

文章编号:1000-582X(2012)11-028-06

# 无线传感器网络倍增超周期多信道 MAC 协议设计

汤宝平,阮启东,裴 勇

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘 要:**针对数据吞吐量较大,延迟要求较高的无线传感器网络(WSN)应用,提出了新颖的分簇扩展与调度方法,设计了一种倍增超周期多信道 MAC(Medium Access Control)协议。该协议以 TDMA(Time Division Multiple Access)机制为基本原理,结合可灵活配置的混合型信道访问机制,能够有效提高网络吞吐量和信道利用效率。利用 OMnet++ 仿真软件模拟协议的运行,结果验证了本协议在提高网络吞吐量和降低传输延迟方面有优良的性能。

**关键词:**MAC 协议;无线传感器网络;超帧扩展;竞争半径

**中图分类号:**TP393

**文献标志码:**A

## MPF-MMAC: A novel wireless sensor network MAC protocol

TANG Baoping, RUAN Qidong, PEI Yong

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A novel cluster expanding and scheduling strategy is put forward, and then a multi-channel medium access control (MAC) protocol is designed for wireless sensor network (WSN) applications that ask for high network throughput and low transmission delay. The proposed MAC protocol based on TDMA can effectively improve throughput and channel utilization with a controllable hybrid channel access method. The protocol is simulated with OMnet++ software and the outcomes show that the protocol has good throughput performance and low delay time.

**Key words:** medium access control; wireless sensor networks; super-frame expanding; competitive radius

无线传感器网络 MAC (Medium Access Control) 协议是无线传感器网络 (WSN) 研究中重要而且热门的一个领域,其性能的好坏直接影响到整个网络的通信能力和节点的能量效率。较早提出的 MAC 协议<sup>[1-2]</sup>首要考虑能量效率,普遍采用周期性活动/休眠机制来节省能量,因而其对网络带宽的利用率较低。随着越来越多的 WSN 研究和应用,对网络的吞吐量和传输延迟提出了更高的要求,因此近些年来出现的 MAC 协议<sup>[3-5]</sup>转而运用多信道、时分复用等技术来提高网络传输性能。但是这些协议

存在着时延较大,时频资源的分配算法比较复杂等缺点。针对这一问题,笔者提出“成员化父节点”的虚拟化方法,简化了多级分簇型网络拓扑的 MAC 协议在控制策略上的复杂性,运用这种方法设计并实现了一种新颖的分配型多信道 MAC 协议,命名为“倍增超周期多信道 MAC 协议”(Multiply Periodic Frame within Multi-channel Medium Access Control Protocol, MPF-MMAC)。只要求传感器节点装备一个普通的半双工、具有多个工作频段的无线收发器,就可以进行高效、实时的数据传输。

收稿日期:2012-06-02

基金项目:重庆市自然科学基金杰出青年基金计划资助项目(CSTC 2011JJJQ7001)

作者简介:汤宝平(1971-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为设备状态监测与故障诊断、虚拟仪器、无线传感器网络,(E-mail)bptang@cqu.edu.cn。

## 1 相关研究

由于 WSN 不同于一般的 ad hoc 网络,传统的用于 ad hoc 网络的 MAC 协议并不适用于 WSN 中的应用,特别是 WSN 中节点能量供应受限的特点要求 MAC 协议必须具有很高的能量效率,减少或杜绝空闲侦听、传输碰撞等现象。另外网络吞吐量,传输延迟等性能指标随着研究的发展也受到越来越多的重视。近些年来广大研究人员开发设计出了各种 MAC 协议<sup>[6]</sup>,推动了 WSN 研究的发展。

MAC 协议按照无线信道的使用的方式可以分为 3 类:竞争型、分配型和混合型。竞争型的协议一般以带冲突避免的载波侦听多点接入协议(CSMA/CA)为核心机制。大部分此类协议都是针对竞争过程中的具体流程和参数进行的优化设计,例如 MMSN<sup>[7]</sup>, H-ALOHA<sup>[8]</sup>, 和 IEEE802.15.4<sup>[9]</sup> 等协议。分配型和混合型协议由于一般要求时间或频率同步,资源分配机制多种多样,差异极大,因此一般都比较复杂,例如 Z-MAC<sup>[10]</sup>, Tree-MAC<sup>[11]</sup> 和 MC-LMAC<sup>[4]</sup> 等。

