

无线传感器网络自适应占空比媒体访问控制协议

郑更生, 亢治虎*, 高强

武汉工程大学计算机科学与工程学院, 湖北 武汉 430205

摘要: 为了减少无线传感器网络能量耗损, 通过分析排队论单服务台排队系统模型, 结合已有的低占空比无线传感器网络节点媒体访问控制协议和层次网络的结构特点, 提出了一种改进的自适应调节占空比无线传感器网络节点媒体访问控制协议. 该协议通过节点的队列模型预测下一周期的数据量, 从而能够自适应的调整其占空比, 降低网络节点的能量消耗. 在网络仿真平台上对改进后协议的性能进行了评估. 仿真结果表明, 在保持网络性能的前提下, 改进后协议比无线传感器网络节点媒体访问控制协议的能耗减少 48%, 延迟减少 21%, 吞吐量增加 33%, 显著地延长了整个无线传感器网络的寿命.

关键词: 无线传感器网络; 节点媒体访问控制协议; 单服务台排队系统模型; 休眠调度

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.09.015

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, 以下简称: WSN)^[1]是由大量廉价微型传感器节点以无线通讯方式自主形成的一个多跳自组织网络系统, 具有数据采集、预处理、无线通信和自动组网的能力. 由于无线传感器网络具有监测精度高、覆盖区域大、适应能力强等优点, 通常被用于完成复杂环境下的远程监测任务. 无线传感器节点携带的能量有限, 所以一个好的节能无线传感器网络的媒体访问控制协议(Medium Access Control Protocol, 以下简称: MAC 协议)能够尽量延长网络的生存时间^[2].

无线传感器网络存在数据传输量小、节点协同完成共同的任务、节点能量有限及网络能容忍一定程度的通讯延迟等特点, 因此传感器节点的无线通信模块所处状态可大致划分为发送、接收、空闲(侦听)和睡眠 4 种, 并且节点大部分时间都处于空闲状态. 图 1 为传感器节点的能耗图^[3], 由图 1 可以看出, 传感器节点在空闲状态与接收状态所消耗的能量相当, 如果能够适当减少无线传感器网络中每个节点的空闲时间, 就可以延长整个无线传感器网络的生存周期. 正是基于这种思想, 低占空比无线传感器网络应运而生. 目前, 国际上和国内针对低占空比环境下的无线传感器网络协议通讯算法已有不少研究^[1,4-5], 并涌现出大

量的成果. 笔者在无线传感器网络节点媒体访问控制(Sensor-MAC, 以下简称: S-MAC)^[6]协议基础上提出了一种基于单服务台排队系统模型(M/M/1/n 队列模型)的无线传感器网络自适应调节占空比 MAC 协议(ADC-SAMC 协议), 它可以使节点根据负载变化自适应地调节占空比, 改变节点发送率, 从而有效地减少能量消耗, 提高网络的吞吐量, 延长网络寿命.

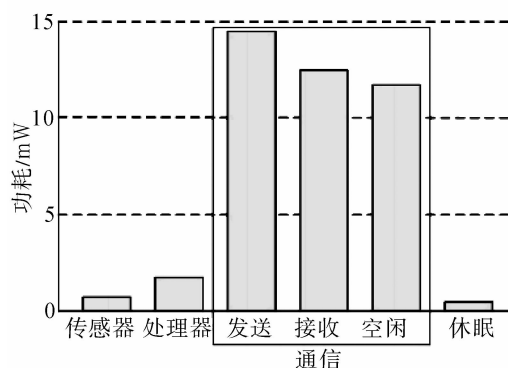


图 1 传感器节点能耗情况

Fig. 1 Energy consumption of sensor nodes

1 ADC-SMAC 协议建模

1.1 M/M/1/n 队列模型

排队论^[7-8]又称随机服务系统理论, 是研究拥挤现象的一门数学学科, 它通过研究各种服务系统在排队等待中的概率特性, 来指导服务系统的最

收稿日期: 2014-06-30

基金项目: 湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队资助计划项目(T201206)

作者简介: 郑更生(1971-), 男, 湖南邵东人, 副教授, 博士. 研究方向: 计算机网络、嵌入式系统. * 通信联系人

优设计和最优经营策略. 日常生活中存在大量有形和无形的排队或拥挤现象,如旅客购票排队、市内电话占线等现象. $M/M/1/n^{[9]}$ 是排队论最基本的模型,其中两个 M 分别代表呼叫相继到达间隔时间为负指数分布和服务时间服从 Markov 性负指数分布,1 代表只有一个并联服务器, n 表示队列长度. 即 $M/M/1/n$ 服务系统满足条件:系统只有一个服务台,每次只能处理一个数据,系统容量为 n ,数据按照参数为 λ 的 Poisson 流到达.

