

基于自适应更新的无线传感网络 MAC 协议

刘明珠, 许士涛*, 陈 光

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 哈尔滨 150080)

(* 通信作者电子邮箱 xiaotao777@126.com)

摘 要:针对无线传感器网络节点能量受限问题,提出了一种新的自适应更新异步 MAC 协议——AU-MAC 协议。该协议以睡眠与工作模式切换、异步方式和自适应更新相结合的办法有效延长了网络寿命,减少了节点能耗。AU-MAC 协议通过采用发方监听、接方激活数据传输,提高了信道利用的有效性。并且,它以建立邻居节点信息表,引入自适应更新机制,来减少空闲监听。在 NS2 网络仿真平台对提出的 AU-MAC 协议的性能进行了仿真评估。仿真结果表明, AU-MAC 协议在保持相当的吞吐量以及端一端延迟的基础上,使无线传感器网络的能量有效性得到了改善。

关键词:无线传感网络;媒体访问控制;异步;自适应更新

中图分类号: TP212.9; TN915.04 **文献标志码:** A

MAC protocol based on adaptive update in wireless sensor networks

LIU Ming-zhu, XU Shi-tao*, CHEN Guang

(School of Measurement-Control Technology and Communication Engineering,
Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: In order to solve the energy limitation problem on wireless sensor network nodes, this paper proposed a new adaptive update asynchronous MAC protocol — AU-MAC protocol. This protocol combined the sleep-work state switching mode, asynchronous mode with adaptive update to effectively extend the network life. AU-MAC protocol improved channel usage efficiency by making use of sender monitoring and receiver activating data transfer. And, it established a neighbor node information table and introduced adaptive updating mechanism, to reduce the free monitor. The functions of AU-MAC protocol had been estimated on NS2 network simulation platform. It shows that, AU-MAC protocol improves the energy efficiency at the basis of maintaining the same throughput and end-end transit delay.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Media Access Control (MAC); asynchronous; adaptive update

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是一个通过共享无线介质而构成的多跳自组织网络^[1]。它以部署在监测区域内大量的传感器节点来感知、采集和处理网络覆盖区域内被感知对象的信息,并发送给观察者。在实际应用中,由于传感器节点常布置在相对偏远、环境恶劣的地区或不便布设有线网络的地方,不易更换电池,因此如何有效降低能耗,延长网络的寿命成为无线传感网络一个重要的研究方向。无线传感器网络的媒体访问控制(Media Access Control, MAC)协议^[2]决定着如何在节点之间分配有限的无线通信资源,对无线传感器网络的性能有着非常大的影响。近些年,来人们以降低能耗和一些具体的应用需求提出不同的 MAC 协议。但到目前为止,无线传感器网络 MAC 协议还没有一个统一的分类方式。相对来说普遍采用的是以信道分配方式来对 MAC 协议进行分类,可分为基于调度的 MAC 协议、基于竞争的 MAC 协议、混合 MAC 协议。

调度协议通常以时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)为主,也可采用频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)或码分多址(Code Division Multiple

Access, CDMA)的信道访问方式^[3]。调度协议基本思想是:采用某种调度算法将时槽/频率/正交码分配给节点,这样就有效地避免了冲突。但设计信道的重用以及有效的调度方案是一个难题,并且调度协议通常需要严格的时钟同步,这样就增加了控制开销。

竞争协议主要采用载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)^[4-5]方式,其基本思想是当节点需要发送数据时,通过竞争来使用无线信道。由于通常无线传感器网络的数据传输流量较少,且是一个自组织的网络,这使得基于竞争的 MAC 协议具有一定的优势。因为这时发生碰撞的概率很小,而且也不需要事先给节点分配信道,使它具有良好的扩展性和适应性。但空闲监听是采用基于竞争的 MAC 协议节点的主要能量消耗因素。S-MAC(Sensor-MAC)^[6]是 Ye 等在 2002 年提出的基于竞争类的最具代表性的协议。

混合 MAC 协议结合了前两者的特点,以 Z-MAC^[7]协议为代表。但它的协议复杂,难于实现,对节点硬件的处理能力要求高。

本文主要研究基于 CSMA 竞争机制的 MAC 协议。所以,本文要解决的就是空闲监听对无线传感器节点能量消耗的问题。普遍的做法是让传感器节点无线收发机在工作与睡眠两种状态之间进行周期性的切换,主要是在不影响通信的前提