## 2 MPF-MMAC 协议描述

MPF-MMAC 协议是针对多级分簇型网络的一种多信道、混合型 MAC 协议,主要面向数据吞吐量较大、实时性要求较高的应用场合。多级分簇的网络拓扑结构是以一个分簇为基本调度单位,由簇头协调和控制各个成员节点对信道的访问;分簇内的某些成员节点又可以作为簇头,形成一个低层次的分簇。每个分簇使用一个专用信道进行通信,而簇头节点使用两个信道分别在两个分簇里通信。

在这种网络拓扑中,连接两个分簇的中间节点在两个分簇里扮演不同的角色,既要协调下级分簇内所有节点通信过程,又要向上级分簇簇头转发数据。笔者提出“成员化父节点”的思想,将下级分簇簇头与上级簇头的通信虚拟化为唯一簇头与簇内成员的通信,只是附带了一些特殊性。这种虚拟化方式大大简化了簇头节点的调度策略,使得簇头无须关心其他分簇的通信过程,其本身所有通信都好像是只与本簇内的成员之间进行。下面详细分析 MPF-MMAC 协议的核心机制。

### 2.1 超帧扩展原理

超帧是一个分簇进行资源分配的单位,簇头节点决定分簇所采用的超帧长度,并给分簇内的每个节点分配发送数据的时隙。本协议设计的超帧由若

干个固定长度的接收时隙和一个广播时隙构成。接收时隙是分配给簇内的成员节点用于数据发送;广播时隙用于向成员节点发送命令和控制消息,簇内的所有成员节点都要在这个广播时隙开启接收器接收广播。

Sink 节点是网络中的第一个簇头节点,它在初始化时选择一个信道和超帧长度进行周期性广播,等待子节点的加入。

子节点初始化时先扫描所有信道,侦听信道上的信号,然后选择一个合适的信道运用 CSMA/CA 方法向簇头节点发出入网请求。Sink 节点收到请求消息后在超帧时隙表里面查找一个空闲时隙,分配给发出请求的节点,这个消息也是在广播时隙发送回去;如果超帧的所有时隙都已被分配,则不响应任何请求消息。Sink 节点的所有接收时隙分配完之后,网络第一个分簇就形成了。

分簇里有的子节点能够担任簇头。为了形成一个新的分簇,该节点选择另一个未被占用的信道作为分簇内数据收发的信道。然后根据父节点规定超帧长度,节点选择一个倍增系数扩展这个超帧作为下一级分簇所使用的超帧,同时保持新的超帧与倍增的父节点超帧的起始时刻对齐,如图 1 所示。

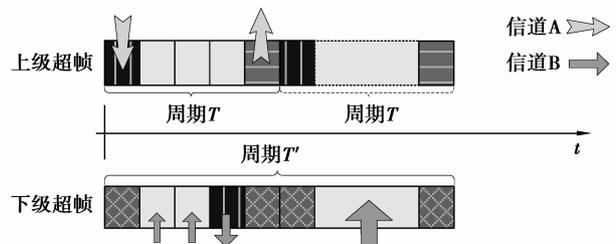


图 1 超帧扩展原理图

图 1 中显示某簇头节点加入某个信道 A 的分簇后,被分配第 5 时隙上传数据(图中横向条纹所示的时隙)。该节点选择信道 B 建立新的分簇,以倍增系数 2 扩展超帧长度后,将下级超帧中的第 5 时隙和接收广播的第 1 时隙标记为独占时隙(图中交叉条纹所示的时隙),以及与上级超帧时间上等效的第 6 和第 10 时隙。然后选取第 4 时隙作为下级分簇的广播时隙,其余时隙就可以分配给加入本分簇的子节点。

### 2.2 时隙状态管理

簇头节点扩展超帧并建立新分簇之后,它就需要维护两个超帧:一个是上级簇头指定的超帧,另一

个是下级分簇的超帧。普通的成员节点只需要运行一个超帧,即父节点建立的超帧。簇头节点为了同时运行两个超帧,一方面需要时钟同步,使两个超帧的起始时刻一致;另一方面协议设计了 4 种时隙状态用于控制节点对时隙的使用。

本协议定义时隙的 4 种状态为:空闲、分配、独占和广播。

簇头确定了新的超帧,建立新的分簇之后,将自己与上级簇头通信所用的时隙状态标记为独占,如图 1 中深灰色方框所示。这意味着这些时隙对所有下级分簇的成员节点来说是不可用的。独占时隙体现了成员化父节点的本质,这就是将簇头与上级簇头的通信时隙整合进本簇的超帧周期里,就像一般成员节点一样占有时隙资源,如图 2 所示。

