

DQ-MAC: 一种基于区分服务的 WSN 信道访问机制

何 剑¹ 白光伟¹ 曹 磊^{1,2}

(南京工业大学计算机科学与技术系 南京 210009)¹

(南京大学软件新技术国家重点实验室 南京 210093)²

摘 要 针对现有无线传感器网络 MAC 协议不能提供数据业务优先级区分的问题,在充分分析 S-MAC 协议的基础上,提出了一种基于区分服务的 MAC 协议改进机制——DQ-MAC(Diffserv-based QoS-aware MAC)。其基本思路是让高优先级数据有更多的侦听时间,使高优先级数据传输的机会是低优先级的两倍,达到了减少高优先级数据的传输时延的目的,从而确保了高优先级数据业务的传输性能。相关分析结果表明,该机制使高优先级数据业务拥有更高的吞吐量,并且降低了高优先级业务的平均服务时延。

关键词 无线传感器网络, 区分服务, 媒体接入控制

中图分类号 TN919 **文献标识码** A

DQ-MAC: A Diffserv-based MAC Mechanism in Wireless Sensor Networks

HE Jian¹ BAI Guang-wei¹ CAO Lei^{1,2}

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)¹

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)²

Abstract Since the most of existing MAC protocols in wireless sensor networks do not support any priority scheme, this paper proposed an improved scheme of the existing S-MAC(sensor MAC) protocol, say, DQ-MAC(Diffserv-based QoS-aware MAC). The main idea is that, based on Differentiated Services, an additional channel listening time was introduced for high priority data. As a result, compared to low priority data, data with high priority can achieve much more chance to be delivered, and the packet transmission latency of high priority data is reduced significantly as well. Our mathematical analysis demonstrates that, using the proposed DQ-MAC, the transmission quality of high priority data over wireless sensor networks is effectively improved, in terms of achieved throughput, average service delay, and so on.

Keywords Wireless sensor networks, Diffserv, MAC

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)由部署在监测区域内大量具有无线通信功能的廉价微型传感器节点组成,具有高灵活性、强健壮性及高智能化等优点,可被广泛应用于国防军事、国土安全、生态保护、环境监测、交通管理、医疗卫生、反恐、抗灾等领域。随着人们对信息获取的需求不断增加,由传统传感器网络所获取的简单数据越来越不能满足人们对信息获取的需求,迫切需要获取信息量更丰富的图像、音频、视频等多媒体信息。

介质访问控制协议(Medium access control, MAC)处于无线传感器网络通信协议的底层部分,是所有数据报文和控制消息在无线信道上进行发送和接收的直接控制者,可解决 WSNs 网络中节点以怎样的规则共享媒体才能取得满意的网

络性能的问题。MAC 协议能否高效地使用无线信道,是保证无线传感器网络服务质量的关键因素。因此对传感器网络 MAC 层协议的区分服务、QoS 保障的研究更具有实际意义。

现有无线传感器网络 MAC 协议的研究大都假定基于单一的“尽力而为”(best effort)数据传输模型,各类业务平等地竞争网络资源,因而不利于服务质量要求高的业务传输。S-MAC(sensor MAC)^[1]协议是在 802.11 MAC 协议的基础上,针对传感器网络的节能需要而提出的无线传感器网络 MAC 协议。S-MAC 协议减少了空闲侦听所消耗的能量,但不足之处在于:由于引入休眠,一个节点如果没能在侦听时间内发送数据,则必须等到下一个周期发送,从而导致吞吐量下降。T-MAC(timeout MAC)^[2]协议在 S-MAC 的基础上引入适应性占空比,减少了空闲时侦听浪费的能量,但仍保持合理的吞吐量。该协议存在早睡问题,虽然提出了一些解决方法,但仍未

到稿日期:2010-01-08 返修日期:2010-03-26 本文受国家自然科学基金项目(60673185),教育部留学回国人员科研启动基金项目([2007]1108),江苏省青蓝工程中青年学术带头人培养对象资助项目([2007]2)资助。

何 剑(1985-),男,硕士生,主要研究方向为区分服务、无线传感器网络、流媒体传输性能等, E-mail: helloman_520@163.com;白光伟(1961-),男,博士,教授,主要研究方向为网络体系结构和协议、传感器网络、多媒体网络 QoS、网络系统性能分析和评价等;曹 磊(1980-),男,博士生,主要研究方向为无线多媒体网络、网络 QoS 保障等。

在实践中得到验证。B-MAC^[3]协议使用扩展前导和低功率侦听(LPL)技术实现低功率通信,采用空闲信道评估技术进行信道裁决。节点在发送数据分组之前先发送一段长度固定的前导序列。为避免分组空传,前导序列长度要大于接收方休眠时间。若节点唤醒后侦听到前导序列,则保持活跃状态,直到接收到数据分组或信道变得再次空闲为止。B-MAC只关注能量消耗的问题,更适合于延时要求不高的应用。近年来一些学者提出了一些支持QoS的WSN MAC协议。如PQMAC^[4]将数据分为4种优先级,通过在休眠时间的中间增加侦听时间来增加高优先级数据的发送机会。但是当节点中有4种优先级的数据需要发送时,可能会造成侦听时间太短,不利于数据发送,而且节点在一个周期内频繁地被唤醒会消耗较多的能量。

