

# 基于调度的无线传感器网络 MAC 协议研究

申鹏飞, 章 韵

(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**文章分析了当前无线传感器网络中基于调度的 MAC 层协议的特点, 针对新的应用领域中对数据实时性和全局性要求较高的特点, 提出了一种新的基于 TDMA 的 MAC 层协议, 通过充分利用空闲时隙, 允许有较高数据传输需求的节点使用其他节点的空闲时隙传输数据, 使得在满足实时性要求的同时能够反映监测区域的全局特征。通过在 CC2430 硬件平台上对该协议进行测试, 实验数据表明该 MAC 层协议不仅可以降低数据的时延, 而且也能够反映数据的全局性特点。

**关键词:**无线传感器网络; MAC 层协议; TinyOS

**中图分类号:**TP393

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2013)01-0119-04

**doi:**10.3969/j.issn.1673-2013.01.030

## Research of Scheduling Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

SHEN Peng-fei, ZHANG Yun

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** It analyzes the characteristics of current scheduling based MAC layer protocol in wireless sensor networks (WSN), and proposes a new TDMA based MAC layer protocol with good performance of real-time and overall situation for new application field. By making full use of time slots, the protocol allows the node with higher demands for transmission to use the idle slots to transmit the data, this can reflect the overall situation while satisfy the real-time requirements. Subsequently, implement and test the protocol on CC2430 hardware platform. Finally, the experimental results indicate that the new TDMA based MAC protocol can not only reduces the delay of data, but also reflects the overall situation of data.

**Key words:** wireless sensor networks; MAC layer protocol; TinyOS

## 0 引言

无线传感器网络<sup>[1]</sup> (Wireless Sensor Networks, WSN) 中的 MAC 协议决定了如何在传感器节点之间分配有限的无线信道资源, 是影响无线传感器网络效率的重要方面。当前, 无线传感器网络的 MAC 协议可分为以下三种:

- 1) 基于竞争方式的 MAC 协议: 节点采用 CSMA 等机制, 主动抢占无线信道。
- 2) 基于调度方式的 MAC 协议: 将信道资源预先按照时隙、频率或者编码的方式分为若干互不干扰的子信道, 节点按照所分配的子信道进行数据传输。
- 3) 基于混合方式的 MAC 协议: 根据当前网络数

据流量的特点, 自动选择采用基于调度的或者基于竞争方式的 MAC 协议。

在传感器网络的数据短期变化较小的应用领域中, 传感器节点的数据传输量一般较低, 采用基于竞争方式的 MAC 协议可以有效的利用信道, 降低能量消耗, 延长网络的生存周期。而在传感器网络新的应用领域如游戏互动、医疗病人监控、行为检测等, 对数据的实时性要求较高, 网络中的数据传输量也较大, 基于竞争方式的 MAC 协议已经不能满足其要求, 而混合型的 MAC 协议更适合网络数据流量有较大波动的网络。基于调度方式的 MAC 协议不仅可以避免数据传输的冲突, 减少节点之间相互干扰造成的能量损耗, 而且在传输过程中不需要过多的控制信息, 节省了开销, 更适合对数据实时性要求较高的应用领域。文中主要研究采用 TDMA 的信道调度方式的 MAC 协议。

## 1 基于 TDMA 的 MAC 协议研究

传统的基于 TDMA 的 MAC 层协议, 节点在所分配

**收稿日期:**2012-05-14; **修回日期:**2012-08-21

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(60905040); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK2011756)

**作者简介:**申鹏飞(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机应用技术、物联网; 章 韵, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机在通信中的应用、计算机网络等。

的固定时隙内发送数据,从而可以无冲突的传输数据,也避免了因信道竞争造成的数据时延。但传统的 TDMA 协议中节点由于只能在固定的时隙传输数据,这样会造成数据传输延时,在实时性要求较高的应用领域,数据延时过高则会失去其有效性;另外,当节点在所分配的时隙内无数据传输时,便会造成时隙的浪费,降低了信道的利用率。

EMACS<sup>[2]</sup>把时间分成若干帧,每帧再分配成若干时隙,这样便降低了数据的时延,提高了信道利用率。EMACS 的每个时隙又分为通信请求 (Communication Request, CR)、流量控制 (Traffic Control, TC) 和数据部分 (Data),在 TC 部分,时隙的拥有者会广播其调度表信息,这样会增加调度消耗;另外,EMACS 并未考虑当同时有若干个节点有数据要传输时,应当怎样作出裁决,使得数据信息不能够合理高效的传输。