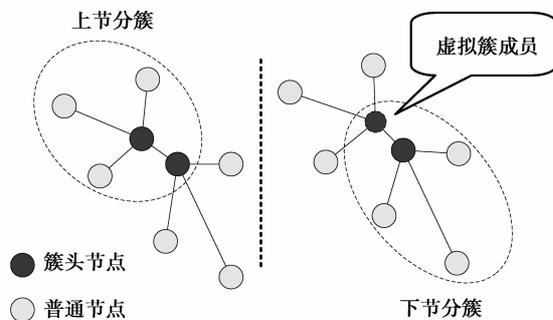


图 2 虚拟分簇成员

簇头选择一个时隙作为广播时隙。广播用于簇头与成员节点的时间同步,以及发送其他控制和命令消息。广播时隙也可用于簇头向成员节点发送一般数据。由于簇头到成员节点的数据传输量远远少于反向传输,因此合用广播时隙就足够了。

其余时隙在未分配给成员节点之前是空闲状态,分配给成员节点之后被标记为分配。分配的时隙不等同于独占。分配意味着某个成员节点对该时隙具有优先访问权,但若这个成员节点在当前周期内没有数据要发送而其兄弟节点有数据要发送时,其兄弟节点可以通过竞争抢占“偷用”这个时隙。而独占时隙是簇头节点与特殊成员节点——上级簇头的通信,因此不允许簇内成员节点偷用。

### 2.3 时隙竞争策略

为了提高信道利用率,MPF-MMAC 协议设计了一种可配置的混合型信道访问策略。这种混合型的信道策略借鉴了 Z-MAC 协议<sup>[10]</sup>。但与 Z-MAC 协议不同的是,本协议的信道竞争程度可灵活配置,节点也不需要维护邻居表等数据。

MPF-MMAC 协议中每个节点维护一个变量,

指示可竞争的时隙半径。如果在时隙半径内有独占时隙或广播时隙,则忽略这类时隙,顺次向前或向后延伸。可竞争时隙半径能由上层应用改变,以控制竞争程度的大小。设置值越大则时隙竞争者越多,从而加剧竞争;若设置为 0,表示不允许竞争抢占。节点根据时隙是可竞争时隙还是自身的分配时隙将采用两种不同的时隙访问策略。

在自身的分配时隙里,节点则有数据要发送时,先退避固定时间  $\Delta T$ ,这期间若没有监听到信道上有信号,则立即启动数据发送。 $\Delta T$  是时间同步误差最大值。退避  $\Delta T$  是为了补偿时钟同步误差,使退避结束的时间落在  $[T_{ts}, T_{ts} + 2\Delta T]$  之内,如图 3(a) 所示。然后立即启动数据发送,同时抑制其他节点的竞争,一次传输就成功完成了。如果节点在退避过程中侦听到信道上有信号,则有可能是信道被其他节点抢先竞争;也有可能是节点自身的时钟与其他节点失去同步,节点无法确定是哪一种错误,只能放弃传输,等到下一个时隙再尝试发送。

在可竞争的时隙里,节点有数据要发送时,先延时  $2\Delta T$ ,然后侦听信道是否有信号,如果没有信号,则在竞争窗口  $[\Delta T, (n+1)\Delta T]$  内选择一个时间进行随机退避。若退避期间没有侦听到信道上有信号,则表示竞争成功,在退避结束后立即启动数据发送,见图 3(b) 所示。若延迟或退避期间侦听到信道上有信号,则表示其他竞争者赢得了当前时隙的使用权,于是放弃当前时隙的传输,等到下一个可竞争时隙再尝试发送。竞争窗口的下限为  $\Delta T$ ,这使得当前时隙的所有者节点能够避开竞争者的竞争窗口起始时间从而优先得到时隙的使用权。竞争窗口的上限为  $(n+1)\Delta T$ ,其中  $n$  等于可竞争时隙半径的数值。运用这种方式允许多个节点竞争一个时隙,可有效降低碰撞的概率。

