

# 新型随机多址接入无线传感器网络 MAC 控制协议与能量有效性分析

丁洪伟, 赵东风, 黄毛毛

(云南大学 通信工程系, 云南 昆明 650091)

**摘要:** 提出了一种新的随机多址接入无线传感器网络的 MAC 控制协议, 在发送分组的时间  $1+a$  中, 采用  $p$  概率检测与 1-坚持的联合控制策略, 并对多通道的随机多址接入无线传感器网络进行了分析, 理论分析了系统的吞吐量和多通道中不同业务的吞吐量, 以及信息分组的发送时延等参数, 理论分析与仿真实验结果相一致。还结合无线传感器网络的能量有效性, 通过对概率  $p$  值的选取, 控制忙周期侦听信道的节点数和空闲期的休眠站点数, 采用休眠技术实现了系统的节能效果。通过对 2 种无线传感器网络控制协议的能量有效性分析, 证明了改进的控制协议其节点具有更长的生命周期, 更适合作为无线传感器网络的 MAC 控制协议。

**关键词:** 无线传感器网络; 随机多址接入;  $p$  概率检测; 1-坚持; 能量有效性

中图分类号: TN914.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)02-0051-07

## Analysis of a new random multi-access MAC protocol and its energy efficiency for wireless sensor networks

DING Hong-wei, ZHAO Dong-feng, HUANG Mao-mao

(Department of Communication Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

**Abstract:** A novel random multi-access MAC protocol for WSN using the multi-channel and the probability detection and 1-persistent access policy in the packet transmit ( $1+a$ ) was proposed. The throughputs of the PDPMRM protocol and the multi-traffic were obtained. Simulations agree with the theoretical analysis. Also, the energy efficiency was analyzed for WSN by choice of probability  $p$  to control the waking nodes in busy period and the sleeping nodes in idle period. The sleeping technique realized the purpose of saving energy. By using contrast of energy efficiency between PDPMRM and improved PDPMRM, this improved PDPMRM has longer life cycle, it is more suitable for WSN.

**Key words:** wireless sensor networks; random multi-access;  $p$  probability detection; 1-persistent; energy efficiency

### 1 引言

无线传感器网络是一种由传感器、数据处理单元和通信模块集成化的微小网络节点, 这些节点在高效的 MAC 控制协议和路由协议控制下自组织的形成专用无线网络。节点中内置的传感器可对环境

的温度、湿度、噪声、光强度、压力, 土壤成分、移动物体的速度、方向等物理量进行测量, 再经节点内的数据处理芯片和专用通信电路, 将采集的信息传送汇集到控制中心。正因为传感器网络的这种功能集成、应用广泛、性价比高, 而成为近年来国内外研究的热点。由于无线传感器网络适用于大范

收稿日期: 2008-06-21; 修回日期: 2010-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60362001, F0424104)

**Foundation Item:** The National Natural Science Foundation of China (60362001, F0424104)

围、多数据量的处理，因此，除了对电路和器件的专门要求外，高效的控制协议和节能问题也是无线传感器网络研究的重点。目前应用于无线传感器网络的 MAC 控制协议主要有 SMACS<sup>[1]</sup>，基于 CSMA 的介质访问<sup>[2]</sup>，TDMA/CDMA 组合方案<sup>[3]</sup>等。SMACS 虽然有效地节省了能量的损耗，但是时隙的分配方案不够严密，不同节点的子网之间可能永远得不到通信机会；TDMA/CDMA 虽然有效地减小了冲突，但事先定义的信道和时隙分配方案限制了对空闲时隙的有效利用，因而信道利用率较低；传统的 CSMA 由于持续侦听信道而消耗过量的能量，不适于无线传感器网络。现有的改进方法为采用固定时间间隔的周期性侦听方案节省功耗，如 SMAC<sup>[4]</sup>，但 SMAC 没有考虑公平性问题，而且信道利用率也有所下降。