文献[3]综合传统 TDMA 和 EMACS 的特点,提出了一种移动节点容忍的 MAC 协议,该协议首先把时间分配成若干帧,每帧再分成若干时隙,其中一部分时隙分配给簇内节点,剩余时隙保留给需要接入该簇的移动节点。每个节点的时隙再分成三部分:通信请求 (Communication Request, CR)、信道分配 (Channel Allocation, CA)、数据部分 (Data Section, DS)。在 CR 部分,时隙的拥有者收集周围节点的信息,若该节点无数据要传输则计算周围节点的优先级,在 CA 部分把下个时隙分配给优先级较高的节点,在 DS 部分用于传输数据。该协议不仅提高了数据的实时性,而且也大大提高了信道的利用率。

文献[3]所提出的协议虽然提高了数据的实时性,增加了时隙分配的灵活性,但当在相当长的时间中,如果簇内局部节点都具有较高的优先级时,便会在相当长的时间里占据时隙并传输数据,从而造成其他节点的数据无法及时的发送。进而,收集到的数据仅能反映簇内局部节点的情况,而不能够及时全面的反映监测现场的真实情况。在应用领域如游戏互动、行为检测中,虽然局部节点数据的变化较大且需要实时的收集,但同时仍需要及时的收集数据变化较小的节点信息;如果不能及时的收集到簇内各个节点数据的变化情况,便不能够准确地捕获监测现场的变化,所收集的数据便失去了全局性特点,从而可能造成错误裁决。综合以上几种典型的基于 TDMA 的 MAC 协议特点,文中提出一种新的充分利用空闲时隙的 TDMA 协议 FISTDMA (Full use of Idle Time Slot TDMA) 协议。

## 2 基于 FISTDMA 的 MAC 协议

基本假设和前提:

1) 整个网络已经按照特定的算法形成了簇,簇头

是明确的。

2) 与其他节点相比,簇头拥有相对较多的能量。

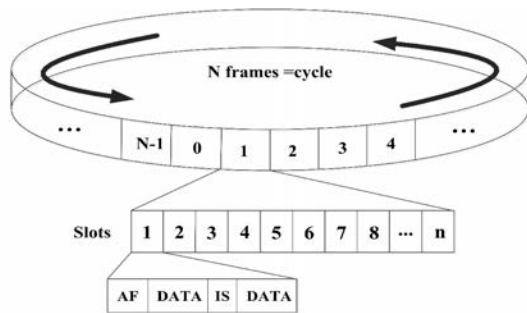
3) 除了簇头节点外,其他节点都是相同的普通节点。

### 2.1 FISTDMA 描述

在 FISTDMA 协议中,在一个时间周期内,把时间分成  $N$  帧,并把每一帧分成若干个时隙。在每一帧开始,簇头节点收集簇内节点的信息,簇内节点根据数据传输特点计算各自的优先级  $PI$ ,并向簇头通报其  $PI$  信息,簇头根据各个节点的  $PI$  作出裁决,并根据  $PI$  的大小由高到低的把  $n$  个时隙分配给  $n$  个节点。

每个时隙又分为接入标志 (AF)、空闲询问 (IS) 和数据 (DATA) 三部分。在接入标志部分,簇头对拥有时隙的节点进行确认;在空闲询问部分,若拥有时隙的节点无数据传输,则簇头允许  $PI$  值较高且有数据传输的节点传输数据, $PI$  值较高的节点会在每个时隙的 IS 部分向簇头进行传输询问,直到利用空闲时隙传输数据完毕。

如图 1,在每个时隙中,时隙前部分为接入标志部分,中间部分为空闲询问部分,若节点取得 DATA 部分的使用权,节点便可以在该部分传输数据。通过充分利用空闲的时隙,以及按照  $PI$  的时隙分配机制,不但提高了信道利用率,也确保了数据传输的实时性,进而能够监控到现场的全局数据变化特点,得到监测场景比较全面的情况反映。



