

# 基于 IEEE802.15.4 的动态自适应占空比方案

黄海利<sup>1,2</sup>, 王晓喃<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221008)

(2. 常熟理工学院计算机科学与工程学院, 江苏 常熟 215500)

**[摘要]** 在无线传感器网络中, IEEE802.15.4 协议采用固定的占空比机制, 而网络流量却是动态变化的, 所以固定的占空比机制不适合于动态的网络流量. 因此, 本文提出了一种动态自适应占空比方案 DSBA (Dynamic Superframeorder Beaconorder Adaption), 该方案通过感知网络流量动态调整节点占空比, 即对比当前节点所能处理的数据帧数量和下一周期将要收到的数据帧数量, 动态调整占空比使之适合网络流量传输从而提高网络性能. 仿真结果表明该方案不仅减少了能量消耗, 也降低了丢包率和传输延迟.

**[关键词]** IEEE802.15.4, 业务流量, 占空比, 能量消耗

**[中图分类号]** TP393 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2014)01-0035-06

## A Dynamic Duty Cycle Adaption Scheme Based on IEEE802.15.4

Huang Haili<sup>1,2</sup>, Wang Xiaonan<sup>2</sup>

(1. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

(2. School of Computer Science and Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

**Abstract:** In wireless sensor networks, IEEE802.15.4 MAC adopts fixed (namely, Duty Cycle) scheme. However, network traffic changes dynamically, so the fixed duty cycle is unsuitable for dynamic network traffic. Therefore, this paper proposes a dynamic duty adaption scheme DSBA (Dynamic Superframeorder Beaconorder Adaption). In this scheme, the duty cycle is dynamically adjusted according to network traffic. Through comparing the number of current data frames with the one of data frames in the next period, two main parameters of duty cycle are dynamically adjusted in order to improve the transmission performance. The simulation results show that DSBA effectively reduces energy consumption, packet loss rate and transmission delay.

**Key words:** IEEE802.15.4, duty cycle, energy consumption, transmission

2003 年 5 月, IEEE 802.15.4 工作组正式发布了 IEEE802.15.4 标准, 即低速无线个人区域网 (Low-Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN)<sup>[1-3]</sup>. IEEE 802.15.4 标准的诞生为无线传感器网络的广泛应用奠定了良好的基础.

无线传感器网络中, 介质访问控制协议 (Media Access Control, MAC) 决定了无线信道的使用方式<sup>[4]</sup>, 用于在传感器节点间分配有限的通信资源, 构建传感器网络系统底层基础结构, 因此, MAC 协议是保证无线传感器网络高效通信的关键网络协议, 直接影响整个网络的性能<sup>[5,6]</sup>.

IEEE 802.15.4 标准采用超帧结构, 节点的活动周期和休眠周期的比例 (即占空比) 是由 MAC 层的 PIB (PAN Information Base) 属性值决定, 其值为固定值<sup>[6]</sup>. 当占空比设置得比较低时, 节点的超帧活跃期只占整个信标间隔周期的很小部分, 用作信道空闲侦听、信道资源接入竞争、数据帧发送和接收等操作<sup>[8]</sup>. 此时, 节点利用大部分时间处于休眠状态以降低功耗. 如果占空比设置得过低, 会导致较大的网络端到端时延. 因为节点在休眠之前未完成的操作及其在休眠过程中等待处理的操作均要延迟到下一个信标间隔周期才能执行. 如果占空比设置得比较高, 网络的端到端时延性能将会得到改善, 但是可能此时节点的大

收稿日期: 2013-10-20.

基金项目: 国家自然科学基金 (61202440).

通讯联系人: 王晓喃, 博士后, 副教授, 研究方向: 计算机网络与应用. E-mail: wxn\_2001@163.com

部分时间处在不必要的空闲侦听状态从而浪费大量宝贵的能量<sup>[8,9]</sup>.

本文提出了一种占空比动态调节方案 DSBA(Dynamic Superframeorder Beaconorder Adaption),其创新之处在于:对比当前节点所能处理的数据帧数量和下一周期将要收到的数据帧数量,根据不同的状态动态调节占空比的两个参数,从而提高网络性能.