针对以上问题，本文提出了一种新的无线传感器网络 MAC 协议，即概率检测与 1-坚持联合控制的多通道随机多址接入 MAC 控制协议(PDPMRM, probability detection and 1-persistent access policy for multi-channel random multi-access)，同时还采用了固定休眠和动态休眠相结合的应用技术。在新的控制协议中，传输时间经过归一化处理定义为  $1+a$ ，在分组发送时间  $1$  中采用概率  $p$  检测<sup>[5]</sup>，在线路延时  $a$  内采用 1-坚持型的接入控制，减少空闲时间内的检测时延和忙时发送过程中的碰撞时间，在多通道负载均衡的情况下保证系统的吞吐量，同时降低系统能耗。本文采用平均周期分析方法<sup>[6,7]</sup>，对概率检测与 1-坚持联合控制及改进型合控制协议进行了建模分析，获得了系统吞吐量、业务吞吐量、信息分组的发送时延、节点的生命周期等重要参数。

## 2 概率检测与 1-坚持联合控制的多通道随机多址接入控制协议

本文按文献[5]中的设计，系统中设置  $N$  条业务信道，节点依照各自业务的优先级随机接入这  $N$  条信道，所发送的信息分组的总时间为  $TP$ ，其长度为  $1+a$ 。PDPMRM 控制协议中规定：在  $1$  时间内到达的信息分组以概率  $p$  检测接入信道，在  $a$  时间内到达的信息分组则采用 1-坚持接入信道。由于系统中设置有  $N$  条业务信道，则根据业务的需求定义  $N$  个优先级业务，每类优先级业务的用户数不限。图 1 是 PDPMRM 控制协议的信道模型。 $N$  个优先级业务由低到高的顺序为优先级 1、优先 2、…、优先级  $N$ 。优先级  $i$  的业务占用信道 1 至  $i$  的信道，即优先级 1 可占用信道 1，优先级 2 占用信道 1 和 2，依此类推。优先级  $i$  在信道  $j$  上的到达率为  $\lambda_j = G_j / (N - j + 1)$  ( $j \leq i$ )，此时系统负载均衡，每条信道的利用率均为  $G_j = G$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ )。

在 PDPMRM 控制协议中，定义系统为离散时间系统，其时隙长度为  $a$ ，信息分组的长度为  $a$  的整数倍。各类业务按上述控制策略随机接入系统，其特性均为 Poisson 过程，并且规定随机多址接入系统中的碰撞信息分组在后续时间段中重传也为 Poisson 过程。另外，还假定信道为理想状态信道，信道中无噪声和干扰，用户以概率 1 检测信道状态。由于系统是随机多址接入系统，在  $N$  条信道中会出现 3 种随机事件，即信息分组发送成功的事件( $U$ )，信息分组发生碰撞的事件( $B$ )，以及信道空闲的事件( $I$ )。论文采用文献[6,7]中的分析方法，将这 3 种事件划分为空闲事件  $I$ ，碰撞或成功的复合事件  $BU$ ，2 种事件循环时间变量为  $T_n$ 。