本文提出一种为传感器网络提供区分服务的信道接入协议——DQ-MAC(Diffserv-based QoS-aware MAC)。在考虑能量消耗问题的同时,引入优先级队列和针对高优先级数据的额外侦听时间,从而确保了高优先级数据业务的服务质量,达到了对数据业务区分服务的目的。另一方面,我们利用相关数学模型对DQ-MAC信道访问机制进行建模分析,得出两种优先级数据业务MAC时延、吞吐量以及能量消耗的计算方法。分析结果表明,该策略不仅能使高优先级数据业务占用相对较多的带宽,而且降低了其传输时延和分组丢弃概率。

本文第2节详细描述DQ-MAC信道访问机制;第3节利用相关数学模型详细分析DQ-MAC协议机制;第4节对该协议进行性能分析和评价,最后总结全文。

2 DQ-MAC 协议描述

本文考虑两种类型的数据业务:高优先级的实时数据业务(RT)和低优先级的尽力而为数据业务(BE)。RT业务可以用来传输音频和视频等实时多媒体信息,这些信息对时延敏感。BE业务用于普通的数据传输,这些信息对时延精度的要求不高。为便于分析,定义*i*为数据业务的优先级类别,取值为0或1,其中0表示高优先级的RT业务,1代表低优先级的BF业务。我们提出了基于优先级的机制对RT业务和BE业务加以区分。

(1) 额外的侦听时间

大部分无线传感器网络MAC协议都是通过加入休眠机制来节约能量。图1是经典无线传感器网络S-MAC协议的周期性休眠机制。一个周期由侦听时间和休眠时间组成。传感器节点在侦听时间内进行时间同步和数据传输,在休眠时间内关闭通信设备,节约能量。



图1 S-MAC协议周期性侦听休眠机制

DQ-MAC协议的目标是在减少能量消耗的同时,确保高优先级数据的服务质量。为减少数据冲突造成的能耗,协议利用退避机制来竞争信道,完成数据的接收或者发送。为了减少串音侦听带来的能耗,协议采用RTS/CTS的通告机制。每个节点在传输数据时都要经历RTS/CTS/DATA/ACK的通信过程,从而避免串音侦听。为了减少空闲侦听的能耗,协议采用周期性休眠机制,使得那些不参与发送或者接收的节

点进入休眠状态,从而降低能耗。节点在侦听时间内发送SYNC信息和交换RTS/CTS/DATA/ACK信息,因此增加侦听时间可以将数据更快地发送出去。如果所有的数据都通过增加侦听时间的方法发送出去,会浪费较多的能量,因此传感器节点只希望将高优先级数据快速发送到目的节点。高优先级数据对时延敏感,而低优先级数据对时延的容忍度较高。为了达到区分服务的目的,我们采用增加高优先级数据侦听时间的方法使高优先级数据比低优先级数据有更多的发送机会。将侦听时间分为两部分:在第一部分侦听时间(T_{a1})里BE数据和RT数据都有机会发送数据,而在第二部分侦听时间(T_{a2})里只有RT数据可以发送。从而在一个周期内RT数据有两次发送机会,而BE数据只有一次。如图2所示,节点在侦听时间里检测是否有数据发送和接受,如果没有数据需要发送,则节点转入休眠。



图2 DQ-MAC周期性侦听休眠机制

通过以上分析发现,节点必须消耗更多的能量来增加其侦听时间。节点若知道其接收RT数据的概率很小,就可以维持在休眠状态,节省能量。

我们通过在RTS/CTS中增加标记数据类型的值,让接收节点知道其接收RT数据的概率。当节点要发送RT数据时,它首先在RTS信息中标记发送数据的类型,接收节点接收到RTS信息后就能检测出自己要接收数据的类型,调整其侦听时间并在CTS数据中标记出数据类型。

(2) 优先级队列

如果只有一个队列,则高优先级的数据在使用“先进先出”队列机制时可能因为处在队列的末端而不能及时发送,因此我们在机制中使用优先级队列。将高优先级的数据放入高优先级队列中,将低优先级数据放入低优先级队列,这样高优先级数据可以在额外的侦听时间里传输。每个发送队列采用DCF(distributed coordination function)机制独立竞争信道,在竞争过程中使用各自的 CW_i ,竞争窗口恒定不变。选择完退避数则后,如果信道保持空闲且持续一个时隙,节点的退避数则会在时隙结束后减少1。当网络中某个节点任一队列的退避数首先减为0时,该节点就会发送数据。两个或者两个以上的节点如果同时发送数据会造成冲突。而那些没有发送数据的节点在退避过程中如果检测到有其他节点发送数据或者同一个节点中的不同队列发送数据,则转入休眠状态,等待下一个周期的到来。而对于RT业务,如果在一个周期内第一段侦听时间内没能成功发送数据,则休眠至第二段侦听时间继续竞争信道。如果在第二段侦听时间内仍未成功发送数据,则等待到下一个周期。如图2所示,在第一段侦听时间里,不同优先级的业务都有机会传输数据,当同一个节点内不同优先级的数据在发送期间发生冲突时,选择优先级高的队列进行发送。当不同节点同时发送数据时将发生碰撞,发生碰撞的各个发送队列都要进入休眠,与队列优先级的高低无关。