## 1 IEEE802.15.4 协议标准

### 1.1 超帧结构

超帧包括“活动(Active period)”和“非活动(Inactive period)”部分.在活动部分各设备通过竞争或非竞争的方式使用信道,在非活动部分各个设备进入睡眠状态,以达到节能的目的<sup>[8]</sup>.

超帧活动部分 Superframe Duration(简称 SD)分成 16 个相等的时间片, PAN 中的所有设备只能在特定的时隙中进行数据收发.信标帧的间隔 Beacon Interval(简称 BI)从网络协调器发送的信标帧(beacon)到下一次发送信标帧.超帧的其余 15 个时隙又分成两大部分:竞争部分(CAP)和非竞争部分(CFP)<sup>[4,10]</sup>.每一部分占用多少个时隙由网络协调器根据情况分配<sup>[6]</sup>.超帧结构如图 1 所示.

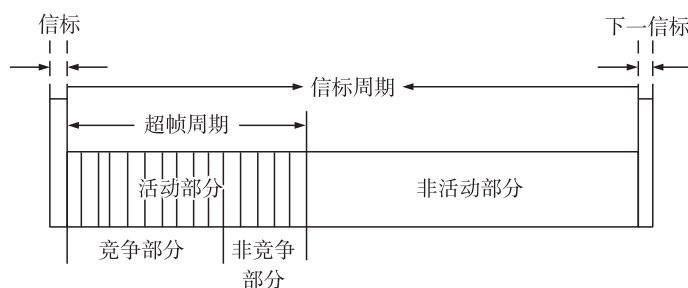


图 1 超帧结构

Fig.1 Superframe structure

### 1.2 占空比机制

超帧的通信时间和休眠时间的比例由 MAC 层 PIB 属性 macBeaconOrder(简称 BO)和 macSuperframeOrder(简称 SO)的值来决定<sup>[4]</sup>.信标级数 BO<sup>[12]</sup>决定协调器发送信标帧的间隔. BI 的计算公式如式(1),当 BO 是 15 时,该网络不使用信标模式.超帧级数 SO 描述了超帧激活期的长度,SD 的计算公式如式(2),信标帧包含在激活期部分.当 SO 是 15 时,该超帧无激活状态.其中,aBaseSuperframeDuration 是基本的超帧时隙时间. Duty Cycle 表示占空比,其计算公式如式(3).

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}, \quad 0 \leq BO \leq 14, \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}, \quad 0 \leq SO \leq BO. \quad (2)$$

$$Duty\ Cycle = SD/BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}/aBaseSuperframeDuration * 2^{BO} = 2^{SO-BO}. \quad (3)$$

## 2 DSBA 协议设计方案

DSBA 的创新之处在于根据网络负载的不同,综合调整 SO 和 BO 的值,在不同负载的情况下以不同的方式动态调整 SO 和 BO 两个参数,使监听/睡眠比例达到最优值,从而提高数据传输性能,减少能量消耗.

### 2.1 DSBA 协议实现前提

本文设计思想是通过比较当前占空比下协调器所能传输的数据帧数量和下一超帧周期将要传输的数据帧数量的关系,动态调整占空比使之动态调节网络流量从而提高网络性能.首先,要解决如下两个问题.

问题 1:如何获得当前占空比下所能传输的数据帧的个数;

问题 2:如何获得在等待下一个周期传输的数据帧个数.

问题 1 的解决方法:首先计算超帧周期的活动时间 SD 和 1 个数据帧传输所花费的时间  $T_s$ ,这样就可以得到当前超帧周期能够处理的最大数据帧个数  $N$ .

根据上述对于超帧结构的分析,超帧的活动期才能进行数据传输.数据传输包括退避时间  $T_{backoff}$ 、2 个 CCA(Clear channel assessment)信道检测时间  $T_{cca}$ 、数据 DATA 的传输时间  $T_{data}$  和确认帧的传输时间  $T_{ack}^{[13]}$ .