AF: 接入标志位 (Access Flag); IS: 空闲询问 (Idle Consulting)。

图 1 FISTDMA 的帧结构

### 2.2 优先级 $PI$

为了使无线传感器网络能够满足在新的应用领域中实时性的要求,在设计 MAC 层协议时,应当最大限度的降低数据的时延,因而节点数据传输的优先级  $PI$  (Priority Index) 应当与节点的数据变化程度成正比,设  $\Delta D$  为节点的相信数据差值平均值。则:

$$PI \propto \Delta D \quad (1)$$

由于节点的能量决定着传感器网络的生存周期,因此, $PI$  与节点能量  $BP$  有关。如果节点的能量  $BP$  低于能量阈值  $BP_{th}$  时,则节点便不具备足够的能量发送数据,因而当节点能量不小于阈值时, $PI$  应当与节点

能量成反比;反之,则 PI 与节点能量成正比。即:

$$PI \propto \frac{1}{BP_c}, \quad \text{若 } BP_c \geq BP_{th};$$
$$PI \propto BP_c, \quad \text{若 } BP_c < BP_{th};$$

(2)

$$B = \text{Sgn}(BP_c - BP_{th})$$

(3)

综合以上所述的情况,得出节点优先级 PI 与数据变化程度和节点能量之间的关系如下:

$$PI = B + \Delta D$$

(4)

### 3 FISTDMA 协议的实现

#### 3.1 CC2430 硬件平台与 TinyOS

FISTDMA 协议的实现采用 CC2430 硬件平台,CC2430 是 Chipcon 公司最新推出的符合 2.4G IEEE 802.15.4 标准的射频芯片系统。它结合了 Chipcon 公司全球先进的 ZigBee 协议栈设计<sup>[4]</sup>,其 RF 收发器最高可支持 250kbps 的数据率,具有极高的灵敏度和抗干扰性<sup>[5,6]</sup>。

TinyOS<sup>[7]</sup>是加州大学伯克利分校专为无线传感器网络开发的开源代码操作系统。TinyOS 采用 nesC 编程语言进行编写,整体框架采用模块化设计,并且采用了事件驱动模型,能够较好地适应传感器节点存储资源较少的特点,而且也可以在很小的空间中处理高并发事件<sup>[8~10]</sup>。

#### 3.2 FISTDMA 实现

##### 3.2.1 场景设置

为了实现 FISTDMA 协议,使用五个 CC2430 传感器节点,其中一个作为簇头节点,与 PC 机相连,其余四个节点作为簇内普通节点,普通节点把数据传输到簇头节点,簇头节点通过串口通信把信息传输到 PC 机上,通过串口调试软件可以清楚的观察到协议的运行情况。

簇内的四个节点随机分布于 40m<sup>2</sup> 的室内环境。设置 FISTDMA 协议的一个时间周期为 2s,每个时隙为 900μs,为了在提高数据实时性的同时能够确保数据的全局性特点,设置 IS 部分为时隙的 3/4 部分。

##### 3.2.2 同步

时间同步是 WSN 的重要支撑技术,也是 TDMA 的基础。目前 WSN 中常用的时间同步算法有 RBS 算法<sup>[11]</sup>、TPSN 算法<sup>[12]</sup>、FTSP 算法等<sup>[13]</sup>。

由于 FTSP 算法采用单向广播机制、时间戳机制和线性回归补偿时间漂移的方法,能够达到较高的时间同步精度,而且减少了同步数据的传输,因此采用 FTSP 算法来进行时间同步。由簇头节点向簇内节点广播发送时间同步包,簇内节点根据本节点的时间和同步包的时间戳计算时间漂移参数,由此校正本地时间达到时间同步。

##### 3.2.3 FISTDMA 的具体实现步骤

●在时间同步完成后,簇头节点工作流程如下:

(1)簇头节点收集簇内各节点的 PI 值,簇内节点通过计算得出各自的 PI 值并把 PI 传输给簇头节点。

(2)簇头节点收到簇内各节点的 PI 值后,通过对比 PI 值,按照 PI 值的大小分配时隙给簇内的节点,并根据 PI 值裁决允许非占有时隙内数据传输的节点。

(3)簇头节点把时隙分配信息和数据传输信息发送给簇内节点。

(4)簇头根据所分配的时隙接收信息,如图 2 所示。

(5)一帧结束,簇头节点重新收集簇内节点 PI 信息,重新分配时隙,从(1)开始执行。

●簇内各节点的工作流程如下:

(1)计算节点的 PI 值,把 PI 值发送给簇头节点。

(2)接收时隙分配信息,进入休眠,等待所分配的时隙。

(3)当进入所分配的时隙后,传输数据,在 IS 部分后的时隙无数据传输时,通知簇头节点,允许其他节点传输数据。

(4)当节点所分配的时隙使用完后,进入休眠,在下一帧开始时重新计算 PI,从(1)开始执行,若节点被允许非分配时隙传输数据,则在其他时隙的 IS 部分询问簇头节点,当有空闲时隙时,传输数据。

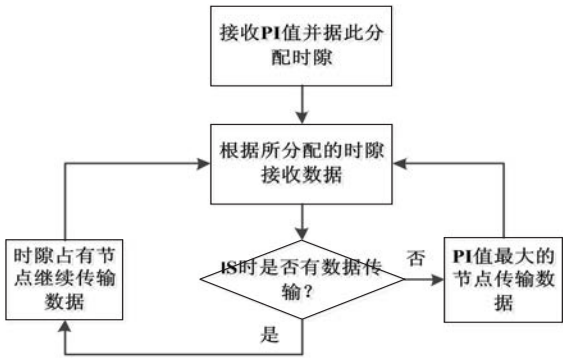


图 2 簇头节点工作流程

##### 3.2.4 硬件平台的实现

使用定时器 1 进行时间同步和时间周期的定时,使用 MAC 定时器 2 进行时隙和帧长的定时。协议的实现主要用到程序启动模块 MainC,时间戳模块 tdTransC, FTSP 时间同步模块 TimeSyncC,无线收发模块 SimpleMacDmaC,串口通信模块 StdOutC,模块 Timer1C,模块 HplCC2430Timer2C 等,tdC.nc 作为整个协议实现的顶层配制模块,主要负责把协议用到的各个模块连结在一起,具体如下:

```
implementation {
    components MainC, tdmaP, LedsC;
    tdmaP.Boot=>MainC;
```



```
tdmaP. Leds->LedsC;
components StdOutC;
tdmaP. StdOut->StdOutC;
components TimeSyncC;
TimeSyncC. Boot->MainC;
tdmaP. GlobalTime->TimeSyncC;
MainC. SoftwareInit->TimeSyncC;
components HplCC2430Timer2C;
tdmaP. timer2->HplCC2430Timer2C;
}
```

各个模块之间的调用关系如图 3 所示。

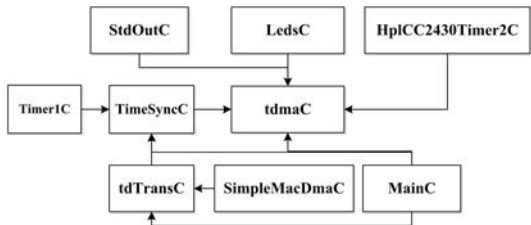


图 3 模块之间调用关系

将协议代码下载至实验平台,平台能够很好的运行。

## 4 实验分析

在簇内各个节点不同的数据产生速率的情况下,通过实验平台测试各个节点数据的平均交付率如图 4 所示。实验数据显示,当节点的数据产生速度率在较低时,FISTDMA 的数据交付率要高于文献[3]所述的移动容忍的 TDMA 协议,而移动容忍的 TDMA 协议对于较高数据产生速率的节点数据交付率要高于 FISTDMA。这表明 FISTDMA 在簇内节点数据产生速率不均衡的情况下,能够更加及时全面地获取监测现场的数据变化,更好地反映了数据的全局特性。

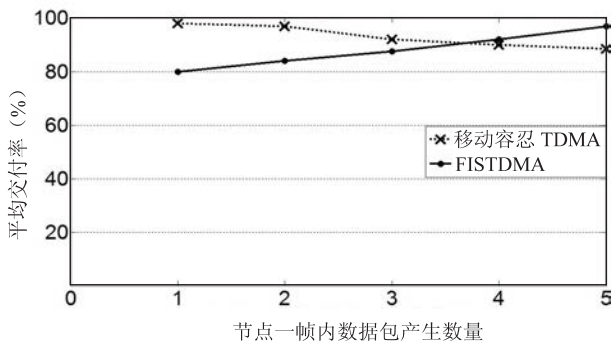


图 4 数据平均交付率

若设当数据包传输的延时超过了 1.5 倍的帧时间,则判定该数据包失去了数据的有效性。通过实验平台测得数据的失效率如图 5 所示。数据显示,FISTDMA 的数据失效率要低于移动容忍 TDMA。表明 FISTDMA 能够更加实时高效的把数据传输给簇头节点,更适合有高实时性要求的应用领域。