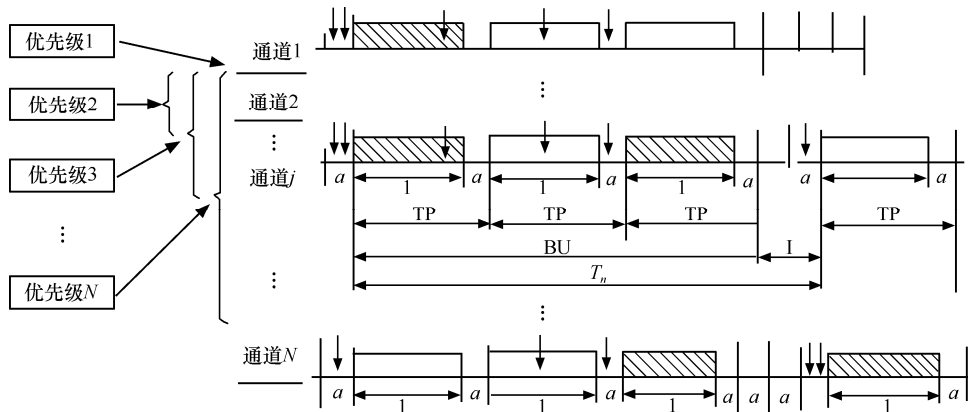


图 1 PDPMRM 控制协议的信道模型

在第  $j$  条信道 ( $j=1, 2, \dots, N$ ) 上发送信息分组的过程如图 1 所示。在空闲期  $I$  的最后一个时隙到达的用户侦听到信道空闲, 即在紧接的后续时隙开始发送信息分组。在用户发送信息分组 TP 中的 1 时间期内还有其他用户要发送分组信号, 则以  $p$  概率侦听信道; 在传输时延期  $a$  时间内若有其他用户要发送分组信号, 则以  $1$ -坚持侦听信道, 直到信道空闲抢占信道, 发送信息分组。在一个 TP 时间期内累积要发送的信息分组数是  $1+a$  内持续侦听的用户数, 如果该数值大于或者等于 1, 那么 TP 时间后仍是一个 TP 时间, 若干个 TP 时间形成信道上的忙时间期; 如果该数值等于 0, 那么信道上的忙期结束, 后续为空闲时间期。根据上述定义和分析, 可获得定理 1 证明的系统吞吐量。

**定理 1** 在 PDPMRM 控制协议中系统的吞吐量为

$$S = \frac{N[(p+a)G(1-e^{-aG}) + aGe^{-aG}]e^{-(p+a)G}}{(1+a)(1-e^{-aG}) + ae^{-(p+a)G}}$$

**证明** 定义  $m$  为在一个 TP 时间内到达的信息分组数,  $n$  为在一个忙期中 TP 的时间段数; 在一个 TP 发送信息分组的时间中有  $x$  个分组到达, 其事件记为  $A_x$ ; 在一个 TP 时间中没有分组发送的概率为  $q_0$ , 而只有一个用户继续侦听信道准备发送分组信号的概率为  $q_1$ 。

第一步, 第  $j$  条信道中分组成功时间  $U_j$  的平均长度  $E[U_j]$ 。

在 PDPMRM 控制协议中第  $j$  条信道上发送分组成功有 2 种情况。

1) 如果在空闲期最后一个时隙中只有一个分组到达, 则这个分组在下一个时隙期内将被成功发送, 其时间长度  $U_{j1}$  的均值为

$$E[U_{j1}] = \frac{aG_j e^{-aG_j}}{1 - e^{-aG_j}} \quad (1)$$

2) 如果用户在忙期到达, 若该用户是当前 TP 时间内唯一坚持侦听的用户, 当符合下面 2 种情况。

① 在当前 TP 发送信息分组的 1 时间内只有一个用户坚持侦听信道, 准备发送分组信号, 并且在  $a$  时间内没有其他用户到达;

② 在当前 TP 发送信息分组的 1 时间内没有分组发送, 并且在  $a$  时间内只有一个用户到达, 准备发送分组信号;

则在当前 TP 时间内准备发送的唯一分组信号

将在后续时间中被成功发送, 其时间长度  $U_{j2}$  的均值由下面分析计算。

事件  $A_x$  发生的概率  $P(A_x)$  满足

$$P(A_x) = \frac{G_j^x}{x!} e^{-G_j} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} q_0 &= e^{-aG_j} \sum_{x=0}^{\infty} P(A_x)(1-p)^x \\ &= e^{-(p+a)G_j} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} q_1 &= e^{-aG_j} \sum_{x=1}^{\infty} P(A_x)C_x^1 p(1-p)^{x-1} + \\ & aG_j e^{-aG_j} \sum_{x=0}^{\infty} P(A_x)(1-p)^x \\ &= e^{-(p+a)G_j} (p+a)G_j \end{aligned} \quad (4)$$