收稿日期:2012-06-08;修回日期:2012-08-01。 基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12521087)。

作者简介:刘明珠(1973-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要研究方向:多载波通信、无线传感器网络; 许士涛(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向:无线传感器网络 MAC 协议; 陈光(1986-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向:Android 操作系统。

下,尽可能地使节点处于睡眠状态,减少能耗。

1 MAC 协议异步唤醒机制

在竞争的 MAC 协议中,如果从 MAC 协议对时钟的要求来说,也可将 MAC 协议大致区分为同步唤醒的 MAC 和异步唤醒的 MAC 协议。同步 MAC 协议中,S-MAC 和 T-MAC^[8]是具有代表性的,它们通过精确的时序关系控制节点的睡眠调度,因此对时钟同步的要求较高。异步 MAC 协议中,B-MAC^[9]、X-MAC^[10]和 Wise-MAC^[11]协议是比较有代表性的。它们更多地利用了竞争协议对无线信道的“抢占”原则,睡眠调度更具主动性,同时减少对时钟同步精度的依赖。异步唤醒机制中,每个节点可选择自己的唤醒时刻,且每个周期只需很短的时间对信道进行监听。但异步唤醒机制中,发送节点要发送前导来激活目的节点,这无疑占用了部分信道资源,信道的利用效率大幅下降。

为了消除异步 MAC 协议中的信道被前导占用的缺陷,Sun 等^[12]提出了一种新的异步 MAC 协议——RI-MAC (Receiver Initiated MAC)。它以发方空闲侦听与收方发送信标帧的方式替代了长时间发送前导的方式,释放了大量被占用的信道时间。但 RI-MAC 中发送节点要长时间地监听来等待目的节点,直到收到接收节点信标帧。当网络负载增加,而节点的睡眠时间很长的情况下,由空闲侦听造成了大量无谓的能量消耗。

文献[13]中提出了 PA-MAC (Passive-Asynchronous MAC) 协议,它基于 RI-MAC 协议创建邻居信息表。邻居信息表中记录了邻居节点的 ID、下次唤醒的时间。这样就避免了发送节点在发送数据前要长时间监听所要浪费的能量。但 PA-MAC 协议却有很明显的不足,即节点的信息表更新不够及时,且更新后的信息有效期至多为两个周期,在这之后节点又要以 RI-MAC 的方式完成通信。对于 RI-MAC 性能改进不大,没有充分地利用建立的邻居节点信息表来提高 RI-MAC 协议的性能。

本文在 PA-MAC 协议的基础上,提出了 AU-MAC (Adaptive Update MAC) 协议用以优化节点能量利用效率。AU-MAC 中的数据帧传输也是由接收方发起的,并建立、维护邻居节点信息表。同时,AU-MAC 中引入了自适应更新的算法,来解决 PA-MAC 中虽然建立了邻居节点信息表,但对 RI-MAC 协议性能改善不大的问题。本文在 NS-2 网络仿真平台上对 AU-MAC 协议的性能进行了仿真评估,并与 PA-MAC 协议进行了性能对比。结果表明,与 PA-MAC 相比,AU-MAC 在保持相当的吞吐量以及端到端延迟的基础上,进一步提高了能量有效性。

2 AU-MAC 协议原理

2.1 AU-MAC 协议的执行过程

2.1.1 信标帧结构与邻居信息表

首先,传感器节点在开启后,在第一个原始周期 T_{duty} 内进行一个周期的连续监听,并在这第一个周期内随机选择一个时刻,发送自己的信标帧。信标帧的结构如图 1。其中,Src 字段为源节点地址;Dst 字段为目的节点地址;BW 字段为信标帧规定的退避窗口;Nxt 字段为源节点发送信标帧第一个比特的时刻开始到该节点下一次醒来时的时间间隔;Ni 为源