3 区分服务的数学建模分析

本文研究一个单跳无线传感器网络场景,它由*n*个竞争节点和一个sink节点构成。借鉴文献[5,6]中所用的方法,

我们对本文提出的 DQ-MAC 机制进行数学建模分析,并通过相关模型得出数据业务的 MAC 接入时延、吞吐量以及能量消耗的计算方法。

3.1 Markov 链模型

随机过程 $B(t)$ 表示 MAC 层退避计数器的值,随机过程 $S(t)$ 表示 t 时刻所处的后退阶段,则 $\{B(t), S(t)\}$ 表示一个二维的马尔科夫链,如图 3 所示。

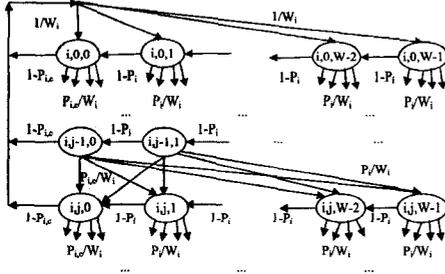


图 3 退避过程的 Markov 链

马尔科夫链模型的一步转移过程为

$$\begin{cases} P\{i, j, k | i, j, k+1\} = 1 - P_i, j \in (0, \infty), k \in (0, W_i - 1) \\ P\{i, j, l | i, j-1, k\} = P_i / W_i, j \in (1, \infty), k \in (0, W_i - 1) \\ P\{i, j, l | i, j-1, 0\} = P_{i,c} / W_i, j \in (1, \infty), k \in (0, W_i - 1) \\ P\{i, 0, k | i, j, 0\} = (1 - P_{i,c}) / W_i, j \in (0, \infty), k \in (0, W_i - 1) \end{cases} \quad (1)$$

式中, W_i 为竞争窗口的值, P_i 表示第 i 类业务在退避过程中检测到信道忙的概率。设 $b_{i,j,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{B(t) = j, S(t) = k\}$ 为各状态的稳态分布,则

$$b_{i,j,k} = \begin{cases} \frac{P_i}{W_i} \sum_{k=1}^{W_i-1} b_{i,j-1,k} + \frac{P_{i,c}}{W_i} b_{i,j-1,0} + (1 - P_i) \sum_{k=1}^{W_i-1} b_{i,j,k} \\ , k \in (0, W_i - 1], j \in (0, \infty) \\ \frac{P_i}{W_i} \sum_{k=1}^{W_i-1} b_{i,j-1,k} + \frac{P_{i,c}}{W_i} b_{i,j-1,0}, k = W_i - 1, j \in (0, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

由 Markov 链的归一化条件,可以求得任意节点中第 i 类数据发送的概率为

$$P_{i,t} = \sum_{j=0}^{\infty} b_{i,j,0} = \frac{P_i [1 - (1 - P_i)^{W_i}]}{P_i W_i - (1 - P_i) [1 - (1 - P_i)^{W_i}]} \quad (3)$$

我们将节点在一个周期内的侦听时间分为 T_{d1} 和 T_{d2} ,如图 4 所示。

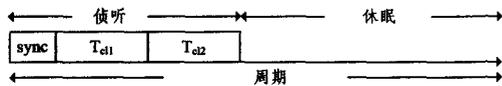


图 4 RT 业务调度

在 T_{d1} 内令 $P_{i,0}$ 表示第 i 类队列中没有数据包的稳态概率。对任一节点而言,该节点在任意时隙发送的概率(至少有一类业务发送的概率)为

$$P_i = 1 - \prod_{i=0}^1 (1 - (1 - P_{i,0}) P_{i,t}) \quad (4)$$

可以求得 P_i

$$P_1 = 1 - (1 - P_1)^{n-1} (1 - (1 - P_{0,0}) P_{0,t}) \quad (5)$$

$$P_0 = 1 - (1 - P_1)^{n-1} (1 - (1 - P_{1,0}) P_{1,t}) \quad (6)$$

第 i 类业务在发送数据时发生碰撞的概率为 $P_{i,c}$, 则

$$P_{0,c} = 1 - (1 - P_1)^{n-1} \quad (7)$$

$$P_{1,c} = 1 - (1 - P_1)^{n-1} (1 - (1 - P_{0,0}) P_{0,t}) \quad (8)$$

在 T_{d2} 内 RT 业务在额外的侦听时间退避过程中检测到信道忙的概率为

$$P_{0,c}' = 1 - (1 - (1 - P_{0,0}) P_1')^{n-1} \quad (9)$$

RT 业务在额外的侦听时间内发送时检测到信道忙的概率为

$$P_{0,c}'' = 1 - (1 - P_1')^{n-1} \quad (10)$$

在竞争窗口 CW_i , $P_{i,0}$ 已知的情况下,可由式(3)一式(7)计算出 $P_{0,t}$, $P_{1,t}$, P_t , P_1 , P_0 , $P_{0,c}$, $P_{1,c}$, P_0' , $P_{0,c}'$ 的值。