由于  $n$  服从均值为  $\frac{1}{q_0}$  的几何分布, 则

$$E[U_{j2}] = E[m] \times 1 = E[nq_1] = \frac{q_1}{q_0} \quad (5)$$

所以,  $E[U_j] = E[U_{j1}] + E[U_{j2}]$

$$= \frac{aG_j e^{-aG_j}}{1 - e^{-aG_j}} + (p+a)G_j \quad (6)$$

第二步, 第  $j$  条通道的平均忙期长度  $E[BU_j]$

$$E[BU_j] = \frac{1+a}{q_0} = (1+a)e^{(p+a)G_j} \quad (7)$$

最后, 计算第  $j$  条信道的平均空闲期长度  $E[I_j]$ 。

由于空闲期  $I_j$  内的时隙个数  $k$  服从均值为

$$E[k] = \frac{1}{1 - e^{-aG_j}}$$

$$E[I_j] = aE[k] = \frac{a}{1 - e^{-aG_j}} \quad (8)$$

系统  $N$  条信道负载均衡, 根据以上分析以及式(6)、式(7)和式(8)与  $S = \sum_{j=1}^N \frac{E[U_j]}{E[I_j] + E[BU_j]}$  可得

定理 1。

证毕

**定理 2** 在 PDPMRM 控制协议中系统中优先级  $i$  业务的吞吐量为

$$S_i = \frac{[(p+a)G(1-e^{-aG}) + aGe^{-aG}]e^{-(p+a)G}}{(1+a)(1-e^{-aG}) + ae^{-(p+a)G}} \sum_{j=1}^i \frac{1}{N-j+1}$$

**证明** 设  $E(U_{ij})$  为优先级  $i$  在通道  $j$  中成功发送信

息分组的平均长度 ( $j \leq i$ )。由于信道负载均衡, 且优先级  $i$  在通道  $j$  上的到达率为  $\lambda_{ij} = G_j / (N - j + 1)$ , 则由式(7)、式(8)、式(9)和  $G_1 = \dots = G_j = \dots = G_N = G$  及

$$S_i = \sum_{j=1}^i \frac{E(U_{ij})}{E[I_j] + E[BU_{ij}]} \text{ 可得定理 2.}$$

证毕

### 3 概率检测与 1-坚持联合控制协议时延分析

在分析时延之前, 假定: 产生 ACK 信号的时间忽略不计, ACK 信号总能被正确的传送; 设  $R$  为重传的平均时延,  $R$  由以下几部分组成, 分组传送时间  $1$ , ACK 信号的传送时间  $a$ , 双向传播时延  $2a$ , 平均重传时延  $\delta$ , 则

$$R = 1 + \alpha + 2a + \delta \quad (9)$$

$G/(S-1)$  为需要重传的分组数的平均值, 那么信息分组的平均时延为

$$D = GR/(S-1) + 1 + a \quad (10)$$

由以上得出的吞吐量表表达式, 及文献[5]得出的系统吞吐量表表达式, 代入式(10), 可得到时隙式概率  $p$  检测的信息分组的平均时延为

$$D_{pd} = \left( \frac{ae^{-pG(1+a)} + (1-e^{-aG})(1+a)}{e^{-pG(1+a)}[p(1+a) + e^{-aG}(a-p-pa)]} - 1 \right) R + 1 + a \quad (11)$$

概率检测与 1-坚持联合控制协议信息分组的平均时延为

$$D_{pdp} = \left( \frac{G(1+a)(1-e^{-aG}) + ae^{-G(p+a)}}{[(p+a)G(1-e^{-aG}) + aGe^{-aG}]e^{-G(p+a)}} - 1 \right) R + 1 + a \quad (12)$$

其大小比较在后面的仿真实验中给出。

### 4 改进型概率检测与 1-坚持联合控制的无线传感器网络 MAC 协议及其能量有效性分析

在时隙式概率检测与 1-坚持联合控制协议中节点一直处于工作状态, 加上空闲时的监听和时钟同步, 将消耗更多的能量, 因此本文针对上述情况提出一种改进型的概率检测与 1-坚持联合控制的无线传感器网络 MAC 控制协议。工作机理: 当节点内有信息分组要发送时, 且在 TP 时间中的  $1$  时间内到达, 以概率  $p$  侦听信道, 以概率  $1-p$  放弃侦听信道, 进入休眠, 休眠到下一个 TP 时间开始前结束; 在 TP 时间的  $a$  时延内到达, 则以 1-坚持接