节点的剩余能量。

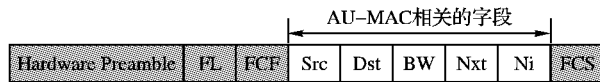


图 1 AU-MAC 帧结构

如图 2 所示,在节点发送信标帧之前,先要检测无线信道是否被占用,如果已被占用,则要避免发送一个信标帧持续的时间,在避让之后再检测信道;如果无线信道空闲,则等待一个信标帧持续的时间后再检测信道,如果信道仍然空闲,则立即发送信标帧。节点将以成功发送信标帧的时刻作为自己的调度时间,并以这个调度周期独立地运行。而且该节点会在第一个周期内收到自己的通信范围内所有其他节点的信标帧,形成了自己的邻居信息表。

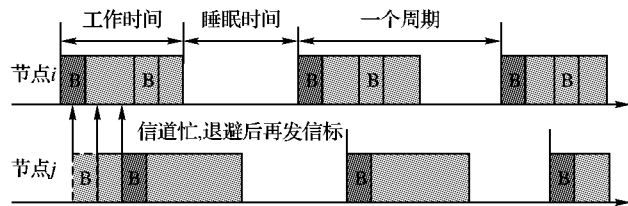


图 2 节点调度周期退避工作原理

2.1.2 提前休眠

在节点形成了各自的调度周期后,当节点到自己发送信标帧时,信道如处于繁忙状态,节点连续尝试发送信标均未成功的时间大于一个数据帧时,则该节点进入休眠,下一个周期再尝试发送信标。同样,节点醒来监听目的节点,如检测到信道繁忙,则它仍要继续监听大于一个数据帧持续的时间,如仍未等到目的节点信标帧,此节点将进入休眠。

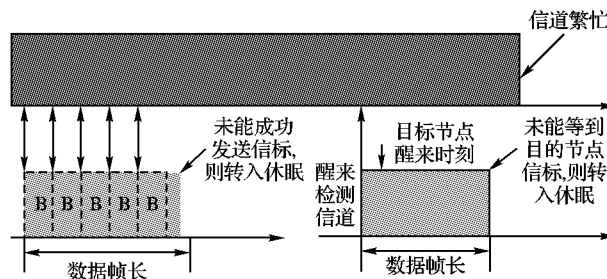


图 3 节点提前休眠原理

2.1.3 监听时间

在节点按照自己的调度周期独立地运行中,当发送信标帧之后,节点还需要监听一段时间 T_j , 来等待是否有节点要向它发送数据。 T_j 可表示为:

$$T_j = 2T_{\max-tr} + T_{sifs}$$

其中: $T_{\max-tr}$ 为节点最大传输范围之内的最大传输延迟; T_{sifs} 为发送一个信标帧持续的时间。

2.1.4 发送信标帧的节点下次唤醒时间的确定

当节点在发送信标帧之前,它首先计算自己的下次唤醒时间 Nxt 。这个唤醒时间为 T_{hx} :

$$T_{hx} = T_{duty} + T_{now} + T_{sifs} * \text{Random}(-2, 0, 2)$$

其中: T_{duty} 是常数,是一个原始周期持续的时间; T_{now} 表示当前时刻。式中取随机数,是为了避免出现两个同时醒来的相邻节点所发送的信标帧重复冲突的情况。

2.1.5 收到信标帧的节点对源节点下次唤醒时间的确定

由于时钟漂移以及传输延迟,所以收到信标的节点在记录源节点的下次唤醒时间时,要根据 Nxt 的值来估算,这个估算的值为:

$$T'_{hx} = (1 - 2\theta)T_{hx} - 2T_{sifs} + T_y$$

式中: θ 为每个节点的最大时钟偏差, T_y 为传输延时。其中, 由于最大时钟偏差远远大于传输延时 T_y , 所以 T'_{hx} 可简化为:

$$T'_{hx} = (1 - 2\theta)T_{hx} - 2T_{sifs}$$

这里使 T'_{hx} 小于 T_{hx} 两倍的 θ 值, 是考虑到节点要想向目标节点发送数据必须在目标节点醒来之前醒来进入监听状态。在节点不需要发送数据且时间到达后, 节点自动将这个时间加一个原始周期 T_{duty} 。

2.2 自适应更新的原理

2.2.1 AU-MAC 协议信息表更新

当发送节点醒来时它首先检测信道, 然后等待目标节点醒来时刻, 如未收到其信标帧, 且信道为不忙状态, 则说明这个时间已经失效, 那么发送节点就要进行至少一个周期的监听来更新自己的邻居节点信息表, 这种个别节点独自进行的