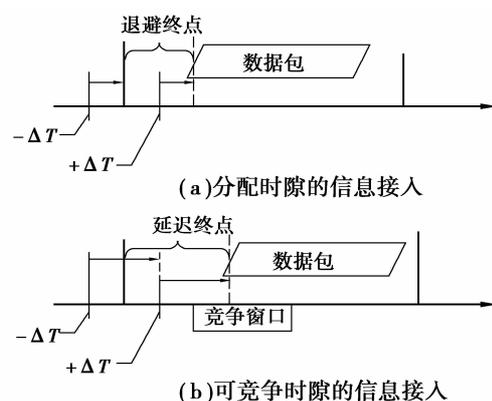


图 3 时隙访问

### 3 仿真与实验

使用 OMnet++ 仿真软件来模拟本协议的运行情况。模拟场景为  $500\text{ m} \times 500\text{ m}$  的范围,35 个节点随机散布,模拟运行的网络拓扑如图 4 所示。节点无线模块的通信速率设置为  $250\text{ kbps}$ ,发射范围为  $100\text{ m}$ 。其他仿真参数见表 1 所示。结合协议的设计目标,对吞吐量、传输时延和能量效率分别进行了测试。

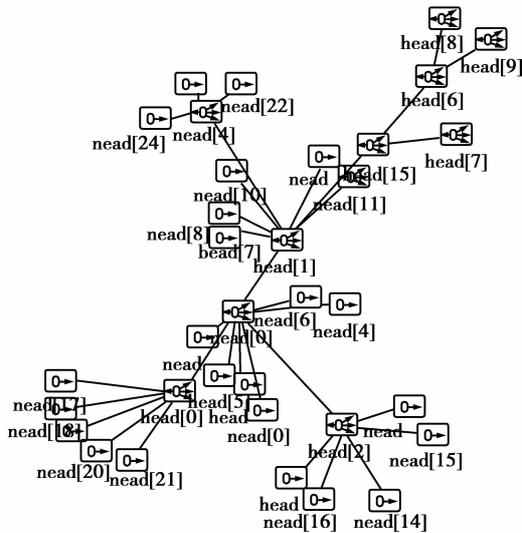


图 4 网络拓扑图

表 1 仿真参数表

参数	值
时隙长度/ms	20
初始超帧大小/ms	$6 \times 20$
超帧扩展系数	2
竞争时隙半径	0~2
发射功率/mW	60
接收功率/mW	58
休眠功率/ $\mu\text{W}$	200

#### 3.1 时间同步方法

基于 TDMA 机制的协议要求时间同步,本协议使用了目前同步精度较高且易于实现的 HRTS 协议<sup>[12]</sup>来进行时间同步。该协议基于 TPSN<sup>[13]</sup>原理,将其扩展到多节点一次性同步,大幅提高了时间同步的频率。仿真及实验结果表明,其时间同步精度平均不超过  $45\ \mu\text{s}$  的水平,能够满足绝大多数应用场合的需求。

#### 3.2 仿真测试

##### 1) 网络吞吐量。

让所有节点以一定的速率和负荷向 Sink 节点发送数据包,簇头节点负责中转数据包,让 Sink 节点接收所有数据包、统计通信流量并以此计算信道利用率,得到图 5 所示的结果。从图中可以看出本协议对网络带宽的利用率随着发送速率的增大呈线性增长关系,数据负荷较小时(30 B, 50 B)这种规律十分明显;当发送速率为 7 包/s 的时候达到最大值,再提高速率时,会导致大量数据量在簇头节点处拥塞从而来不及中转,因此信道利用效率出现下降。

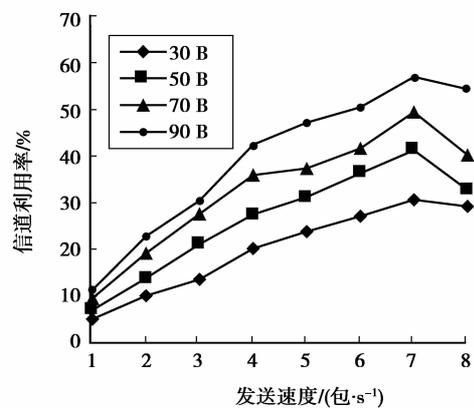


图 5 信道利用率

##### 2) 传输延时。

为了测试传输延迟,分层次分别对不同网络深度的节点进行试验。大于一跳的网络只允许最远端的节点周期性地发送数据包,中间节点只负责向上级簇头转发,最后让 Sink 节点统计数据包到达时刻的时间和全程传输延时。笔者分别进行了 1~3 跳网络深度的传输延时实验。经过一段时间的运行,得出 3 种情况下节点的平均延时分别为 66、188 和 442 ms,标准偏差分别为 20、63 和 151 ms,如图 6 所示。