入; 当没有节点要发送信息分组时系统进入休眠状态, 并且休眠时间为  $1$ 。图 2 为其改进后的控制原理图。

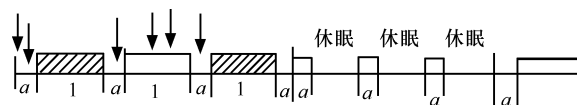


图 2 改进型概率检测与 1-坚持联合控制原理

对概率检测与 1-坚持联合控制协议和改进型联合控制协议的能量有效性进行分析, 计算节点的生命周期时间。为了简化计算, 论文参考文献[8]的电池模型, 并在此基础上引入信道检测功率, 假定每一节点处于传输状态时功率为  $P_{Tx} = 1.8\text{mW}$ , 接收状态时功率为  $P_{Rx} = 9\text{mW}$ , 信道检测状态时功率为  $P_{ln} = 0.5\text{mW}$ , 数据传输率  $B = 24\text{kbit/s}$ 。电池泄露功率为 10%, 总能量为  $E$  (Wh), 则一年的泄露所消耗的功率为  $P_{Lk} = \frac{0.1E}{24 \times 365}$ , 当传感器节点的平均功率为  $P$  时, 则可以得到电池能量耗尽时, 节点的生命时间为  $T = \frac{E}{P + P_{Lk}} = \frac{E}{24 \times 365P + 0.1E}$  年。对

于一节 LR6 电池来说, 电压峰值为 1.5V 和 0.9V, 平均电压为  $U = 1.2\text{V}$ , 容量为 2.6Ah。如果电池使用时间为  $T$ , 则电池的总能量为  $E = UIT = 1.2 \times \frac{2.6}{T} \times T = 3.12\text{Wh}$ 。

对于概率检测与 1-坚持联合控制协议来说, 有以下结论:

$$E(U)_{pds} = \frac{aGe^{-aG}}{1 - e^{-aG}} + pG + aG$$

$$\begin{aligned} E(B)_{pds} &= E(BU) - E(U)_{pds}(1+a) \\ &= \frac{1+a}{e^{-pG-aG}} - E(U)_{pds}(1+a) \end{aligned}$$

$$E(I)_{pds} = \frac{a}{1 - e^{-aG}}$$

不妨设

$$P_{pds} = \frac{1.8 \times 10^{-3} \times (1+a)E(U)_{pd} + 9 \times 10^{-3} E(B)_{pd} + 0.5 \times 10^{-3} E(I)_{pd}}{E(U)_{pd}(1+a) + E(B)_{pd} + E(I)_{pd}} \quad (13)$$

概率检测与 1-坚持联合控制下节点的生命周期  $T_{pds}$  为

$$T_{pds} = \frac{E}{24 \times 365 P_{pds} + 0.1E} \quad (14)$$

对于改进型联合控制协议由上面分析，有以下结论：

$$E(U)_{lm} = \frac{aGe^{-aG}}{1 - e^{-aG}} + pG + aG$$

$$E(B)_{lm} = \frac{1+a}{e^{-pG-aG}} - E(U)_{lm}(1+a)$$

$$E(I)_{lm} = \frac{a}{1 - e^{-aG}} + \frac{1}{1 - e^{-aG}} - 1$$

传感器节点的平均功率和生命周期由下式计算

$$P_{lm} = \left[ \frac{1.8(1+a)E(U)_{lm} + 9E(B)_{lm} + 0.5 \frac{a}{1 - e^{-aG}}}{E(U)_{lm}(1+a) + E(B)_{lm} + E(I)_{lm}} \right] \times 10^{-3} \quad (15)$$

$$T_{lm} = \frac{E}{24 \times 365 P_{lm} + 0.1E} \quad (16)$$

### 5 计算机仿真实验与结果分析

在以上分析的基础上，对 PDPMRM 协议性能进行了仿真。仿真实验采用 MATLAB7.0，仿真环境：假定信道为理想状态，同时设信道中信息分组的到达率为  $G$ ，时延  $a=0.1$ ，信息分组长度为 1，信道数  $N=4$ ，优先级从高到低依次是忙节点业务流、中等节点业务流、闲节点业务流和其他节点业务流。