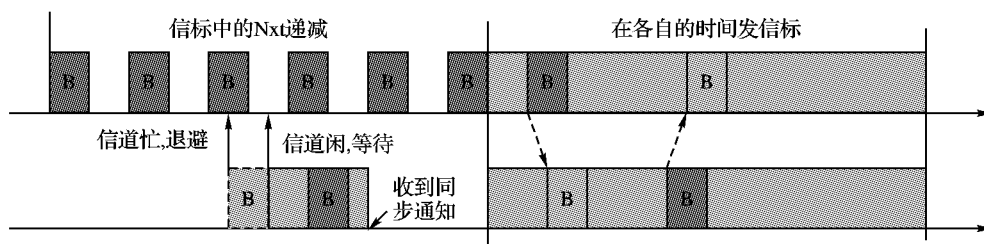


图4 统一更新的原理

2.2.2 自适应发起更新时间的确定

首先在每个节点中加入一个计数器, 用来记录节点自上次统一更新之后运行周期的个数。当网络负载比较小时, 各个节点可以发送出去自己的信标帧, 信息表可得到及时的更新。在这种情况下进行统一更新, 主要是为了减少时钟漂移对网络的影响以及解决新节点加入的问题。可选取较长的时间来更新, 这样就规定能量剩余最高节点在连续运行 $T' = nT_{duty}$ ($n = 1, 2, \dots$) 时间之后, 要在信道空闲时发起统一更新。其中, T_{duty} 为原始周期, n 要由网路的数据量大小和网络的具体环境而确定。当网络负载比较大时, 信道长时间被占用, 各个节点无法发出自己的信标, 不能自主地动态更新, 致使信息表中的数据失去准确性。这样就规定能量剩余最高节点在连续 $T'/2$ 时间没能发出信标帧之后, 要在信道相对空闲时发起统一更新。至此, 就实现了根据信道的使用情况来自适应地进行信息表的更新。

3 仿真与性能评估

由于 AU-MAC 协议采用自适应更新方法, 改进了 PA-MAC 协议中邻居节点信息表更新的方式。所以, 主要针对在能耗及时延性能上对 AU-MAC 协议与 PA-MAC 协议的优劣作对比。

平台采用了 NS2 网络仿真软件, 仿真参数如表 1。在 NS-2 仿真器中我们对 WSN 网络模型进行了设定: 采用理想的无线信道 (WirelessChannel); 无线传播模型为两径无线物理信道模型 (TwoRayGround)。此模型既考虑到了直接传播路径也考虑到了地面的反射路径; 天线为全向天线 (OmniAntenna); 节点采用静止节点。

仿真的网络拓扑结构如图 5 所示, 这里是一个包括 9 个节点的二维网络, 其中, 每个节点表示为 J_i ($i = 1, 2, \dots, 9$)。所有节点的调度周期是随机产生的, 并在网络运行期间进行维护。为了减少其他因素的干扰, 人为地规定了路由。以相

信息更新行为, 称为自主的动态更新。

因为这种节点自主的动态更新行为是对信息表的信息失效后的补救措施, 这是要尽量避免的。因此应适时地更新信息表的信息, 这时指定能量剩余最多节点在信道空闲时, 在一个周期内间隔的发送信标帧。信标帧中的 Dst 中记为 -1, 意思是这个帧是发给所有节点的并且下一个周期要进行信息表更新; Nxt 中记录的则是这一个周期的剩余时间。这样就可以保证这一个周期之内的任何时间处于工作状态的所有节点都知道下一个周期要进行统一更新, 并且在下一周期开始时保持一个周期的监听, 只在各自的工作时间发送自己的信标, 这样所有的节点的邻居信息表都进行了更新。如果有新的节点要加入网络, 它的信标帧就会被通信范围内所有节点收到, 并记录在它们各自的邻居信息表中, 同时, 新节点也建立了周围节点的信息表。

同的数据吞吐量和使用环境, 分别对 RI-MAC 协议、PA-MAC 协议和 AU-MAC 协议进行测试。从第 50 秒开始产生一个固定码率 (Constants Bit Rate, CBR) 业务: 从 J_1 开始, 经 J_2, J_5 到达 J_9 。从第 150 秒再产生一个 CBR 业务: 从 J_6 开始, 经 J_7, J_8, J_5, J_4 到达 J_3 。网络持续运行 600 s。

