Comparison of PB-MAC on OMNet++ with RI-MAC and X-MAC was evaluated. Evaluated on scenarios with 50 random disposed nodes, the average duty cycle, consumed energy and average collisions for PB-MAC is 68.60%, 24.75% and 68.05% less than those of RI-MAC and 64.39%, 64.05% and 70.54% less than those of X-MAC respectively. In grid network, PB-MAC also outperforms RI-MAC and X-MAC protocols.

Key words: wireless sensor network; low duty cycle; pseudo random; MAC protocol

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61379115, 61110215, 61311140261, 61070180, 61372049); 湖南省自然科学基金委员会与湘潭市政府自然科学基金联合基金资助项目(12JJ9021); 湖南省教育厅基金资助项目(11C1224); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2013jcyjA40040); 中央高校业务基金资助项目(XDJK2013C093); 湖南省重点学科建设基金资助项目

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61379115, 61110215, 61311140261, 61070180, 61372049); Union Natural Science Foundation of Hunan Provincial and Xiangtan Government (12JJ9021); The Fund of Educational Commission of Hunan Province (11C1224); The Natural Science Foundation Project of CQ CSTC (cstc2013jcyjA40040); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(XDJK2013C093); The Construct Program of the Key Discipline in Hunan Province

1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 由分布在一定区域内大量电池供电的传感器节点组成, 采用无线通信的方式形成多跳自组织网络。由于其监控区域广、无人值守等优点, WSN 被广泛应用到农业种植、医疗监控、智能家居、智能交通等生活的各个领域, 尤其是灾后重建、突发事件监控等^[1]。电池能量直接影响传感器和网络生存周期, 因此, 研究一种低耗能、轻负载协议成为 WSN 领域的热点。媒体访问控制 (MAC, medium access control) 协议是数据报文和控制消息在无线信道上进行收发的直接控制者, 也间接影响上层路由协议和传输控制协议性能。因此, 高效的 MAC 协议是保证 WSN 数据服务质量 (QoS, quality of service) 的基础^[2]。

根据节点时间是否同步, 可将现有 MAC 协议分为 2 类: 同步和异步 MAC 协议。同步 MAC 协议 (如 S-MAC^[3]、TMAC^[4]、SCP^[5]和 DW-MAC^[6]) 通过节点同步的唤醒/休眠机制来减少能量消耗, 但全网时间同步会带来不可忽略的能量消耗^[7,8]。

异步 MAC 协议又可分为由发送节点发起的 MAC 接入协议 (如 B-MAC^[9]、X-MAC^[10]、O-MAC^[11]和 Wise MAC^[12]) 和由接收节点发起的 MAC 接入协议 (如 RI-MAC^[13]) 2 种类型^[14]。由发送节点发起的 MAC 接入协议是指由发送者发送前同步码报头 (preamble) 来通知目标节点准备接收数据; 由接收节点发起的 MAC 接入协议是指发送节点醒来侦听, 等待接收节点发送的信标 (beacon) 分组的到来再发送数据。异步 MAC 协议无需时间同步, 并且异步周期的工作模式能减少网络中流量猝发所带来的碰撞。一般来说, 在异步 MAC 协议中, 发送节点的占空比要远比接收节点的占空比高。

B-MAC 是一种基于 CSMA 的异步 MAC 协议。它通过使用低能耗侦听和持续的前同步码报文实现低能耗通信。另外, 它通过动态调节休眠时间表来改变网络流量负载。然而, 串音问题和冗长的前同步码带来了较大的能量损耗。

X-MAC 通过使用多个较小的前同步码报文来解决 B-MAC 中的串音问题。通过在前同步码中嵌入目标节点地址引导邻居中非目标接收节点进入休眠, 达到节能的目的。然而, 持续的前同步码仍然占据着信道, 降低了信道利用率。

Wise MAC 通过固定的唤醒间隔减少前同步码的长度。同时, 发送节点通过采样目标节点时间表预测其下一次唤醒时间, 降低了占空比。该协议虽然减少了空闲监听开销, 但固定的时间表易导致连续的碰撞。