对时隙式  $p$  检测 CSMA 和概率检测与 1-坚持联合控制协议的吞吐量进行了比较分析，结果如图 3 所示。在 PDPMRM 协议中  $p=0.001, 0.1, 1$  时，给

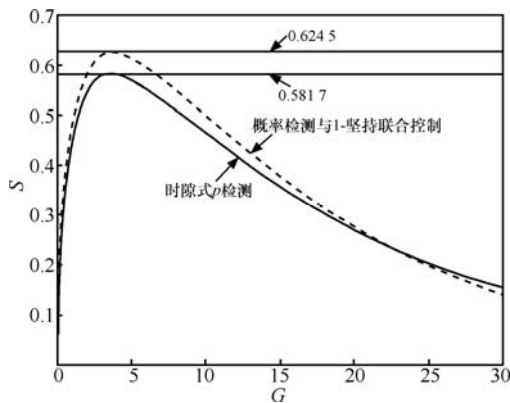


图 3 时隙式  $p$  检测和概率检测与 1-坚持联合控制吞吐量比较( $p=0.001$ )

出了通道数  $N=4$ ，不同优先级系统吞吐量  $S$  随  $G$  值的变化图，分别为图 4~图 6 所示。图 7 给出了  $p=0.001$  时时隙式  $p$  检测 CSMA 和概率检测与 1-坚持联合控制的信息分组发送时延的对比。图 8 给出了 PDPMRM 与改进型 PDPMRM 的能量有效性的分析结果。图 4~图 8 都给出了仿真结果，从图中可以看出理论值与仿真值较吻合。