表 1 仿真参数

仿真参数	值
节点通信距离	250 m
节点拓扑间距	200 m
MAC 帧头长度	10 Byte
分组长度 (PackerSize)	50 Byte
节点初始能量 (InitialEnergy)	1000 J
空闲监听功耗 (IdlePower)	0.3445 W
发送功耗 (TxPower)	0.386 W
接收功耗 (RxPower)	0.368 W
休眠功耗 (SleepPower)	50 μ W

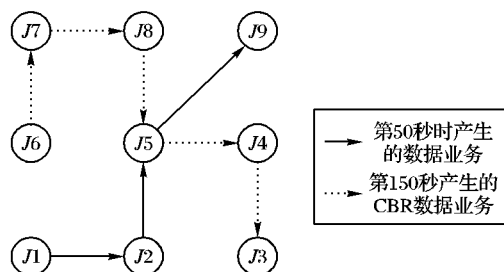


图5 网络拓扑图

首先, 以原始周期 $T_{duty} = 5$ s 进行测试, 结果如图 6 所示为在网络运行的不同时刻 9 个节点的能量消耗的平均值。

从图 6 可以看出, 在网络运行的初期, 在产生 CBR 数据前 AU-MAC 相对于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议消耗的能量要略高一些。这是由于 AU-MAC 协议节点进行信息表更新所产生的能量开销。但是当第 50 秒后由于有 CBR 数据产生, AU-MAC 协议能量消耗的速度要低于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议。

并且在第 150 秒时随着另一个 CBR 数据的产生, AU-MAC 的能量消耗的速度相对稳定,而 RI-MAC 和 PA-MAC 协议能量消耗的速度相对较快。这正是由于 AU-MAC 协议自适应地对节点的信息表进行了更新,而不像 PA-MAC 和 RI-MAC 协议那样,要频繁地进行监听来更新信息表,增加了能量的消耗。

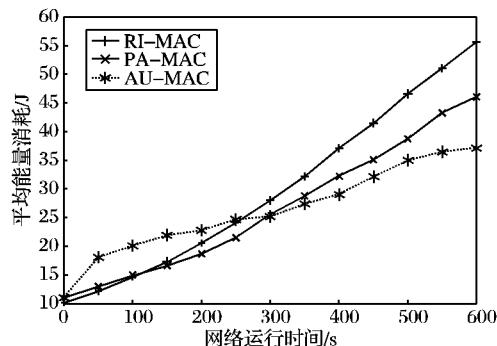


图6 能量消耗的平均值

图7为9个节点在网络运行结束后的延时平均值。从图7可以看出,各个节点的平均延时,AU-MAC 协议要略低于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议,尤其是在数据相对比较集中的 J5 节点。这是因为 AU-MAC 协议对节点的信息表进行统一更新与动态更新,使各节点间的通信更加协调,避免了 PA-MAC 协议频繁的更新与 RI-MAC 协议长时间监听所带来的时间延误。另外,如图3所示,AU-MAC 在信道繁忙时,仍要进行一个数据帧长度的尝试,来使得节点尽可能快地实现通信。这些措施保证了 AU-MAC 协议在延时特性上要优于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议。但 AU-MAC 的统一更新与动态更新仍需占用一些时间,这使得 AU-MAC 在延时特性上不能有很大的提升。

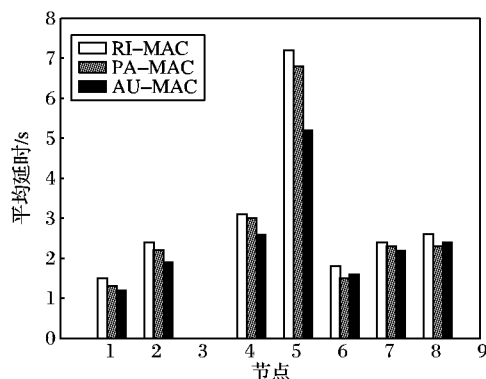
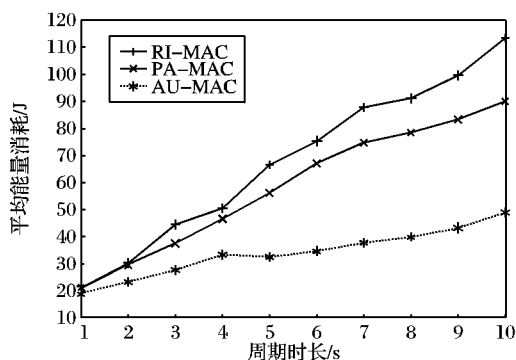