RI-MAC 是由接收节点发起建立连接的异步 MAC 协议, 发送节点只需醒来侦听目标节点的信标帧而不用占据信道, 提高了信道利用率。然而, 发送节点平均仍需半个周期等待目标节点的信标帧, 空闲侦听耗能较大。

另外, 现有的 MAC 协议大多采用二进制指数退避算法^[14]来解决分组丢失重传问题。这类算法总是给予最后一次发送成功的节点以最大的优先权, 易导致不公平现象。当网络节点较多时, 节点每次成功发送后都将竞争窗口重置为最小值, 易引起碰撞。

为降低能耗、减少数据碰撞, 本文提出了一种由发送节点发起建立连接的异步低占空比、低碰撞的 PB-MAC (predict-base MAC) 协议算法。在 PB-MAC 中, 节点通过伪随机数生成伪随机唤醒时间表。发送节点可通过获取接收节点的随机种子、当前时间和最近一次唤醒时间信息精确地推导出接收节点的下一次唤醒时间。与其他具有预测功能的 MAC 协议 (如 Wise MAC^[12]) 相比, 在 PB-MAC 中, 节点能快速预测目标节点的醒来时间, 并能减少碰撞。PB-MAC 只需在预测目标节点唤醒时间侦听信道, 因此, 在发送节点和接收节点都能保持极低的占空比。另外, PB-MAC 报头仅需携带极少量的预测信息, 具有通信开销小和报头短的特征。

2 PB-MAC 的算法设计

PB-MAC 的目标是设计一种以发送节点发起建立连接的低占空比、低碰撞的异步 MAC 协议。

2.1 基本工作原理

PB-MAC 协议基于 RTS/CTS/Data/ACK 的通信过程, 节点随机唤醒侦听, 如果在一个给定的信道侦听时间 (TA, time active) 内没有发生激活事件, 则进入休眠状态。节点醒来后侦听信道时间需满足:

$$TA \geq RTT + T_s \quad (1)$$

其中, RTT 为端到端往返时延, T_s 为节点由休眠状态启动为工作状态所需要的时间。

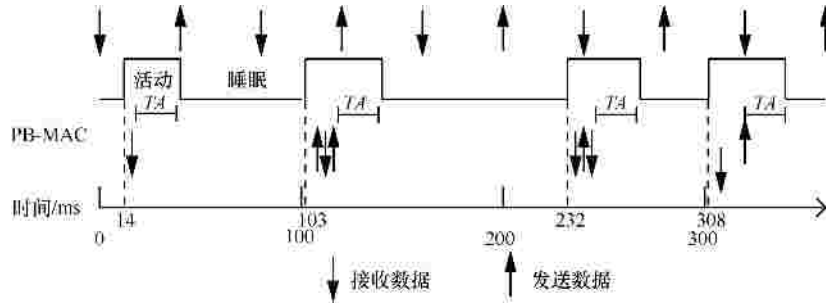


图 1 PB-MAC 协议的基本机制

在 PB-MAC 中，节点首次在 $[0, T]$ (T 为节点唤醒的平均时间周期) 之间随机唤醒进入活动状态，之后仍采取随机唤醒机制。图 1 为 PB-MAC 协议的基本机制，图中向上的箭头表示发送消息，向下的箭头表示接收消息，上面部分的信息流表示节点一直处于侦听方式下的消息收发序列，下面部分的信息流表示采用 PB-MAC 协议时的消息收发序列。图 1 中节点首次在 14 ms 唤醒，随后依随机数 89、129 和 76 在 103 ms、232 ms 和 308 ms 分别唤醒。

2.2 伪随机唤醒时间表机制

为了预测目标节点的唤醒时间和避免邻居节点唤醒时间频繁接近，PB-MAC 中每个节点采用伪随机唤醒时间表。节点通过与邻居节点共享随机种子来推导对方产生伪随机唤醒时间表的伪随机数。