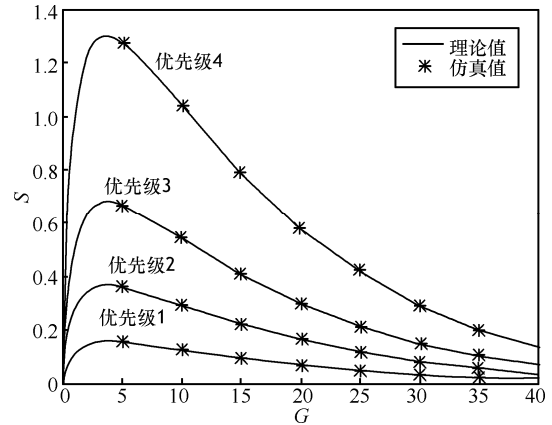


图 4 不同优先级  $p=0.001$  时吞吐量

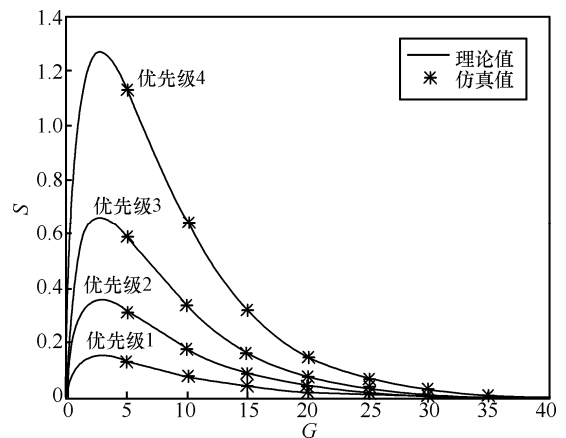


图 5 不同优先级  $p=0.1$  时吞吐量

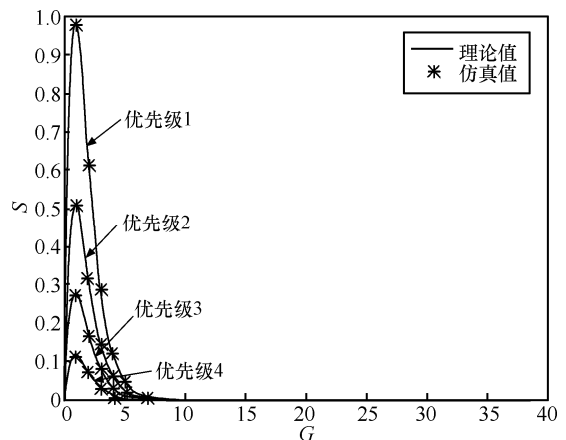


图 6 不同优先级  $p=1$  时吞吐量

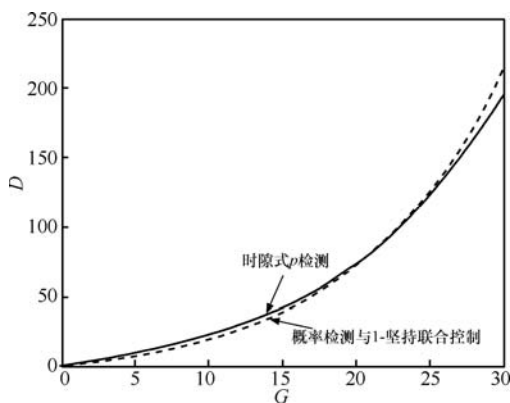


图 7 时隙式  $p$  检测和概率检测与 1-坚持联合控制时延比较

对于 PDPMRM 协议，从以上分析的图中可以看出：

1) 当  $p$  取 0.001 时，概率检测与 1-坚持联合控制协议，可以取得最大的吞吐量值 0.6245，此时时隙式概率  $p$  检测不能取到最大值，从图 3 中可以看到，轻负载时，概率检测与 1-坚持联合控制协议性能优于时隙式概率  $p$  检测。这也与实际相符，当轻负载时，引入 PDPMRM 可以减小信道资源的浪费，增加分组发送的成功率，提高信道利用率。

2) 不同优先级的系统吞吐量也不相同，对于同一  $p$  值时，优先级高的吞吐量也就越大。同一优先级在不同  $p$  值时吞吐量曲线也不一样，从图 4~图 6 可知， $p$  值越大系统吞吐量越小，因此要保证通道的高利用率， $p$  值的选择就变得尤其重要。当轻负载时，选择较大的  $p$  值，可减小竞争冲突的机会和信道仲裁的开销，避免网络拥塞，提高信道的吞吐量；当负载较重时，选择较小的  $p$  值，不仅可以改善信道的利用率，也可提高节点间传输数据的速度。

3) 从图 4~图 6 看出，对于同一  $p$  值，在 PDPMRM 协议中，各优先级业务吞吐量在到达最大值后随着负载的加重而逐渐下降，并且高优先级业务总能获得较高的吞吐量，而低优先级的吞吐量则较少。同时，无论系统负载如何变化，各优先级均以一定的比例占用可用的系统资源，即系统在保证一定的高优先级业务的高 QoS 需求的同时，也兼顾了一定的公平性。

4) 从图 7 可以看出，概率检测与 1-坚持联合控制在轻负载时时延比时隙式  $p$  检测的时延小。结合图 3，当负载轻时无论是时延特性还是吞吐量，前者都具有较优的性能。

另外，对于改进型 PDPMRM 无线传感器网络协议，其理论分析和仿真实验都表明节点的生命周

期比 PDPMRM 协议的相同值更长，典型值的使用年限分别为 4.384 年和 0.663 年。PDPMRM 的节点生命周期随着负载的加重而逐渐减小，随着负载的增加，系统中信息分组的碰撞也随之增多，耗费的能量也随之增大，因此，生命周期减小。改进型的使用寿命也是随着负载的加重逐渐减小，负载加重，空闲期减小，休眠的时间也减小，因此生命周期减小。从图 8 中可以看到，在改进型 PDPMRM 协议中，节点的最长生命周期比时隙式概率检测下的节点的最长生命周期长 3.721 年。这对于无线传感器网络来说是极其有利的。