式(4)给出一个数据帧传输所需要的符号数  $T_s$ ,式(5)给出了超帧活动期所能传输的数据帧的最大个数  $N$ .

$$T_s = T_{\text{backof}} + 2 * T_{\text{cca}} + T_{\text{data}} + T_{\text{ack}}, \quad (4)$$

$$N = SD / T_s. \quad (5)$$

问题 2 的解决方法:本文在数据帧的头部增加字段 Queue\_num,用来表示发送缓存中待发送的数据包个数.节点每次发送数据帧时,检查一下自己的缓存区中还有多少要发送的数据,并在发送数据时更新 Queue\_num 值.协调器每次收到数据时,都从数据帧的头部提取 Queue\_num 值,并记录下本次周期内接收到所有数据帧的头部 Queue\_num 值.这样,协调器就可以知道下一周期内要发送的数据总和  $M$ .数据帧的结构如图 2 所示.

字节: 2	1	0/2	0/2/8	0/2	0/2/8	1	可变	2
帧控制	序列号	目的PAN	目的地址	源PAN 标示符	源地址	Queue_num	帧载荷	FCS校验
地址域								
MHR(MAC层帧首部)							负载	帧尾

图 2 数据帧结构

Fig.2 Data frame format

## 2.2 DSBA 协议算法设计

协调器首先计算自己当前超帧活动期间所能处理的最大数据包数  $N$ .节点每次发送数据之前,检查自己的缓存中还有多少数据帧要在下一个超帧周期发送,并将结果记录在自己的数据帧头部的 Queue\_num 字段中,发送给协调器.通过控制数据帧发送的数量来避免误差,即发送的数据帧数量要与通知协调器下一个周期等待发送数据帧的数量严格一致.如果对应的缓冲区中又增加了新数据,那么这些新数据帧将延迟到下一个超帧周期发送.因此,本算法中,节点只发送 Queue\_num 字段中记录的数据帧个数.这样,可以确保 Queue\_num 字段中的数据帧数量与知协调器下一个周期即将发送数据帧的数量一致,从而有效避免误差的产生.

协调器每次收到发送给自己的数据帧时,从数据帧头提取 Queue\_num 字段,并计算所有与自己相连的节点中要在下一超帧周期发送数据帧的总和  $M$ .根据  $M$  和  $N$  的大小关系,进行动态调节.本文提出两种占空比调节算法,分别是 DSBA-SO 和 DSBA-BO.

### • DSBA-SO

DSBA-SO 的算法描述如下:

(1) 如果  $M \geq 2 \times N$ ,即超帧周期处理时间至少要增大两倍才能处理完下一超帧周期的数据,那么增大 1 倍的超帧活动时间(即 SO 自增)且降低 1 倍的超帧间隔(即 BO 自减).

(2) 如果  $M = N$ ,即超帧周期正好可以处理完即将收到的数据,那么不需要对占空比进行调整.

(3) 如果  $2 * N > M > N$ ,即至多增大 2 倍的超帧活动时间就可以处理完下一周期要接收到的数据,此时,增大 1 倍的超帧活动时间(即 SO 自增).

(4) 如果  $1/2 * N \leq M < N$ ,即当前的占空比会有存在空闲监听时间,则降低超帧活动时间(即 SO 自减),从而减少空闲监听的能量消耗.

(5) 如果  $M < 1/2 N$ ,即降低至少 2 倍的超帧活动时间就可以完成下一超帧周期的数据传输降低超帧活动时间,即降低超帧活动时间(即 SO 自减)且增大超帧间隔(即 BO 自增).

DSBA-SO 算法流程图如图 3 所示.

### • DSBA-BO

DSBA-BO 的算法描述如下:

(1) 如果  $M \geq 2 * N$ ,增大超帧活动时间(即 SO 自增)并且降低超帧间隔 BO(即 BO 自减).

(2) 如果  $M = N$ ,不做调整.

(3) 如果  $2 * N > M > N$ ,即至多增大 2 倍的超帧活动时间就可以处理完下一周期要接收到的数据,此时,降低 1 倍的超帧间隔(即 BO 自减).