为了使节点间随机种子不同并且可在相邻节点种子相近的情况下更改，节点产生伪随机数的随机种子 $Seed$ 采用线性同余(LCG, linear congruential generator)^[15]的方法产生，如式(2)所示。

$$Seed = (aN + c) \bmod m \quad (2)$$

其中， $m(m > 0)$ 是模数， $a(0 < a < m)$ 是乘数， $c(0 < c < m)$ 是增量， N 为当前节点的 ID 号或已生成的 $Seed$ 。节点采用 C++ 中的 rand 函数 (使用乘同余算法) 以 $Seed$ 为参数产生伪随机数 $RandNum$ ，如式(3)所示。

$$RandNum = rand(Seed) \quad (3)$$

其中， $RandNum$ 为每调用一次 rand 方法产生的随机数。节点将产生的随机数 $RandNum$ 作为节点唤醒时间间隔，生成伪随机时间表。

因此，通过获取邻居节点的随机种子同样可以推导出其唤醒时间表的唤醒时间间隔。

2.3 预测目标节点唤醒时间算法

PB-MAC 协议的报头 (beacon 分组) 包含节点的随机种子 $Seed$ 、最近一次唤醒时间 T_{last} 和节点当前时间 T_{cur} 。节点根据收到目标节点的 beacon 分组可据式(2)和式(3)计算出其下一次唤醒时间 $NextTimeWakeup$ 。

$$\begin{cases} T_{diff} = T_{loc} - T_{cur} \\ NextTimeWakeup = RandNum + T_{last} + T_{diff} \end{cases} \quad (4)$$

其中， T_{loc} 为本地节点时间， T_{diff} 为本地节点与目标节点的时差。

图 2 是发送节点 S 通过目标接收节点 R 的 beacon 分组来预测 R 下一次唤醒时间的伪代码。其算法的核心思想是：如果 R 的相关参数未知，则立即侦听信道；否则根据 R 的随机种子、当前时间和最近一次唤醒时间信息计算 R 的下一次唤醒时间。

```

Procedure ComputerReceiverWakeupTime(R)
if  $T_{last}[R] = 0$  or  $Seed[R] = 0$  or  $T_{cur}[R] = 0$ 
return 0; //参数未知则马上醒来等待目标节点的 beacon 分组
endif
currentTime[R] =  $T_{loc} - T_{cur}[R] + T_{last}[R]$ ;
//计算节点 R 的下一次唤醒时间 nextWakeupTime[R];
while NextTimeWakeup[R] < currentTime[R] +  $T_s$ 
    RandNum = rand(Seed[R]);
    NextTimeWakeup[R] += RandNum;
end while
return (NextTimeWakeup[R] - currentTime[R] -  $T_s$ )
    
```

图 2 节点 S 预测节点 R 唤醒时间的伪代码

其中， $Seed[R]$ 为目标接收节点 R 的随机种子， $currentTime[R]$ 为 R 的当前时间， $T_{cur}[R]$ 为 R 发送 beacon 分组的时间， $T_{last}[R]$ 为 R 的最近一次唤醒时间， $nextWakeupTime[R]$ 是预测下一次 R 的唤醒时间