根据一帧内数据包产生量的不同,对传统的 TDMA、文献[3]的移动容忍协议和 FISTDMA 进行测试,结果如图 6 所示。数据显示文献[3]所述的移动容忍的 TDMA 协议与 FISTDMA 的平均时延都要比传统的 TDMA 协议要低;在低数据产生速率时,协议的平均时延低于 FISTDMA,而随着数据产生率的提高,FISTDMA 的平均时延要低于文献[3]所述协议。由于 FISTDMA 协议采用了空闲时隙利用机制,不仅大大降低了数据包的平均时延,也提高了信道的利用率,从而保证了在新的应用领域中数据的实时性要求。

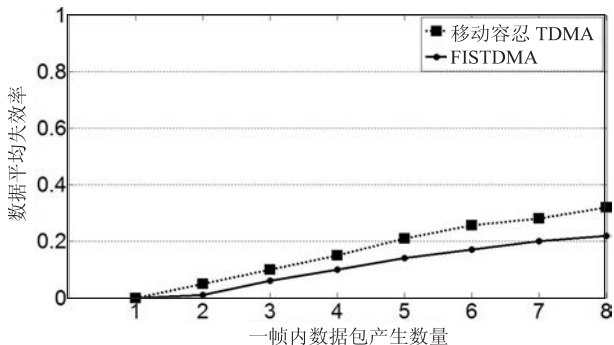


图 5 数据平均失效率

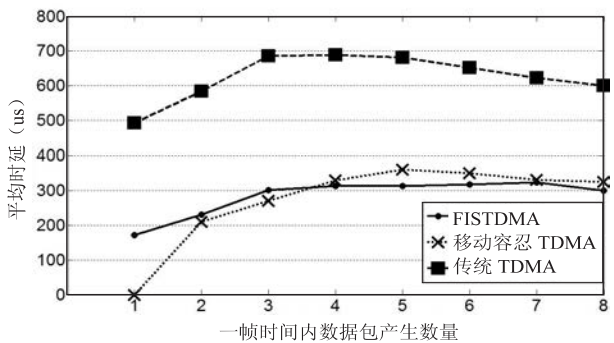


图 6 数据包的平均时延

## 5 结束语

文中分析了当前基于调度的 MAC 协议的特点,根据在无线传感器网络中新的应用领域的新要求,提出了一种充分利用空闲时隙的 MAC 协议 FISTDMA。然后,通过 CC2430 硬件平台,对该协议进行了测试。实验数据表明 FISTDMA 协议能够大大降低数据包的平均时延,同时也能够很好地反映数据的全局性特点。由于硬件平台条件所限,不能够对网络的能耗进行分析,而网络的能耗决定着网络的生存周期,因此下一步的研究工作主要是对 FISTDMA 协议的能量消耗进行分析。

### 参考文献:

[1] 孙利民,李建中,陈渝,等.无线传感器网络[M].北京:清华大学出版社,2005:59-90.

跳跃点不超过  $2^n$  个。故该算法计算跳跃点集  $p[m]$  ( $1 \leq m \leq n$ ) 所花费的计算时间最多为:  $1 + 2 + 4 + \dots + 2^n = 2^{n+1} - 1$ , 即:  $O(2^n)$ 。但是, 如果物品的重量为正整数, 则装入背包的物品总重量的增幅至少是 1, 又知跳跃点的横坐标(重量)不能超过背包的容量  $W$ , 因此  $p[m]$  ( $1 \leq m \leq n$ ) 中的跳跃点个数最多不超过  $W$  个, 此时算法的时间复杂度为  $O(nW)$ 。综合两种情况, 该算法的时间复杂度为  $O(\min\{nW, 2^n\})$ 。

## 8 结束语

文中在详细讨论 0-1 背包问题数学模型的基础上, 根据该问题呈现的特殊性, 提出了一种改进的确定性算法, 算法的求解结果不会受任何不确定因素的影响, 其时间复杂度在最坏情况下为  $2^n$ , 解决了各种智能计算方法存在的近似求解的问题。