1.2 ADC-SMAC 节点队列模型

通过对网络中节点的思考,笔者对所有的链路层队列模型都采用了如图 2 所示的基本概念和结构.

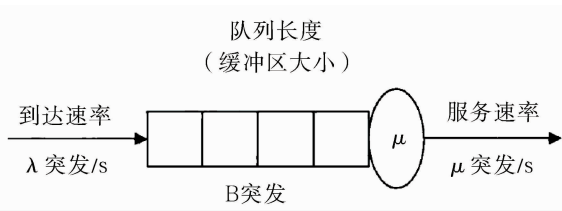


图 2 一个网络节点的 $M/M/1$ 队列模型

Fig. 2 An $M/M/1/n$ queue model of sensor nodes

该模型中,数据包以突发速率为 λ 的泊松过程到达节点, B 表示节点的缓冲区,长度为 N ,系统以 μ 的服务率从缓冲区中按照数据到达的先后顺序移出数据. 于是可以得到如图 3 所示的整个系统的转换状态图.

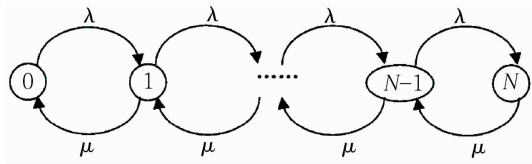


图 3 系统状态图

Fig. 3 The system state diagram

不妨假设系统处于状态 n 的概率为 P_n , $\rho = \lambda/\mu \leq 1$, 则系统的常微分方程为:

$$\begin{cases} P'_0(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P'_n(t) = -(\lambda + \mu)P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t) + \mu P_{n+1}(t) \quad n=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (1)$$

通过计算可以得到系统的稳态解, 即当 $t \rightarrow \infty$, $P_n(t)$ 时有:

$$P_n = \rho^n (1 - \rho), \quad n=1,2,3,\dots, \quad (2)$$

则平衡状态下系统的队长为:

$$N_n = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n (1 - \rho) = \frac{\rho}{1 - \rho}. \quad (3)$$

需要指出的是 N_n 在系统中的真正含义是系统的处理模块和缓冲模块中的所有数据的平均数量, 可以看出节点是一个典型的 $M/M/1/n$ 排队系统.

1.3 ADC-SMAC 休眠调度依据

由排队论知识可知, 该系统在稳态下, 系统中

队列在缓冲区等待的平均数 N_q 为:

$$N_q = \frac{\rho^2}{1 - \rho}. \quad (4)$$

将 T_s 与 μ 的关系 $T_s = 1/\mu$ 带入 $\rho = \lambda/\mu$ 有:

$$\rho = \lambda T_s. \quad (5)$$

由式(4)、式(5)和服务时间 T_s 可得:

$$T_s = \frac{\sqrt{N_q + \frac{N_q^2}{4}} - \frac{N_q}{2}}{\lambda}. \quad (6)$$

将 T_s 与 μ 的关系 $T_s = 1/\mu$ 带入式(4)并简化可得:

$$\mu = \lambda \sqrt{\frac{1}{N_q} + \frac{1}{4}} + \frac{1}{2}, \quad (7)$$

即当到达率 λ 一定时, μ 的值与 N_q 成反比.

依据式(7)来调整系统服务率 μ 以实现节点占空比的调整. 由于节点在第 i 帧的服务率 μ_i 与其每个同步周期开始时队列中已有的数据包个数 n_i 有关, 若 n_i 的大小与缓存器的长度 N 越接近, 就应立即增大 μ_i , 使队列中的数据包能够更快的发送出去, 故将式(7)中 μ 乘上一个惩罚系数 k , 得到下列关系式:

$$\mu_i = \mu_{i-1} \cdot k_i. \quad (8)$$

设式(7)中惩罚系数 k_i 为:

$$k_i = \frac{N}{(N - n_i)} \quad n_i \neq 0. \quad (9)$$

1.4 ADC-SMAC 算法描述

虽然 S-MAC 协议改进了 IEEE 802.11 的能耗问题, 但是它本身存在许多缺陷. 如全网统一设置固定占空比使得在网络流量负载较小时, 会导致空闲监听能耗的增加; 在流量负载较大时, 会导致节点排队时延的增加. 为解决 S-MAC 协议能耗和延迟方面的缺陷, ADC-SMAC 协议在 S-MAC 协议的基础上通过周期性的广播 SYNC 同步包来更新节点的休眠调度表. SYNC 帧中包含发送者的地址及下次休眠时间表. 发送 SYNC 同步包的时间间隔称为一个同步周期. S-MAC 协议同步周期大小可以根据无线传感器网络的实际情况而定, 如果网络数据流量比较少或是比较稳定, 同步周期可以长一点, 通常间隔几个侦听周期后进行一次同步. 通过同步包调整下次休眠时间, 网络中节点发送 SYNC 同步包即可更新与调整占空比.

当网络达到稳定后, 节点在同步周期根据其缓冲区队列现有的数据量来调整下一个周期的占空比. 在可调整范围内, 若预测的占空比较上一帧小, 则节点下一个周期的占空比在上一帧占空比的基础上增大 k_a 倍, 以保证在下一帧中系统能很快的将数据发送出去, 从而减少数据延迟, 缓解网络的过载和增大网络吞吐量; 若预测的占空比较

上一帧大,则节点下一个周期的占空比在上一帧占空比的基础上减小 k_a 倍,以保证下一帧中系统有较长的休眠时间,从而减少能量消耗,延长节点寿命.占空比具体算法如下:

给定节点占空比的初始值 $[duty_cycle]_{init}$,该初始值也为节点允许的最小占空比,即

$$[duty_cycle]_{min} = [duty_cycle]_{init}.$$

若 $[duty_cycle]_i > [duty_cycle]_{min}$ 且 $[duty_cycle]_i < [duty_cycle]_{i-1}$, 则 $[duty_cycle]_i = [duty_cycle]_{i-1} * (1 - k_a)$, 其中 $k_a = k_i / \lambda_i$.

若 $[duty_cycle]_i < [duty_cycle]_{max}$ 且 $[duty_cycle]_i > [duty_cycle]_{i-1}$, 则 $[duty_cycle]_i = [duty_cycle]_{i-1} * (1 + k_a)$.

若 $[duty_cycle]_i < [duty_cycle]_{min}$, 则 $[duty_cycle]_i = [duty_cycle]_{min}$.

若 $[duty_cycle]_i > [duty_cycle]_{max}$, 则 $[duty_cycle]_i = [duty_cycle]_{max}$, 其中, $[duty_cycle]_{max}$ 为节点最大占空比.

2 仿真实验与结果分析

笔者使用 NS2 仿真器分别对 S-MAC 协议、网络信道接入自适应占空比协议(ADC 协议)^[10]和 ADC-SMAC 协议进行仿真实验.节点随机分布于 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的仿真区域内并采用节点到 sink 节点的距离信息对网络进行分层,网络节点只能向低层邻接点发送数据,仿真实验分别从能量消耗、平均时延和吞吐量 3 个方面来比较和衡量无线传感器网络性能.为了模拟不同负载下网络性能,随机选取网络中某节点以每隔 1 s, 2 s, 3 s, 4 s, 5 s, 6 s, 7 s, 8 s, 9 s, 10 s 的时间间隔向 sink 节点发送数据包.

2.1 主要实验参数

主要实验参数如表 1 所示.

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	参数值
仿真场景大小	200 m × 200 m
初始能量/J	1 000
发送能耗/mW	14.75
接受能耗/mW	12.50
空闲监听能耗/mW	11.50
休眠能耗/ μ W	15
数据包大小/Byte	100
控制包大小/Byte	10
带宽/kbps	20
初始化占空比/%	10
最大占空比/%	90

2.2 实验结果分析

图 4、图 5 和图 6 分别反映网状拓扑结构下网络在 S-MAC 协议、ADC 协议和 ADC-SMAC 协议下的能量消耗、平均延时和网络吞吐量.从图 4、图 5、图 6 中可以看出,与 S-MAC 协议相比,ADC-SMAC 协议表现出很好的能耗状况、平均延时状况和吞吐量状况.