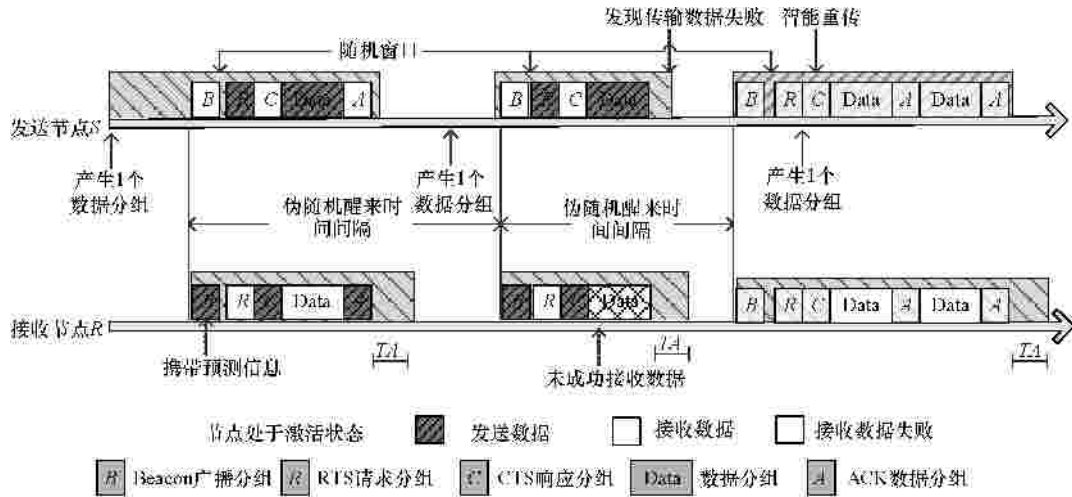


图 3 发送节点与接收节点数据传输

(初始值为 R 的最近一次唤醒时间)。

如图 3 所示,发送节点 S 首次向目标接收节点 R 建立连接需要一直醒来侦听 R 的 beacon 分组, S 在收到 R 的 beacon 分组后向 R 发起建立连接传输数据。当 S 下一次需要向 R 发送数据时,根据式(3)和式(4)来精确推导目标节点唤醒时间,在此时间唤醒侦听 R 的 beacon 分组,并在收到 R 的 beacon 分组后向 R 发起建立连接。

综上所述, PB-MAC 报头 beacon 分组仅需携带 2 byte $Seed$ 、4 byte T_{last} 和 4 byte T_{cur} 共 10 byte 的预测信息,即可完成对邻居节点唤醒时间的预测,具有报头短和低开销的特征。

2.4 预测重建连接机制

针对 2 个隐藏终端节点可能同时向目标节点发起建立连接请求而导致建立连接失败的情况, PB-MAC 采用随机延迟和释放预测的方法规避冲突和提高重连接效率。

随机延迟是指多个发送节点收到同一目标接收节点 R 的广播 beacon 分组后,在 $[0, T_c]$ 内各自随机延迟一段时间 T_d ,再向 R 发起建立连接,实现规避冲突,提高连接成功率, T_d 需满足

$$T_s + T_d + T_{delay} < T_A \quad (5)$$

其中, T_{delay} 为端到端传输时延,即 $RTT/2$ 。结合式(1)和式(5)可得: $T_d < RTT/2$,因此取 $T_c = RTT/2$ 。

以图 4 为例,在发送节点 S_1 和 S_2 同时收到 R 的 beacon 分组后不是立即向 R 发起建立连接,而是在延迟 $[0, RTT/2]$ 区间的随机时间后再向 R 发起建立连接。由于 S_2 延迟时间小于 S_1 延迟时间,所以 S_2 成功与 R 建立连接。