是否能够融入其他的启发策略(如贪心策略), 设计更为有效的确定性算法是我们进一步思考、努力的方向。

### 参考文献:

- [1] Choi S, Park S, Kim H M. The Application of the 0-1 Knapsack Problem to the Load-shedding Problem in Microgrid Operation[J]. Communications in Computer and Information Science: Control and Automation, and Energy System Engineering, 2011, 256(1): 227-234.
- [2] 王乐, 王世卿, 张静乐. 基于 Matlab 的 0-1 背包问题的动态规划方法求解[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4): 88-89.
- [3] 田建立, 晁学鹏. 求解 0-1 背包问题的混沌遗传算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(8): 2838-2839.
- [4] 单小军, 吴素萍. 基于贪心策略的遗传算法求解 0-1 背包问题[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(12): 238-239.
- [5] 赵新超, 韩宇, 艾文宝. 求解背包问题的一种改进遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(24): 34-36.
- [6] 柳寅, 马良. 0-1 背包问题的模糊粒子群算法求解[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(11): 4026-4027.
- [7] 库向阳, 朱命昊, 赵亚敏. 求解 0/1 背包问题的改进人工鱼群算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 43-46.
- [8] 王会颖, 贾瑞玉, 章义刚, 等. 一种求解 0-1 背包问题的快速蚁群算法[J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(1): 104-107.
- [9] 张盛意, 蔡之华, 占志刚. 基于改进模拟退火的遗传算法求解 0-1 背包问题[J]. 微电子学与计算机, 2011, 28(2): 61-64.
- [10] 樊小毛, 马良. 0-1 背包问题的蜂群优化算法[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(6): 155-160.
- [11] 廖飞雄, 马良, 王攀. 一种改进的禁忌搜索算法求解背包问题[J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(3): 131-133.
- [12] Kakimura N, Makino K, Seimi K. Computing Knapsack Solutions with Cardinality Robustness[J]. Lecture Notes in Computer Science: Algorithms and Computation, 2011, 7074: 693-702.
- [13] Escudero L F, Martello S, Toth P. On tightening 0-1 programs based on extensions of pure 0-1 knapsack and subset-sum problems[J]. Annals of Operations Research, 1998, 81: 379-404.
- [1] Choi S, Park S, Kim H M. The Application of the 0-1 Knapsack Problem to the Load-shedding Problem in Microgrid Operation[J]. Communications in Computer and Information Science: Control and Automation, and Energy System Engineering, 2011, 256(1): 227-234.
- [2] 王乐, 王世卿, 张静乐. 基于 Matlab 的 0-1 背包问题的动态规划方法求解[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(4): 88-89.
- [3] Thaskani S, Kumar K V, Murthy G R. Mobility tolerant TDMA based MAC protocol for WSN[C]//2011 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI). [s. l.]: [s. n.], 2011: 515-519.
- [4] 刘子京, 裴文江. 基于 ZigBee 协议的无线传感器网络研究[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 192-194.
- [5] 熊磊, 董奎勇, 钱炜, 等. 基于 ZigBee 的无线网络系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(4): 242-245.
- [6] 徐敬东, 赖锡盛. TinyOS 2.0 在 CC2430 上的移植[J]. 计算机工程, 2011, 37(2): 256-257.
- [7] Gay D, Levis P, Culler D. Software design patterns for TinyOS[J]. ACM SIGPLAN Notices, 2005, 40(7): 40-49.
- [8] 郭文生, 刘奎安, 桑楠. TinyOS 集成开发环境的设计与实现[J]. 计算机应用, 2008, 28(5): 1283-1286.
- [9] 刘信新, 邵明凯. 无线传感器网络操作系统 TinyOS 研究[J]. 计算机与数字工程, 2007, 35(7): 66-68.
- [10] 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.
- [11] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2002, 36(SI): 147-163.
- [12] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]//Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, CA, United States: [s. n.], 2003: 138-149.
- [13] Maroti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, MA, United States: [s. n.], 2004: 39-49.

(上接第 122 页)

# 基于调度的无线传感器网络 MAC 协议研究

作者: [申鹏飞, 章韵](#)  
作者单位: [南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003](#)  
刊名: [计算机技术与发展](#)  
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2013(1)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201301032.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201301032.aspx)