3.2 MAC 层接入时延分析

3.2.1 信号流图与梅森公式

信号流图是有向图来描述方程组变量间因果关系的一种图形。通过梅森函数将系统函数与对应信号流图相联系,可以简化系统函数的计算,这对于复杂系统函数的计算尤其重要。

梅森公式如下:

$$H = \frac{1}{\Delta} \sum_k g_k \Delta_k \quad (11)$$

本文利用信号流图来分析 MAC 接入过程。在信号流图的转移支路上,同时标示转移概率和所需要的时间。假设对于某条支路,转移概率为 P ,转移所需要的时间为 T ,则将该支路标示为 PZ^T 。在此方式下,梅森公式所得到的系统函数就是 MAC 接入时延的母函数^[7]。本文采用概率母函数的方法来计算时延分布,定义 $T(Z)$ 为 MAC 时延概率母函数。

3.2.2 MAC 服务时延分析

MAC 层服务时间是从数据包到达队列头部开始争用信道进行发送的时刻,到收到此数据包被成功接收确认的时刻或到此数据包发送失败被丢弃的时刻。假设同步时间忽略不计,将服务时延定义为以下几个部分的总和,即(1)由于休眠导致失去发送机会而造成的休眠时延;(2)竞争信道所消耗的时间,称为竞争时延;(3)发送数据所消耗的时间,称为发送时延。

在非饱和情况下,休眠时延的分布取决于以下两种情况:(a)下一个要服务的数据包来自于传输队列;(b)下一个要服务的数据包是一个新产生的数据包。根据 $P_{i,0}$ 的定义我们知道,(a)发生的概率为 $(1 - P_{i,0})$, (b)发生的概率为 $P_{i,0}$ 。

要计算休眠时延的分布,首先要得到节点在一个周期内成功发送的概率 $P_{i,suc}$ 和在一个成功发送的周期退避数为 i 的概率 $P_i\{BC=i | SUC\}$ 。

我们能很容易求得 $P_i\{BC=i | SUC\}$:

$$P_i\{SUC | BC=i\} = (1 - P_i)^i (1 - P_{i,c}) \quad (12)$$

而 $P\{BC=i\} = 1/W_i$, 因此可以得到

$$\begin{aligned} P_{i,suc} &= \sum_{j=0}^{W_i-1} P\{BC=j\} P_i\{SUC | BC=j\} \\ &= \frac{(1 - P_{i,c}) [1 - (1 - P_i)^{W_i-1}]}{W_i P_i} \end{aligned} \quad (13)$$

从而可以求得

$$P_i\{BC=j | SUC\} = \frac{P\{SUC, BC=j\}}{P_{i,suc}} = \frac{P_i (1 - P_i)^j}{1 - (1 - P_i)^{W_i-1}} \quad (14)$$

对于 BE 业务, (a) 情况下休眠时延的母函数为

$$T_{1,1}(Z) = \sum_{j=0}^{W_i-1} P_i\{BC=j | SUC\} Z^{(T_d - T_s - j\sigma)} \quad (15)$$

式中, T_d 是一个周期的时间, T_s 是平均发送时间, σ 是一个时隙的时间。BE 业务 (b) 情况下休眠时延的母函数为

$$T_{1,2}(Z) = \sum_{j=1}^{T_d/\sigma} (T_d/\sigma)^{-1} Z^j \quad (16)$$

因此 BE 业务由休眠造成时延的母函数为

$$T_1(Z) = (1-P_1)T_{1,1}(Z) + P_1T_{1,2}(Z) \quad (17)$$

对于 RT 业务, 在一个周期内有两次发送机会:

在 T_{d1} 内来自发送队列的下一个要服务的数据包从到达队列头部时刻到 T_{d2} 开始时刻的时间为 $T_{d1} - T_s - j\sigma$, 其中 j 为退避数。而在 T_d 内来自发送队列的下一个要服务的数据包从到达队列头部时刻到一个周期结束时刻的时间为 $T_d - T_{d1} - T_s - j\sigma$ 。

若是在 T_{d1} 内休眠导致的时延, 则(a)情况下 RT 业务休眠时延的母函数为

$$T_1'(Z) = \sum_{j=0}^{W_1-1} P_0 \{BC=j | SUC\} Z^{(T_{d1}-T_s-j\sigma)} \quad (18)$$

若是在 T_{d2} 内休眠导致的时延, (a)情况下休眠时延母函数为

$$T_2'(Z) = \sum_{j=0}^{W_1-1} P_0' \{BC=j | SUC\} Z^{(T_d-T_{d1}-T_s-j\sigma)} \quad (19)$$