针对建立连接失败的节点, PB-MAC 采用释放预测机制来重建连接。具体预测规则分以下情况进行计算。

- 1) 若收到目标节点发送给其他节点的 CTS 帧,

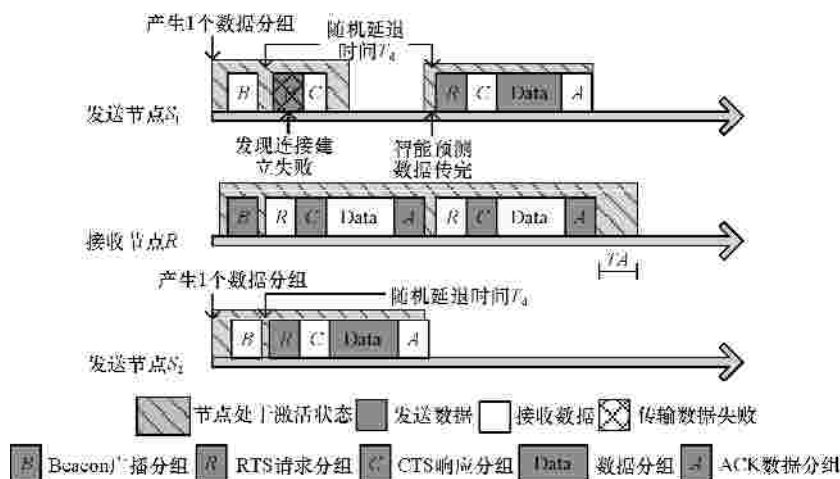


图 4 预测重建连接机制

则目标节点传完数据后释放连接的预计时间 T_{next} 为

$$T_{next} = IR_d(RTT + 2T_h) + T_{cts} \quad (6)$$

其中, T_h 为处理单位数据的时间, IR_d 为目标节点还需接收数据分组的个数, T_{cts} 为收到目标节点 CTS 帧的时间。

2) 若收到目标节点发送给其他节点的 Data 数据分组, 则目标节点传完数据后释放连接的预计时间 T_{next} 为

$$T_{next} = IS_d(RTT + 2T_h) + RTT/2 + T_h + T_{data} \quad (7)$$

其中, IS_d 为目标节点还需发送数据分组的个数, T_{data} 为收到目标节点 Data 数据分组的时间。

3) 其他情况, 立即进入休眠。如图 4 所示发送节点 S_1 在建立连接失败后, 收到目标节点 R 发送给节点 S_2 的 CTS 帧。 S_1 根据收到 R 的 CTS 帧, 依式 (6) 推导 R 接收完数据释放的连接时间, 并在此时间向 R 发起建立连接。

2.5 预测数据重传机制

基于无线网络的不稳定性和网络去拥塞的时滞性, 在出现分组丢失时, PB-MAC 要求发送节点和接收节点尽快进入休眠模式, 达到降低占空比的目的。

在分组丢失后, 发送节点和接收节点的具体表现为: 发送节点首先启动 2.3 节所述的预测目标唤醒算法计算接收节点下一次的唤醒时间, 然后转入休眠状态; 接收节点在没有收到后续有效数据或者数据已经传送完毕时进入休眠状态。

由于发送节点和接收节点均进入休眠状态, 等待目标节点下一次醒来再重传该数据。如图 3 所示, 当 S 发送第二个数据分组出现分组丢失后马上进入休眠, 在 R 第 3 次醒来后再重传该数据。

3 仿真与分析

3.1 仿真参数与环境说明

实验采用 OMNet++ 软件对比分析了 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 的性能, 采用 MATLAB 辅助分析实验数据。为了保障 3 个协议的可比性, 分别对每个协议进行如表 1 所示设置。

协议	首次醒来时间	唤醒时间间隔	重传次数	退避窗口
PB-MAC	0~1 s 随机	0.5~1.5 s 随机	1	32
RI-MAC	0~1 s 随机	1 s	5	32
X-MAC	0~1 s 随机	1 s	5	同文献[13]

在 PB-MAC 中, 为保障节点间随机种子尽可能不相近, 随机种子产生式的参数 a 、 c 、 m 分别设置为 20、7 和 999。

实验模拟运行 500 s, 节点每隔 [500, 1 500] ms 产生一个数据分组, 数据传输时延设定为 5 ms。为了检测节点的消息负载量, 假设节点的消息缓冲区是无限大。仿真中测量以下指标。

1) 平均占空比: 节点处于侦听状态占整个实验时间的比率。

2) 数据传递率: 基站接收到的数据总量占所有节点产生的数据总量的比率。

3) 端到端的数据延迟: 从节点产生数据或收到数据开始到该数据成功被下一跳节点接收的平均时间。

4) 消息负载量: 节点在整个实验时间中消息队列的最大数据量。

5) 发送耗能: 发送消息消耗的能量, 以发送单位数据消耗 1 个单位的能量来计量。

6) 碰撞次数: 节点在激活状态同时收到 2 个及以上发送节点数据的次数。

3.2 随机网络评估

在 900 m × 900 m 的方形区域内随机部署 49 个节点, 在中心部署 1 个基站, 节点通信半径为 200 m。表 2 为 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 在消息传递率、占空比、端到端延迟、最大消息负载量、发送数据耗能和平均碰撞次数指标的对比。