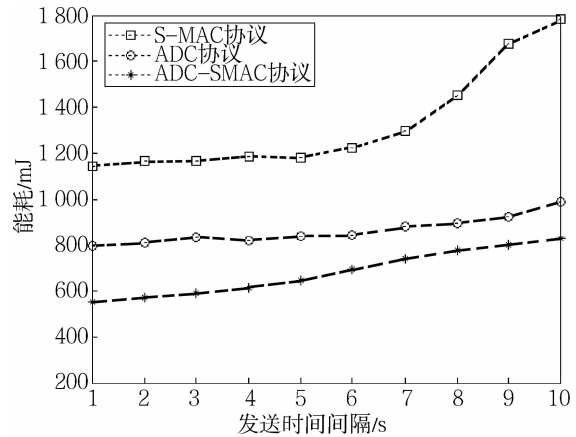


图 4 不同负载下的能量消耗比较情况

Fig. 4 Energy consumption under different load

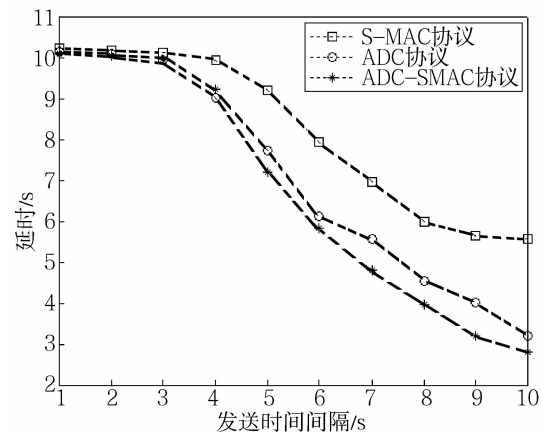


图 5 不同负载下的延时比较情况

Fig. 5 Latency under different load

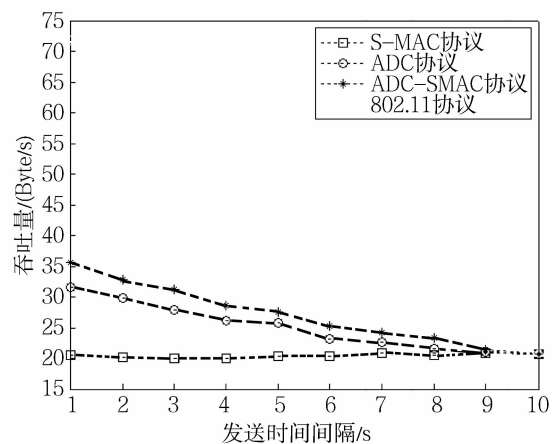


图 6 不同负载下的吞吐量比较情况

Fig. 6 Throughput under different load

由图4可以看出,当数据发送时间间隔小于5 s时,网络负载较重,网络流量较大,此时的能量节约主要表现在串音避免和有效的长消息传递;当数据发送时间间隔为10 s时,此时网络负载较小,ADC-SMAC协议动态的调节节点的占空比,节点占空比增大,使节点处于休眠状态的时间变长,减少了通讯时间和次数,因此表现的更加节省能量.仿真结果显示,ADC-SMAC协议的平均能耗比S-MAC协议减少了48%,从图4中可以看出,虽然ADC协议能够在一定程度上减少能量消耗,但由于其是对节点过去7个周期内的数据流量进行加权统计来预测节点下一个周期的数据流量,进而调整节点占空比,这就导致其对节点流量变化不够灵敏而产生能量消耗. ADC-SMAC协议的能耗比ADC协议的要低,平均能耗为其79%,这说明ADC-SMAC采取的占空比调节机制更加的合理.

由图5可以看出,ADC-SMAC协议比ADC协议的延迟低,为其95%,ADC-SMAC协议的平均延迟比S-MAC协议减少了21%.由图6可以看出,ADC-SMAC协议的平均吞吐量比ADC协议的略高9%,ADC-SMAC协议的平均吞吐量比S-MAC协议提高了33%. ADC-SMAC协议比S-MAC协议具有更小的延时和更高的吞吐量,这是由于ADC-SMAC协议使用的休眠调度方案通过使在繁忙路径上的节点具有更频繁的激活以给其他节点更多的接入机会,让数据能够更快的转发.由于减轻了数据在转发节点的堆积,降低了冲突的概率,减少了因冲突重发带来的能耗和延时,因此在相同条件下ADC-SMAC协议的网络平均延时更短、网络吞吐量更大.