(4) 如果  $1/2 * N \leq M < N$ ,即当前的占空比会有存在空闲监听时间,则增大超帧间隔(即 BO 自增),从

而减少空闲监听的能量消耗.

(5) 如果  $M < 1/2N$ , 则降低超帧活动时间(即 SO 自减)并且增大超帧间隔 BO(即 BO 自增).

DSBA-BO 流程图如图 4 所示.

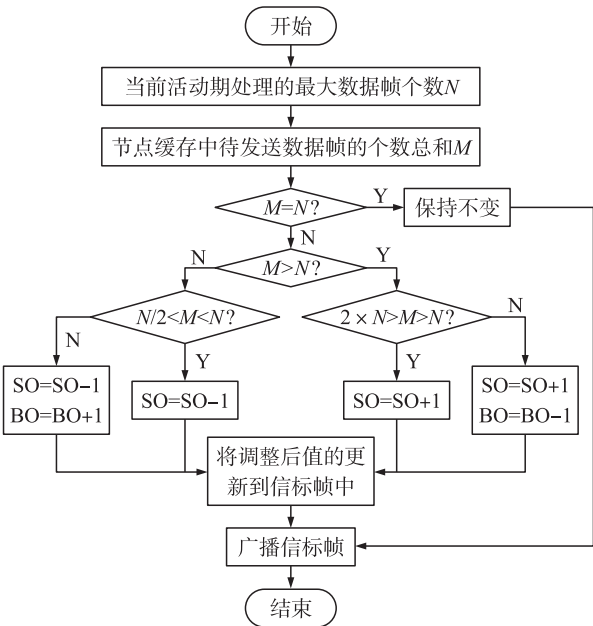


图 3 DSBA-SO 算法流程图

Fig. 3 The flow of DSBA-SO algorithm

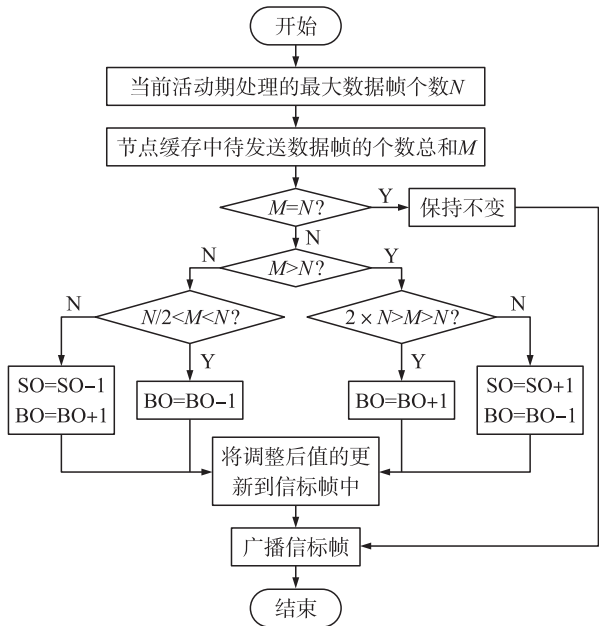


图 4 DSBA-BO 算法流程图

Fig. 4 The flow of DSBA-BO algorithm

3 仿真实验与性能分析

3.1 仿真参数设置

仿真工具采用 NS-2, 网络面积为  $50 \times 50 \text{ m}^2$ , 节点以 100 packets/s 向网络协调器发送 CBR 数据包<sup>[14,15]</sup>. 仿真参数采用 IEEE802.15.4 的默认参数, 其他参数设置如表 1 所示, 其中物理层的工作频率为 2.4 GHz, 默认带宽为 250 Kbps<sup>[1]</sup>.

本文从传输性能和能耗两个方面对本协议和现有协议<sup>[16]</sup>的性能做出了仿真分析, 传输性能方面主要从丢包率、延时两个方面, 能耗即是当前节点在运行过程中所消耗的能量.