协议	消息传递率/%	平均占空比/%	平均端到端延迟/s	最大消息负载量	平均发送数据耗能	平均碰撞次数
PB-MAC	99.46	13.28	1.761 999	83	2 852.184	13.24
RI-MAC	99.93	42.30	1.628 372	127	3 790.367	41.44
X-MAC	99.80	37.30	1.611 187	95	7 934.816	44.94

表 2 表明, PB-MAC 在保持高传递率和低延迟的情况下, 占空比、平均发送数据耗能和碰撞次数 3 个性能分别比 RI-MAC 降低了 68.60%、24.75%、68.05%, 比 X-MAC 降低了 64.39%、64.05%、70.54%。这是因为 PB-MAC 通过精确估计目标节点的唤醒时间, 避免像 RI-MAC 和 X-MAC 那样每次醒来侦听信道, 等待与目标节点建立连接。在随机网络中由于节点分布不均, 容易导致数据分组丢失, 而 PB-MAC 协议在数据分组丢失后采用 2.5 节所示的快速进入休眠状态的重传机制, 故在延迟性

能上比 RI-MAC 和 X-MAC 略高。

当发送节点有数据需要发送时, RI-MAC 采用被动等待方式, X-MAC 采用不断向目标节点发送请求分组的主动建立连接方式,所以 RI-MAC 的发送耗能远小于 X-MAC。PB-MAC 中的预测机制使得发送节点与接收节点建立起连接的无效请求较少,发送数据耗能也较小。

表 2 显示在消息传递率相近的情况下,发送数据耗能与碰撞次数成正相关。由于 RI-MAC 碰撞窗口每次从 0 开始增加,而 X-MAC 的碰撞窗口固定为 32,故 RI-MAC 的碰撞次数偏高。PB-MAC 采用预测重建连接机制能提高连接的成功率和减少拥塞时的无效传输,故碰撞次数最少。

3.3 网格网络评估

在网格网络中,基站处于网络的中央位置,每个节点与其邻居节点的距离为 100 m,节点通信半径为 100 m。网格规模从 4×4 (16 节点) 逐步扩大到 9×9 (81 节点)

图 5 是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 在网格网络环境中的各项性能对比图。图 5(a)是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的占空比性能对比图。由于 RI-MAC 和 X-MAC 协议中发送节点平均需醒来等待半个 RTT 的空闲侦听时间,才能与目标接收节点建立起连接,而使用预测机制

的 PB-MAC 等待的侦听时间接近 0。因此, PB-MAC 中发送节点具有占空比较低的显著优势。RI-MAC 中发送节点避免了 X-MAC 中大量的 preamble 分组占用信道,信道利用率较高。因此, RI-MAC 较 X-MAC 略占优势。

图 5 (b) 是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的平均发送消息能耗对比图。由于 PB-MAC 采用预测机制使得发送节点与目标节点成功建立连接的几率较高,仅需要少量的 RTS 请求分组,失效请求少。因此,平均发送消息耗能单位在 3 个协议中最少。X-MAC 中大量无效的 preamble 请求分组使耗能较 RI-MAC 高。

图 5 (c) 是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的平均和最大碰撞次数对比图。3 种协议在奇网格 (5×5、7×7、9×9) 和偶网格 (4×4、6×6、8×8) 下的平均碰撞次数分别呈现递增状态。另外,由于基站一直处于侦听状态,偶网格中的碰撞次数要明显多于奇网格。

图 5(d)是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的端到端延迟对比图。3 种协议的端到端延迟随网格规模的变化基本保持一致。RI-MAC 与 X-MAC 以付出高占空比的代价减少延迟,而 PB-MAC 以高效的预测重建连接机制,保障低延迟。