假设下一个需要服务的数据包出现在 T_{d1} 和 T_{d2} 的概率相同, 则 RT 业务(a)情况下休眠时延的母函数为

$$T_{0,1}(Z) = (T_1'(Z) + T_2'(Z))/2 \quad (20)$$

对于 RT 业务, 若在 T_{d1} 内产生一个数据包, 则休眠造成时延的母函数为

$$T_1''(Z) = \sum_{j=1}^{T_{d1}/\sigma} (T_{d1}/\sigma)^{-1} Z^j \quad (21)$$

若在 T_{d2} 内产生一个数据包, 则休眠造成时延的母函数为

$$T_2''(Z) = \sum_{j=1}^{(T_d-T_{d1})/\sigma} ((T_d-T_{d1})/\sigma)^{-1} Z^j \quad (22)$$

则 RT 业务(b)情况下休眠时延的母函数为

$$T_{0,2}(Z) = (T_{d1}/T_d)T_1''(Z) + (T_{d2}/T_d)T_2''(Z) \quad (23)$$

因此, RT 业务由休眠造成的传输时延的母函数为

$$T_0(Z) = (1-P_0)T_{0,1}(Z) + P_0T_{0,2}(Z) \quad (24)$$

由定义可知, 计数器一步退避过程中以 $(1-P_i)$ 的概率递减计数器, 因此一步退避过程时延的母函数为

$$Ss_i(Z) = (1-P_i)Z^\sigma \quad (25)$$

对于 BE 业务, 由于竞争信道失败造成的时延的母函数为

$$C_{1,c}(Z) = (1 - \sum_{i=1}^{W_1-1} (1-P_1)^i) Z^{T_d}/W_1 \quad (26)$$

对于 RT 业务, 在 T_{d1} 周期竞争信道失败造成的时延的母函数为

$$C_{0,c}'(Z) = (1 - \sum_{i=1}^{W_0-1} (1-P_0)^i) Z^{T_{d1}}/W_0 \quad (27)$$

在 T_{d2} 周期竞争信道失败造成时延的母函数为

$$C_{0,c}''(Z) = (1 - \sum_{i=1}^{W_0-1} (1-P_0')^i) Z^{T_d-T_{d1}}/W_0 \quad (28)$$

为方便计算, 设 RT 业务竞争信道失败的平均时延为

$$C_{0,c}(Z) = (1 - \sum_{i=1}^{W_0-1} (1-P_0'')^i) Z^{T_d/2}/W_0 \quad (29)$$

式中, $P_0'' = (P_0 + P_0')/2$ 。

从开始退避到最终成功发送的总信号流程图如图 5 所示。

其中对于一次成功的发送, 其退避过程时延母函数为

$$G_i(Z) = \left(\sum_{j=0}^{W_i-1} Ss_j^i(Z) \right) / W_i \quad (30)$$

成功发送所需时间 T_i 的母函数为

$$S_i(Z) = Z^{T_i} \quad (31)$$

接入时延的母函数可以表示为

$$P_{i,T}(Z) = T_i(Z) (1 - P_{i,c}) S_i(Z) \sum_{j=0}^k C_{i,c}(Z) G_i(Z), \quad k \in (0, \infty) \quad (32)$$

将式(32)展开, 可得 MAC 接入时延 T 的概率分布:

$$P_{i,T}(Z) = \sum_{k=0}^{\infty} P(T=K) Z^k \quad (33)$$

由母函数的性质可得其均值为

$$E_i[T] = P'_{i,T}(1) = \bar{t}_i \quad (34)$$

式中, \bar{t}_i 为 MAC 层平均服务时间。

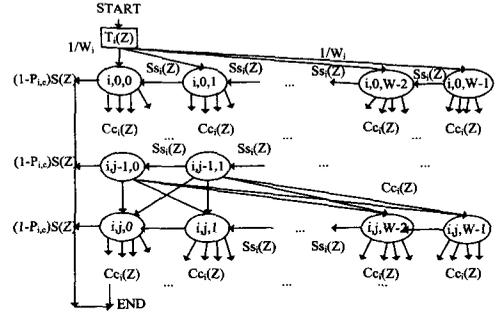


图 5 MAC 接入过程信号流程图

3.3 M/G/1/K 排队模型分析

假设第 i 类数据包服从到达率为 λ_i 的泊松过程, 则在协议中数据缓存队列可以看作 M/G/1/K 排队模型^[7]。

用 $X(t)$ 表示 t 时刻队列系统的状态, t_n 为第 n 个数据包完成服务离开队列系统的时刻。 X_n 表示 t_n 时刻之前排队系统所处的状态。 π_n 表示在数据包离开时刻队列系统中有 n 个数据包的稳态概率。 设信道忙时排队队长为 k 。

令 $P_{i,j}$ 表示状态 i 到 j 的一步转移概率

$$p_{i,j} = p \{ X_{n+1} = j | X_n = i \} \quad (35)$$

为了求 $P_{i,j}$, 我们定义

$$k_n = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_i} (\lambda_i)^n}{n!} p \{ T = i \} \quad (36)$$