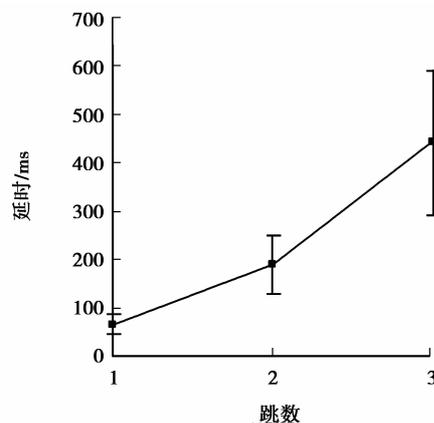


图 6 传输延时与跳数的关系

由于测试所用的节点数较少,数据包产生的速率也较小,因此只能说明较小网络负荷情形下的延时水平;如果网络负荷很重,可能会增加由于拥塞导致的额外延时。

### 3) 能量效率。

能量效率是 MAC 协议的一个重要性能指标,其可以定义为网络中传输有效数据包所消耗的能量与这段时间内无线模块所消耗的能量之比。笔者让每个节点都维护一个变量,记录成功接收/发送的数据包个数。经过一段时间的运行,根据各个节点的剩余能量和有效数据包的个数来计算能量效率。实验设置的节点发送速率与数据包大小与试验 1 相同,经过多次实验,得到图 7 所示的结果。

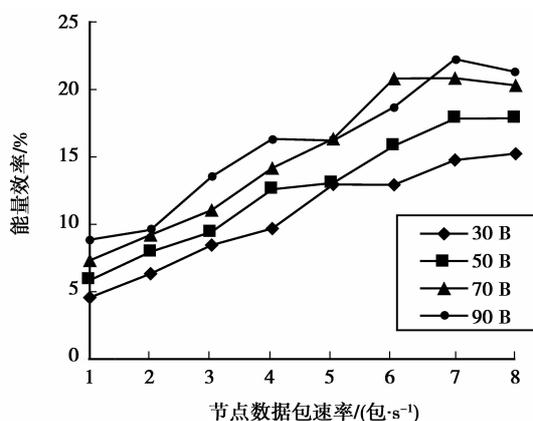


图 7 能量效率与数据包速率的关系

从图中可以看出能量效率随着数据包速率呈正相关变化规律。但总体来说网络的能量效率比较低,这是由于很多能量消耗在了簇头节点的空闲侦听和收发广播上面。由于本协议基于 TDMA 机制,周期性的同步广播是不可或缺的,因此能量效率无法达到很高的水平。

### 3.3 实验测试

用 FW4000 节点进行实验测试,该节点的核心部件是 CC2430 芯片<sup>[14]</sup>,它集成了微控制器、IEEE 802.15.4 标准的无线收发器和多种外设接口,功耗极低,是开发与测试无线传感器网络通信协议的很好的平台,节点实物如图 8 所示。协议的实现基于 uC/OS-II 实时操作系统<sup>[15]</sup>,在 IAR 编译环境下将其移植到 CC2430 芯片上。

由于实验条件有限,笔者让 7 个子节点加入 1 个分簇,以最高频度尽可能快地向簇头节点发送数据包,簇头节点接收数据包并统计有效的网络流

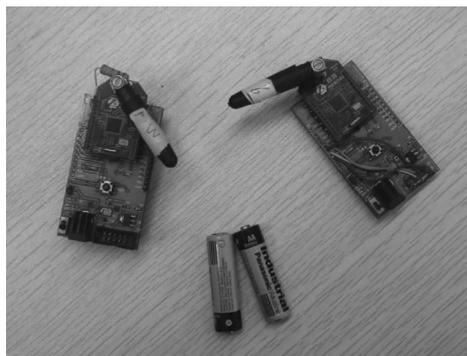


图 8 FW4000 节点

量,数据包大小从 30B 到 90B,以测试网络最大的数据吞吐量。与 ZigBee 协议所使用的 CSMA 方法进行了对比,结果发现,在数据包较小时,MPF-MMAC 的网络吞吐量比 CSMA 协议高 15% 左右,这是因为本协议基于 TDMA,发送数据时虽然也有可能要竞争信道,但其平均窗口长度比 CSMA 协议小得多,因而网络吞吐量较高。在数据包较大时,两种协议的吞吐量大体持平。由于时隙边界有可能抑制较长数据包的发送,改变时隙长度将会有助于网络吞吐量的提高。结果如图 9 所示。