3.2 DSBA-SO 与 DSBA-BO 的比较

从图 5、6 和 7 可以看出, DSBA-SO 算法在丢包率、延时和能耗 3 个方面都优于 DSBA-BO.

从图 5 可以看出, DSBA-SO 的丢包率比 DSBA-BO 的丢包率要低. 这是由于本文通过比较超帧周期协调器的处理能力来调节占空比, 而处理能力又是由超帧活动时间直接决定. 所以, DSBA-SO 直接调整协调器所能处理数据帧的个数, DSBA-BO 却只达到间接调节协调器处理能力的作用. 所以, 当网络负载处于协调器所能处理的数据帧个数的小范围内波动时, DSBA-SO 可以达到迅速调节协调器所能处理的数据帧个数, 从而迅速调整协调器能够处理的数据帧个数, 减小了数据帧的丢包率. 因此, 采用 DSBA-SO 直接调节超帧活动时间比 DSBA-BO 间接地调整超帧间隔来调整占空比, 表现出了一定的优势.

从图 5 和图 6 可以看出, 丢包率和时延是成正比关系, 丢包率降低导致时延的降低. 当网络流量增大时, 调节 SO 可以迅速调节协调器的处理能力. 调整结果使得原本不可以在下一超帧周期处理的数据帧个数可以在下一超帧周期内处理, 这样, 就减少了相当一部分的数据必须再等一个超帧周期的时间, 因此降低了时延.

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameters	
仿真参数	参数值
网络大小	50×50 m
仿真时间	100 s
能量模型	EnergyModel
通信半径	15 m
业务类型	CBR
CBR 大小	100 Byte
路由协议	AODV
分组间隔	0.01 s
队列大小	20
发送功率	35 mW
接收功率	31 mW
初始能量	3 J



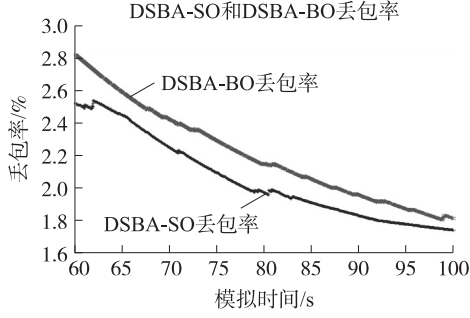


图 5 丢包率

Fig. 5 Packet loss

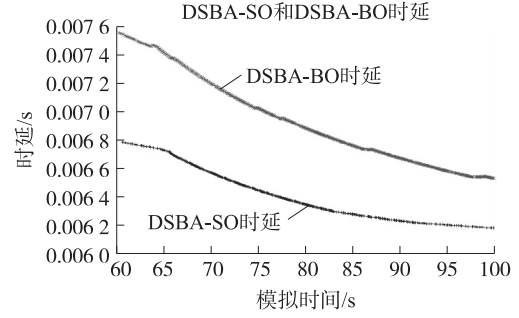


图 6 时延

Fig. 6 Delay time

由于时延和丢包率都降低了,因此能耗也有所降低,如图 7 所示.从能耗的对比图可以看出,DSBA-SO 能耗比 DSBA-BO 的能耗低.主要原因在于 DSBA-SO 可以直接减少空闲监听时间,DSBA-BO 不能达到减少空闲监听的时间.

综合上述对 DSBA-SO 和 DSBA-BO 的比较,可以知道改变 SO 比改变 BO 更加激进.所以,本文综合了两种算法的优越性来改变网络流量很大或者很小的情况.这样,可以从两方面共同调整占空比使之适合网络传输.而且本文每次对 SO 和 BO 的调整只增加 1 或者减少 1,不做较大的调整,避免了终端设备不能和协调器同步的问题.

### 3.3 DSBA 与现有方案性能对比

DSBA-SO 与最新的改进算法<sup>[7]</sup>进行了对比分析,如图 8、9 和 10 所示.