图7 延时的平均值

接下来,再分别用原始周期 T_{duty} 为 1 s, 2 s, ..., 10 s 进行测试。如图8为在 T_{duty} 为不同值条件下,网络运行结束后9个节点的能量消耗的平均值。从中可以看出,在不同的周期时长时,PA-MAC 和 RI-MAC 协议随着周期时长的增加,能量消耗越来越多。这是由于随着周期 T_{duty} 的增加,节点用来等待目标节点醒来的监听时间更长。但 AU-MAC 协议随周期时长的增加并没有像 PA-MAC 和 RI-MAC 协议那样变化迅速,而是相对平缓。这是因为 AU-MAC 协议是在每间隔 n 个周期才通过一个周期的监听来更新信息表,更新的频率要低于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议;并且随着周期 T_{duty} 的增加,在一段相同的时间内,节点监听时间也不变。可见周期时长的增加对 AU-MAC 协议的影响不大,体现出 AU-MAC 协议具有良好的适应性。但 AU-MAC 协议能耗随周期时长的增加也有所增加,这是由于 AU-MAC 协议中包含自主更新的部分。从总体上看 AU-MAC 协议要优于 PA-MAC 和 RI-MAC 协议,能量消

耗相对较低,且随网络环境的变化表现出较稳定的性能。

图8 不同 T_{duty} 条件下能量消耗的平均值

4 结语

本文在 PA-MAC 协议的基础上,提出了 AU-MAC 协议。AU-MAC 协议通过引入自适应更新的方式减少了发送节点因错过目标节点而需要长时间监听所带来的能耗,充分利用了邻居节点信息表。仿真结果表明,在保持网络性能的前提下,AU-MAC 能够减少节点空闲监听的时间,进而减少节点的能耗,延时特性有所改善。后续的工作是,尝试在 TinyOS^[14] 操作系统上实现 AU-MAC 协议,用于实际的网络测试,为进一步提高无线传感器网络 MAC 协议的性能提供帮助。

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 3-88.
- [2] 蹇强,龚正虎,朱培栋,等. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展[J]. 软件学报, 2008, 19(2): 389-403.
- [3] 蹇强,桂春梅,龚正虎,等. 一种无线传感器网络空间重用 TDMA 链路调度算法[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(6): 79-82.
- [4] 樊高雁. 基于竞争的无线传感器网络 MAC 协议研究与改进[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [5] 刘善平,林亚平,周四望. 一种低能耗时延的无线传感器网络 MAC 协议[J]. 计算机应用, 2006, 26(2): 287-291.
- [6] 杨武,史浩山,杨俊刚,等. 无线传感器网络中 S-MAC 协议的改进与仿真[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(7): 47-52.
- [7] 刘一哲,袁睿翕. 一种混合无线传感器网络 MAC 协议[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(27): 86-90.
- [8] 周丽敏,田斌,廖婷. 无线传感器网络 T-MAC 协议的研究[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(6): 36-38.
- [9] POLASTRE J, HILL J, CULLER D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 2nd ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2004: 95-107.
- [10] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, et al. X-MAC: A short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Sensor Systems, New York: ACM, 2006: 307-320.
- [11] EL-HOIYDI A, DECOTIGNIE J D. WiseMAC: An ultra low power MAC protocol for the downlink of infrastructure wireless sensor networks[J]. Mobile Networks and Applications, 2004, 10(5): 244-251.
- [12] SUN Y J, CUREWITZ O, JOHNSON D B. RI-MAC: A receiver initiated asynchronous duty cycle MAC protocol for dynamic traffic loads in wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2008: 5-7.
- [13] 唐震州,施晓秋,金可仲. PA-MAC: 一种被动的异步低占空比无线传感网络 MAC 协议[J]. 传感技术学报, 2011, 24(3): 423-428.
- [14] 程龙,杨波. 无线传感器网络操作系统 TinyOS 的移植[J]. 计算机科学, 2011, 38(10): 323-325.