式中, k_n 表示在服务时间内有 n 个数据包到达队列的概率。 由于数据包服从到达率为 λ_i 的泊松过程, 因此可以得到

$$P = \{ p_{i,j} \} = \begin{bmatrix} k_0 & k_1 & k_2 & \cdots & k_{K-2} & 1 - \sum_{n=0}^{K-2} k_n \\ k_0 & k_1 & k_2 & \cdots & k_{K-2} & 1 - \sum_{n=0}^{K-2} k_n \\ 0 & k_0 & k_1 & \cdots & k_{K-3} & 1 - \sum_{n=0}^{K-3} k_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & k_0 & 1 - k_0 \end{bmatrix} \quad (37)$$

根据平衡公式

$$\pi P = \pi \quad (38)$$

式中, $\pi = \{ \pi_n \}$, 可以计算出 π 。

基于 M/G/1/K 排队模型, 可以计算队列空的概率 $P_{i,0}$ 和队列满的概率 $P_{i,k}$:

$$p_{i,0} = \frac{\pi_0}{\pi_0 + \rho_i}, p_{i,k} = 1 - \frac{1}{\pi_0 + \rho_i} \quad (39)$$

式中, $\rho_i = \lambda_i t_i$ 。 令 MAC 时延为 ωt_i (数据帧从进入 MAC 到出 MAC 的平均时间), 可以得到

$$\omega t_i = (1/\lambda_i) \left[\sum_{n=0}^{k-1} n \cdot \pi_n + k(\pi_0 + \rho_i - 1) \right] \quad (40)$$

3.4 吞吐量分析

根据 Little 公式^[8], 吞吐量可以表示为

$$S_i = \frac{E_i[N]E[P]}{E_i[T]} \quad (41)$$

式中, $E[P]$ 为一个成功传输的平均负载, $E_i[N]$ 为竞争节点的平均值, 且

$$E_i[N] = n_i(1 - P_{i,0}) \quad (42)$$

式中, 假设 $n_0 = n_1 = 0.5 * n$ (n_0 为发送 RT 业务的节点的数量, n_1 为发送 BE 业务的节点的数量, n 为网络中的节点总数)。

3.5 能量消耗分析

网络行为可用一个周期内网络内各种事件发生的概率来表示。网络事件包括成功发送事件、冲突事件和空闲事件。成功发送事件是指网络中只有一个节点占用了信道, 并成功发送数据; 冲突事件是指网络中同时不止一个节点占用了信道; 空闲事件是指网络中所有节点都没有数据包传输。定义 P_{id} , P_{s} 和 P_{col-m} 分别为空闲事件周期、一个成功传输事件的周期以及由 m 个节点造成的碰撞事件的周期发生概率。这里采用文献^[9]的方法来计算能量的消耗。根据吞吐量的定义, S_i 还可以表示为

$$S_i = \frac{P_{i,s}E[P]}{T_{i,d}} \quad (43)$$

为方便计算, 对于 RT 业务假设其 $T_{0,cl} = T_{cl}/2$ 。根据式(24)和式(26), 可以计算出 $P_{i,st}$ 。而 $P_{i,st}$ 和 $P_{i,col-m}$ 可以由 P_{id} , $P_{i,0}$ 和 P_i 表示。可以通过解下面的方程来获得 P_{id} 和 P_{col-m} 的值, 对于 BE,

$$P_{i,s} = (1 - P_{id}) \frac{(1 - P_{i,0})P_{i,t}(1 - P_t)^{n-1}}{1 - (1 - P_t)^n} \quad (44)$$

$$P_{col-m} = (1 - P_{id}) \binom{n}{m} \frac{[(1 - P_{i,0})P_{i,t}]^m [(1 - P_t)^{n-m}]}{1 - (1 - P_t)^n} \quad (45)$$

式中, $1 - [1 - P_t]^n$ 是在一个时隙中至少有一个网络中的节点发送的概率。

对于 RT 业务, $P_i'' = (P_i' + P_i)/2$

$$P_{0,s} = (1 - P_{id}) \frac{(1 - P_{0,0})P_{i,t}(1 - P_t'')^{n-1}}{1 - (1 - P_t'')^n} \quad (46)$$

$$P_{0,col-m} = (1 - P_{id}) \binom{n}{m} \frac{[(1 - P_{0,0})P_{i,t}]^m [(1 - P_t'')^{n-m}]}{1 - (1 - P_t'')^n} \quad (47)$$

一个周期内网络平均能量消耗可以用求得的各个周期发生的概率来计算。我们将能量消耗分为 4 个部分: ϵ_{lis} , ϵ_d , ϵ_r , ϵ_{rec} , 分别为节点的侦听、休眠、传输和接收时消耗的能量, 可以表示为:

$$\epsilon_{lis} = P_{id} \cdot E_{lis} \cdot N + P_{i,s} \cdot E_{lis} \cdot N + N \cdot \sum_{m=2}^n P_{i,col-m} \cdot E_{lis} \quad (48)$$

$$\epsilon_d = P_{id} \cdot E_d \cdot N + P_{i,s} \cdot E_d \cdot N + N \cdot \sum_{m=2}^n P_{i,col-m} \cdot E_d \quad (49)$$

$$\epsilon_r = P_{id} \cdot E_r \cdot N + P_{i,s} \cdot E_r \cdot N + N \cdot \sum_{m=2}^n P_{i,col-m} \cdot E_r \quad (50)$$

$$\epsilon_{rec} = P_{id} \cdot E_{rec} \cdot N + P_{i,s} \cdot E_{rec} \cdot N + N \cdot \sum_{m=2}^n P_{i,col-m} \cdot E_{rec} \quad (51)$$