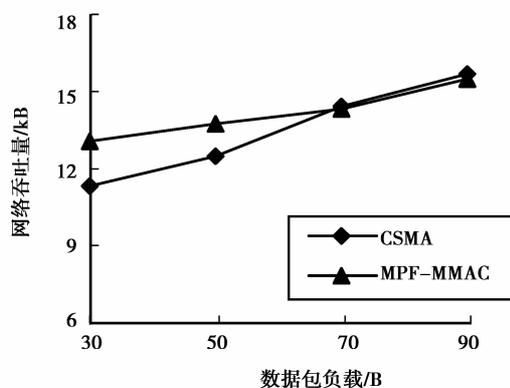


图 9 网络吞吐量试验

## 4 结 语

针对数据吞吐量要求高,延迟要求严格的无线传感器网络应用需求,笔者设计并实现了一种新的 MAC 协议,验证了其性能特点。本文的主要贡献如下:1)提出“成员化父节点”的思想,设计了相应的实现方法,简化了多级分簇型网络拓扑中的调度策略;2)提出了竞争时隙半径的概念,使得混合型协议的信道访问的竞争程度可灵活配置。本文的后续工作是将 MPF-MMAC 与同类型 MAC 协议作更详细的对比实验,并进一步完善协议设计和开发。

## 参考文献:

- [ 1 ] Tijs V D, Koen L. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [ C ] // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 5-7, 2003, Los Angeles, CA, USA. New York: ACM, 2003(11):171-180.
- [ 2 ] Wei Y, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [ C ] // Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, June 23-27, 2003, New York, USA. Piscataway: IEEE Press, 2002, 3:1567-1576.
- [ 3 ] Chowdhury K R, Nandiraju N, Cavalcanti D, et al. CMAC: a multi-channel energy efficient MAC for wireless sensor networks [ C ] // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, April 3-6, 2006, Las Vegas, NV. Piscataway: IEEE Press, 2006, 2:1172-1177.
- [ 4 ] Incel O D, Hoesel L V, Jansen P, et al. MC-LMAC: a multi-channel MAC protocol for wireless sensor networks [ J ]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(1):73-94.
- [ 5 ] Khosrowshahi A C, Dehghan M, Pedram H, et al. A novel multi channel sensor network MAC protocol [ J ]. Systems and Networks Communications, 2009 ( 9 ): 230-235.
- [ 6 ] Kredon K, Prasant M. Medium access control in wireless sensor networks [ J ]. Computer Networks: the International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2007, 51 ( 4 ): 961-994.
- [ 7 ] Zhou G, Wu Y F, Yan T, et al. A multifrequency MAC specially designed for wireless sensor network applications [ J ]. ACM Transactions on Embedded Computing System, 2010, 9(4):1-40.
- [ 8 ] Wang H H, Li T T. Hybrid ALOHA: a novel MAC protocol [ J ]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(12):5821-5832.
- [ 9 ] IEEE Standard Committee. IEEE Std 802. 15. 4-2006 Part 15. 4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANs) [ S ] // IEEE Standards Activities Department. Washington: IEEE Computer Society, 2007.
- [ 10 ] Injong R, Warriar A, Aia M, et al. Z-MAC: a hybrid MAC for wireless sensor networks [ J ]. IEEE/ACM Transaction on Networking, 2008, 16(3):511-524.
- [ 11 ] Song W Z, Huang R, Behrooz S. TreeMAC: localized TDMA MAC protocol for real-time high-data-rate sensor networks [ J ]. Pervasive and Mobile Computing, 2009, 5(6):750-765.
- [ 12 ] Dai H, Richard H. TSync: a lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks [ J ]. ACM Sigmobile Mobile Computing and Communications Review: Special Issue on Wireless Pan & Sensor Networks, 2004, 8(1):125-139.
- [ 13 ] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks [ C ] // Proceedings of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, November 5-7, 2003, Los Angeles, CA. New York: ACM, 2003(11):138-149.
- [ 14 ] Texas Instruments. CC2430 Data Sheet [ EB/OL ]. [ 2011-08-10 ]. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2430.html>.
- [ 15 ] Jean J L. 邵贝贝,译. 嵌入式实时操作系统 uC/OS-II [ M ]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社, 2010.

(编辑 张 莘)