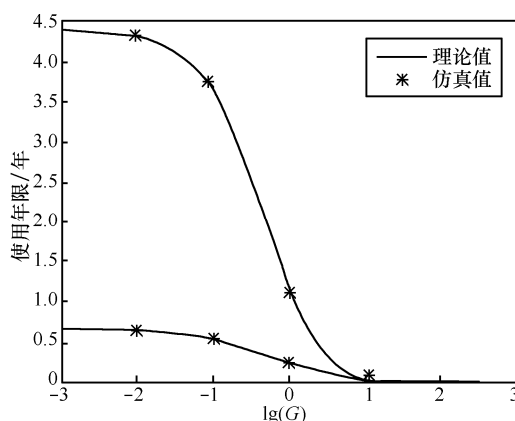


图 8 改进型和概率检测与 1-坚持联合控制的节点生命周期比较

### 6 结束语

本文提出的 PDPMRM 无线传感器网络 MAC 控制协议，通过选取  $p$  值，系统获得了较高的吞吐量。为了使无线传感器网络能有效地节能，在改进的 PDPMRM 控制协议中，采用信道忙时节点休眠，信道空闲时节点进入工作状态，使系统获得了更好的节能效果。多通道优先级业务的控制策略，实现了系统的负载均衡。即使在用户数增加的情况下，优先级业务仍有较高的吞吐量。通过对比 PDPMRM 协议和改进型 PDPMRM 协议的性能，改进型 PDPMRM 协议在降低系统能耗方面有着更好的性能。仿真实验与理论分析证明，改进型 PDPMRM 协议是一种更有效的无线传感器网络 MAC 控制协议。

### 参考文献：

[1] WOO A, CULLER D. A transmission control scheme for media access in sensor networks[A]. Proceedings of the ACM MobiCom 2001[C]. 2001. 221-235.

- [2] SHIH E, CHO S, ICKES N, *et al.* Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks[A]. Proceedings of the ACM MobiCom 2001[C]. 2001. 272-286.
- [3] SOHRABI K, POTTIE G J. Performance of a novel self-organization protocol for wireless ad hoc sensor networks[A]. Proceedings of the IEEE 50th Vehicular Technology Conference. Amsterdam, 1999. 1222-1226.
- [4] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor network[A]. Proceedings of the INFOCOM 2002[C]. 2002.
- [5] 刘彬彬,赵东风,丁洪伟. 基于概率检测的时隙式多通道随机多址无线通信网络协议分析[J]. 通信学报,2006,27(12):70-75.  
LIU B B, ZHAO D F, DING H W. Analysis of slotted  $p$ -detection multi-channel and random multi-access protocol for wireless communication network[J]. Journal on Communications,2006, 27(12): 70-75.
- [6] 赵东风. 时隙式随机争用多址系统分析方法研究[J].通信学报, 1999, 20(8): 80-85.  
ZHAO D F. Study on the average cycle method for slotted multiple-access communications[J]. Journal on Communications, 1999, 20(8): 80-85.
- [7] 赵东风. 一种新的时间连续随机多址系统分析方法研究[J]. 电子科学学报, 1999,20(1):37-41.  
ZHAO D F. Study on a new method for continuous-time systems of random access channel[J]. Journal of Electronics,1999,21(1).37-41.
- [8] EL-HOIYDI A. ALOHA with preamble sampling for sporadic traffic in ad hoc wireless sensor networks[A]. IEEE International Conference on Communications (ICC)[C]. New York, 2002.
- [9] LU G, KRISHNAMACHARI G, RAGHAVENDRA C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for wireless sensor networks[A].Proceedings of 18th Int'l Paralled and Distributed Processing Symp(IPDS'04)[C]. 2004.224-230.
- [10] NAR PELIN C, CAYIRCI E. PCSMAC.A power controlled sensor MAC protocol for wireless sensor networks[A].Proceedings of the second European Workshop on Wireless Sensor Networks[C]. 2005.81-92.
- [11] 李方敏, 徐文君, 高超. 一种用于无线传感器网络的功率控制 MAC 协议[J]. 软件学报,2007,18(5):1080-1091.  
LI F M, XU W J, GAO C. A power control MAC protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2007,18(5):1080-1091.

#### 作者简介:



丁洪伟 (1964-), 男, 江西于都人, 云南大学博士生, 云南大学通信工程系副教授, 主要研究方向为随机多址接入通信系统。



赵东风 (1957-), 男, 湖北郧县人, 云南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为随机多址接入通信系统、轮询系统、网络通信工程等。



黄毛毛 (1983-), 男, 江西永修人, 云南大学硕士生, 主要研究方向为计算机网络。