其中, E_{lis} , E_d , E_r , E_{rec} 分别表示在一个周期内节点在侦听、发送和接收所消耗的平均能量, N 为观察时间内周期的个数, 则总的能量消耗可以表示为

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_{lis} + \epsilon_d + \epsilon_r + \epsilon_{rec} \quad (52)$$

4 模型仿真实验

为验证上述分析的正确性, 本节将采用数学分析的方法对 DQ-MAC 协议进行性能分析。本文所采用的参数如表 1 所列。假设 MAC 层发送的数据分组大小恒定, 且有 $n_0 = n_1 = 0.5 * n$ (n_0 为发送 RT 分组的节点的数量, n_1 为发送 BF 分组的节点的数量, n 为网络中的节点总数)。

表 1 参数设置

参数	值
信道速率	1Mbps
数据包长度	100 Bytes
控制包长度	30Bytes
CW ₀	32
CW ₁	64
空闲功率	14.4mW
休眠功率	15μW
发送功率	36 mW
接收功率	36 mW
T _{cl}	1.512s
T _{cl1}	0.1506s
T _{cl2}	0.1201s

图 6、图 7 和图 8 给出了 BE 业务和 RT 业务平均时延、吞吐量和能量消耗的数值比较。

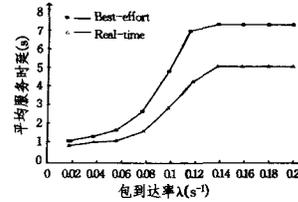


图 6 平均时延

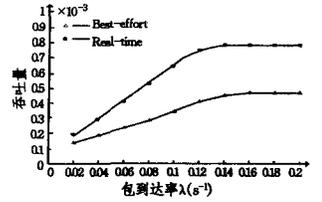


图 7 吞吐量

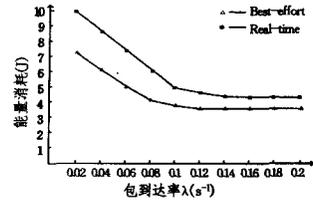


图 8 能量消耗

由于采用增加额外侦听时间的机制, RT 业务比 BE 业务有更多发送数据的机会。图 6 是两类数据业务平均时延分析的对比。从图中可以观察到, 在达到饱和前 BE 业务和 RT 业务的平均时延都随着包到达率的增加而增加, 但是 RT 业务平均时延的增长比较缓慢。

图 7 显示 BE 业务和 RT 业务在达到饱和状态前吞吐量都随着包到达率的增加而增加, 但 RT 业务的吞吐量大于 BE 业务吞吐量。可见在 DQ-MAC 中, 一个周期内 RT 业务的传输机会是 BE 业务的两倍, 因此为 RT 业务提供了更好的 QoS 保障。图 8 显示, 在非饱和状态下 RT 业务比 BE 业务消耗更多的能量; 而在饱和状态下, 它们之间的差距在缩小。这是因为在非饱和状态下, 节点在空闲周期消耗较多能量。在空闲

(下转第 75 页)