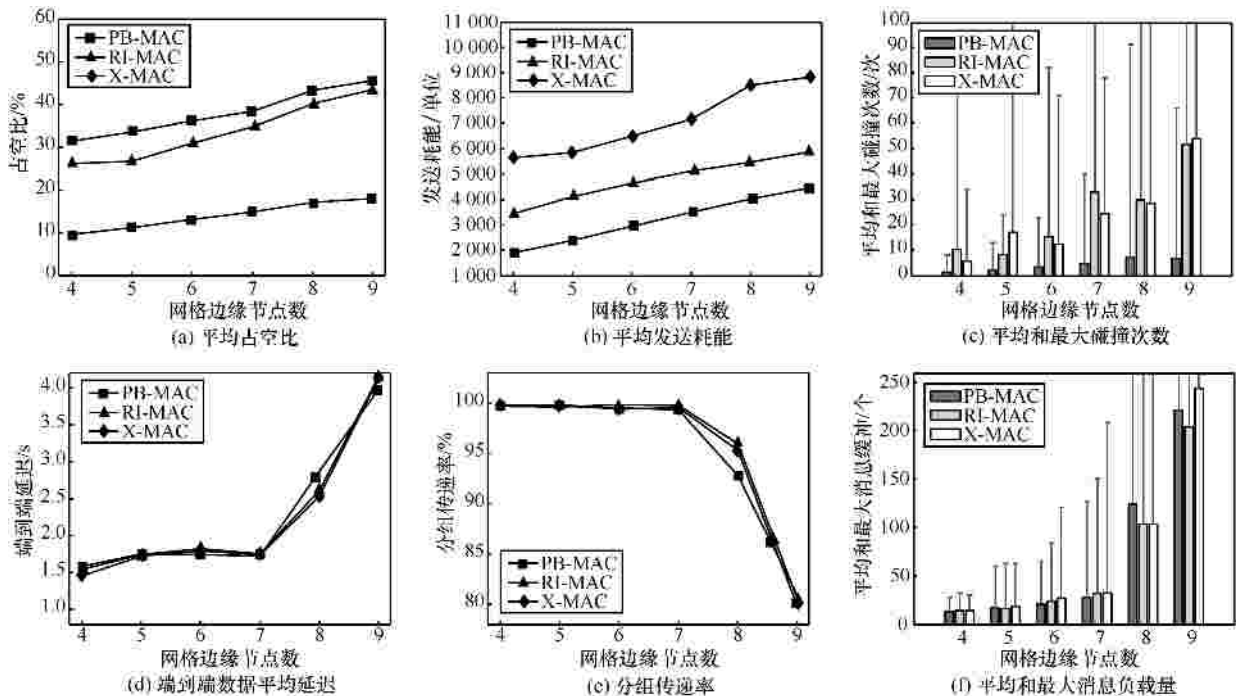


图 5 网格网络性能参数对比

图 5 (e) 是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的分组传递率对比图。从图中可以看出,当网络边缘节点大于 7 时,所有协议分组传递率急剧下降,这与图 5 (d) 中网络边缘节点大于 7 后延迟剧增相对应。实验发现,当规模超过 7×7 (49 节点) 后,网络开始出现拥塞。

图 5 (f) 是 PB-MAC、RI-MAC 和 X-MAC 协议在网格网络环境中的平均和最大消息负载量对比图。在网络边缘节点数小于 7 时,3 种协议的平均消息负载量基本维持在 20 左右。当网络边缘节点数大于 7 后,平均消息负载量急剧上升,也印证了网络出现拥塞。

总体来看, PB-MAC 在占空比、发送消息耗能、碰撞次数 3 个性能上表现出明显优势。另外,在网络出现拥塞之前,随着节点规模的增大, PB-MAC 在占空比、发送消息耗能、最大碰撞次数和平均碰撞次数指标上基本呈线性增长,稳定性好。在网络出现严重拥塞之后,在占空比、碰撞次数指标上, PB-MAC 仍优于 RI-MAC 和 X-MAC。

4 结束语

本文着重研究如何优化异步 MAC 协议来减少网络耗能和提高通信质量,提出了一种低占空比、低碰撞的异步无线传感器网络 MAC 协议——PB-MAC 协议。该协议以共享随机种子为基础,通过预测方式估计邻居节点的唤醒时间表,达到降低占空比的目的;通过预测重连接机制和预测数据重传机制,避免数据碰撞和实现高效重传。仿真结果表明:在随机网络和网格网络中, PB-MAC 协议在保持低延迟和高传递率的情况下,其占空比、碰撞次数和能耗方面明显优于 RI-MAC 和 X-MAC。