3 结 语

无线传感器网络技术的飞速发展使得其可以被应用于不同的环境和背景下,而有效的MAC协议设计是确保网络节点生存的基础.笔者在S-MAC协议所提出的固定占空比的基础上融入了M/M/1/n队列思想,提出了一种改进的自适应占空比MAC协议并对其核心思想进行阐述与仿真实验.结果显示在不同的网络负载中ADC-SMAC协议与ADC协议和S-MAC协议相比,能有效的调节节点的占空比,减少能量消耗,并根据队列模型预测节点下一周期的数据量,从而调整其占空比,减少碰撞和阻塞发生的概率,协议在减少网络延同时,能有效的提高网络的吞吐量.

致 谢

湖北省教育厅为本研究提供了资金资助,在

此致以衷心的感谢!

参考文献:

- [1] 毕玉婷,陈昕.低占空比无线传感器网络能量感知路由算法[J].北京信息科技大学学报,2012,27(6):93-98.
BI Yu-ting, CHEN Xin. Energy-aware routing algorithm for low duty cycle wireless sensor networks [J]. Journal of Beijing Information Science and Technology University, 2012, 27(6): 93-98. (In Chinese)
- [2] DEMIRKOL I, ERSOY C, ALAGOZ F, et al. MAC protocols for wireless sensor networks; a survey[J]. IEEE Communications Magazine, 2006, 44(4): 115-121.
- [3] YAN Yu-bo, YANG Pan-long, Zhang Lei, et al. Achieving lower delay with energy efficiency in extremely low-duty-cycle and unreliable WSN[C]// Proceedings-16th International Conference on Parallel and Distributed Systems(ICPADS). United States: IEEE Computer Society, 2013: 857-862.
- [4] 王俊美.低占空比无线传感器网络邻居发现算法研究[J].数字通讯,2013,40(2):36-39.
WANG Jun-mei. Neighbor discovery in wireless sensor networks with low duty cycle[J] Digital Communication, 2013, 40(2): 36-39. (In Chinese)
- [5] CHEOE JUNSEONG, KHANH HA, NGUYEN PHAN, et al. Fast and reliable data forwarding in low-duty-cycle wireless sensor networks[C]//Computational Science and Its Applications-12th International Conference(ICC-SA). Germany: Springer Verlag, 2012: 324-338.
- [6] KIM J, LIN X J, SHROFF N B, et al. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with any cast[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(2): 515-528.
- [7] 任敏丽.排队论在银行服务系统中的若干应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
REN Min-li. Some application researches in bank's service system of queuing theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (In Chinese)
- [8] 贾小娇,方红雨,李晓辉.基于OPNET的M/M/m队列仿真[J].通讯技术,2008,41(12):183-185.
JIA Xiao-jiao, FANG Hong-yu, LI Xiao-hui. Simulation of M/M/m sequence based on OPNET[J]. Communications Technology, 2008, 41(12): 183-185. (In Chinese)
- [9] 林小兰.一种基于自适应占空比的无线传感器网络MAC协议研究[D].厦门:厦门大学,2008.
LIN Xiao-lan. A study of MAC protocol in wireless sensor network with adaptive duty cycle[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. (In Chinese)

- [10] 赵洪钢, 史浩山, 邢云冰. 一种无线传感器网络信道接入自适应占空比算法[J]. 传感技术学报, 2007, 20(21): 393-397.
ZHAO Hong-gang, SHI Hao-shan, XING Yun-bing. Adaptive duty-cycle algorithm for channel access in wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(21): 393-397. (In Chinese)

M/M/1/n-based media access control protocol in wireless sensor network with adaptive duty cycle

ZHENG Geng-sheng, KANG Zhi-hu, GAO Qiang

School of Computer Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To reduce energy consumption, a media access control protocol in wireless sensor network with adaptive duty cycle was proposed based on the single-server queuing system. The protocol used the node's queue model to predict the number of data of next period and then adjusted the nodes' duty cycle to reduce energy consumption. The simulation results show that the protocol saves energy about 48%, reduces latency 21% and increases throughput 33% than the basic media access control protocol under the premise of keeping the network performance, which means the protocol effectively prolongs the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; sensor media access control protocol; single-server queuing system; sleep scheduling

本文编辑: 苗 变