- Name Resolution Architectures for on-Demand MANETs [C]// Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW'03). Providence, USA, 2003; 736-742
- [4] Engelstad P E, Zheng Y. Evaluation of Service Discovery Architectures for Mobile Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 2nd annual conference on Wireless On-demand Networks and Services (WONS'OS). St. Moritz, Switzerland, 2005; 2-15
- [5] Varshavsky A, Reid B, Lara E D. The Need for Cross-layer Service Discovery[P]. MANETs. Technical Report CSRG-492. Department of Computer Science, University of Toronto, 2004
- [6] Ververidis C N, Polyzos G C. Routing Layer Support for Service Discovery in Mobile Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications-Pervasive Wireless Networking Workshop (PerCom'OS). Kauai Island, Hawaii, USA, 2005; 258-262
- [7] Ververidis C N, Polyzos G C. Extended ZRP: Performance Evaluation of a Routing Layer based Service Discovery Protocol for Mobile Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 2nd Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services (MobiQuitous'OS). San Diego, California, USA, 2005; 114-123
- [8] Azondekon V, Barbeau M, Liscano R. Service Selection in Networks based on Proximity Confirmation using Infrared [C]// Proceedings of the International Conference on Telecommunications (ICT'02). Beijing, China, 2002; 116-120
- [9] Meier R, Cahill V, Nedos A, et al. Proximity-based Service Discovery in Mobile Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 5th IFIP WG 6.1 International Conference on Distributed Applications and Interoperable Systems (DAIS'OS). Lecture Notes in Computer Science. v 3543, Athens, Greece, 2005; 115-129
- [10] Sen R, Handorean R, Roman G C, et al. Knowledge-driven Interactions with Services across Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 2nd international conference on Service oriented computing (ICSOC'04). New York, USA, 2004; 222-231
- [11] Lenders V, May M, Plattner B. Service Discovery in Mobile Ad Hoc Networks; a Field Theoretic Approach [J]. Elsevier Journal on Pervasive and Mobile Computing, 2005, 1(3); 343-370
- [12] Bashir S, Li B C. KELOP: Distributed Key-Value Lookup in Wireless Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN'03). Dallas, Texas, USA, 2003; 471-476
- [13] Chakraborty D, Joshi A, Yesha Y, et al. GSD: a Novel Group-based Service Discovery Protocol for MANETs [C]// Proceedings of the 4th IEEE Conference on Mobile and Wireless Communications Networks (MWCN'02). Stockholm, Sweden, 2002; 140-144
- [14] Klein M, Ries B K, Obreiter P. Service rings: a Semantic Overlay for Service Discovery in Ad Hoc Networks [C]// Proceedings of the 14th International Workshop on Database and Expert Systems Applications (DEXA'03). Prague, Czech, 2003; 180-185
- [15] Klein M, Ries B K. Multi-layer Clusters in Ad-Hoc Networks-an Approach to Service Discovery [C]// Proceedings of the 1st International Workshop on Peer-to-Peer Computing (IWP2PC'02). Pisa, Italy, 2002; 187-201
- [16] Simple Object Access Protocol (SOAP) [EB/OL]. <http://www.w3.org/TR/soap>
- [17] Kwong Yuen Lai, Thi Khoi Anh Phan, Zahir Tari. Efficient SOAP Binding for Mobile Web Services [C]// the IEEE Conference on Local Computer Networks 30th Anniversary (LCN'05); 987-1004
- [18] Harold C, Martin G. SOAP-Over-UDP[R]. Technique Specifications of Web service, Sep. 2004
- [19] Ulam S. Adventures of a Mathematician[M]. Scibner, 1976
- [20] Auletta V, Negro A. Solution of Ulam's Problem on Binary Search with Four Lies[J]. Combin. Theory, Ser. A, 1993(54); 1-19
- [21] Bluetooth [EB/OL]. <http://franson.com/bluetooth>
- [22] 吴芸. 基于语义的 Web 服务发现研究[D]. 西安: 西北大学计算机学院, 2006

(上接第 34 页)

周期里, 节点在侦听时间内侦听信道, 这样就造成了空闲侦听浪费。而 RT 业务比 BE 业务有更多的侦听时间, 因此比 BE 业务造成了更多的空闲侦听浪费。在成功发送的周期或者碰撞周期内, 节点在侦听到其他节点的 RT 时进入休眠, 从而避免了更多空闲侦听。

结束语 本文针对无线传感器网络不能提供数据业务优先级区分的问题, 提出了一种基于无线传感器网络 S-MAC 协议的改进机制 DQ-MAC。让高优先级数据有更多的侦听时间, 从而有更多发送数据的机会, 以达到减少高优先级数据的传输时延的目的, 从而确保高优先级数据业务的传输性能。相关分析结果表明, 此机制能够使高优先级数据业务拥有更高的吞吐量, 并且降低了高优先级业务的端到端平均时延。

我们下一步的工作将继续深入探讨在无线传感器网络中如何引入区分服务模型, 以及如何提高实时多媒体业务在无线网络中的传输性能。

参 考 文 献

- [1] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium Access Control with Coordinated Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2004, 12(3); 493-506
- [2] Dam T V, Langendoen K. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]// Proc. of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Los Angeles, CA, USA, Nov. 2003; 171-180
- [3] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks [C]// Proc. of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore, MD, USA, Nov. 2004; 95-107
- [4] Hoon K, Sung-Gi M. Priority-based QoS MAC protocol for wireless sensor networks [C]// Proc. of the 2009 IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing. Rome, Italy, May 2009; 1-8
- [5] Zhang Ye, He Chen, Jiang Lingge. Modeling the S-MAC Protocol in Single-Hop Wireless Sensor Networks [C]// Proc. of IEEE ICC08. Beijing, China, 2008; 317-321
- [6] Bianchi G. Performance analysis of the IEEE802.11 distributed coordination function [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(3); 535-547
- [7] Zhai H, Kwon Y, Fang Y. Performance analysis of IEEE802.11 MAC protocols in wireless Lans [J]. Journal of Wireless Communications and Mobile Computing, 2004, 4(8); 917-931
- [8] Bianchi G, Tinnirello I. Remark on IEEE 802.11 DCF Performance Analysis [J]. IEEE Communications Letters, 2005, 9(8); 765-767
- [9] Sung S, Kang H, Kim E. Energy Consumption Analysis of S-MAC Protocol in Single-Hop Wireless Sensor Networks [C]// Proc. of IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). Busan, Korea, 2006; 1-5