参考文献:

- [1] 马祖长, 孙怡宁, 梅涛. 无线传感器网络综述[J]. 通信学报, 2004, 25(4):114-123.
MA Z C, SUN Y N, MEI T. Survey on wireless sensors network[J]. Journal on Communications, 2004, 25(4):114-123.
- [2] 李瑞芳, 李仁发, 罗娟. 无线多媒体传感器网络 MAC 协议研究综述[J]. 通信学报, 2008, 29(8):111-123.
LI R F, LI R F, LUO J. Survey of MAC protocol in wireless multimedia sensor networks[J]. Journal on Communications, 2008, 29(8):111-123.
- [3] WEI Y, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE INFOCOM'02[C]. New York, NY, USA, 2002.1567-1576.
- [4] DAM T V, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys'03)[C]. Los Angeles, CA, USA, 2003.171-180.
- [5] WEI Y, SILVA F, HEIDEMANN J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling[A]. Proceedings of the 4th ACM SenSys Conference(SenSys'06)[C]. Boulder, CO, USA, 2006.321-334.
- [6] SUN Y, DU S, GUREWITZ O. DW-MAC: a low latency, energy efficient demand-wakeup mac protocol for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing(MobiHoc'08)[C]. Hong Kong, China, 2008.53-62.
- [7] 胡玉鹏, 林亚平, 周四望. 面向异步通信机制的无线传感器网络及其 MAC 协议研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(8):1163-1477.
HU Y P, LIN Y P, ZHOU S W. Asynchronous communication mechanism oriented wireless sensor networks and MAC protocol[J]. Journal on Computers, 2011, 34(8):1163-1477.
- [8] 李哲涛, 李仁发, 魏叶华. 无线传感器网络中时间同步与测距协同算法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(4):638-644.
LI Z T, LI R F, WEI Y H. Coordinated algorithm for time synchronization and distance measurement in wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(4):638-644.
- [9] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[A]. Proceedings of the Second ACM SenSys Conference (SenSys'04)[C]. Baltimore, MD, USA, 2004. 95-107.
- [10] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 4th ACM SenSys Conference (SenSys'06)[C]. Boulder, CO, USA, 2006.307-320.
- [11] CAO H, PARKER K W, ARORA A. O-MAC: a receiver centric power management protocol[A]. Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Network Protocols(ICNP'06)[C]. Santa Barbara, CA, USA, 2006.311-320.
- [12] WEI Y, SILVA F, HEIDEMANN J. Ultra-low duty cycle MAC with scheduled channel polling[A]. Proceedings of the 4th ACM SenSys Conference(SenSys'06)[C]. Boulder, CO, USA, 2006.321-334.
- [13] SUN Y, GUREWITZ O, JOHNSON D B. RI-MAC: a receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks[A]. Proceedings of the 6th ACM SenSys Conference (SenSys'08)[C]. Raleigh, NC, USA, 2008.1-14.
- [14] Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY)

specifications[EB/OL]. www.ieee.org, 1997.

[15] KNUTH D E. 计算机程序设计艺术, 第 2 卷: 半数值算法[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

KNUTH D E. The Art of Computer Programming, Volume 2: *minumerical Algorithms*[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.

作者简介:



李哲涛 (1980-), 男, 湖南邵阳人, 湘潭大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、压缩感知。



王志强 (1989-), 男, 湖南长沙人, 湖南科技大学硕士生, 主要研究方向为无线传感器网络。



裴廷睿 (1970-), 男, 湖南通道人, 湘潭大学教授、博士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络、多媒体通信。



朱更明[通信作者] (1967-), 男, 湖南邵阳人, 湖南科技大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线传感器网络安全、图像处理。E-mail:gengmingzhu@gmail.com。



潘高峰 (1981-), 男, 四川渠县人, 博士, 西南大学特聘副教授, 主要研究方向为面向 4G 及未来无线通信系统的协作通信技术、认知无线电技术、保密通信技术及绿色通信技术。