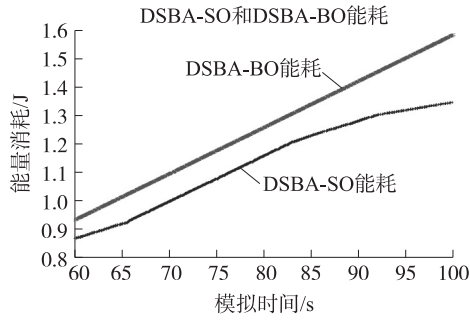


图 7 能耗

Fig. 7 Energy consumption

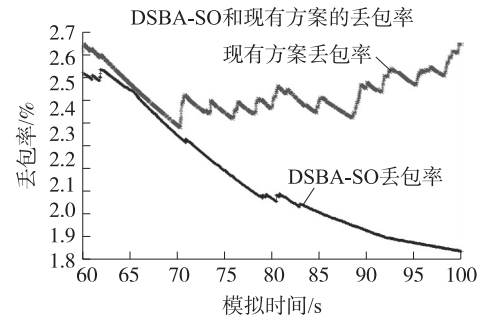


图 8 丢包率

Fig. 8 Packet loss

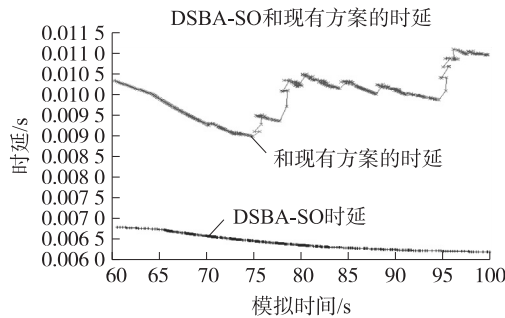


图 9 时延

Fig. 9 Delay time

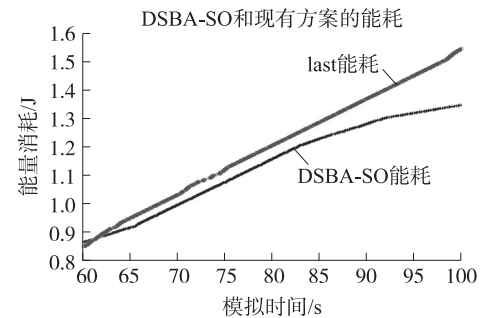


图 10 能耗

Fig. 10 Energy consumption

从图 8 可以看出,DSBA-SO 算法的丢包率呈现出不断下降的趋势,优于现有算法<sup>[7]</sup>.由于 DSBA-SO 算法将负载区间划分得很细,并且对每个区间处理得更为精确.当网络流量不断增大时,DSBA-SO 协议采取增大活动时间和减少超帧间隔来处理较大的负载,而现有协议只增大活动时间,所以本协议的丢包率低于现有协议.

从图 9 可以看出,时延图和丢包率的图相对应.由于本文分别对不同的网络流量给出处理措施,完成了尽最大努力让所有的数据在一个超帧周期内传输.这样,DSBA-SO 算法大幅度降低了数据帧必须等到

下一个超帧周期才能传输的概率,从而减少了数据时延.而现有协议没有实现尽最大努力让数据在一个超帧周期内传输完成,没有大幅度地降低时延.

从丢包率和时延的对比图可以分析得出能量消耗必然优于现有协议,如图10所示.丢包率和时延的减少降低了数据重发和数据等待的几率,数据发送和接收必然带来大量能量的消耗,由于节点发送和接收消耗的能量是能耗的主要原因.当流量很低时,DSBA-SO减少了空闲监听带来的能量消耗.所以,能耗要低于现有协议.

## 4 结束语

本文提出了一种动态自适应占空比方案DSBA,并将其与最新的占空比调节方案<sup>[16]</sup>进行了性能比较.从仿真结果分析,本文提出的算法在性能上优于现有算法,有效改善了网络性能,满足了无线传感器网络对能耗的要求.

### [参考文献]

- [1] IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4 Standard (2006) Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [M]. New York: IEEE Press, 2003.
- [2] IEEE Computer Society. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [M]. New York: IEEE Press, 2011.
- [3] IEEE Computer Society. IEEE 802.15.4 WPAN Task Group, IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [M]. New York: IEEE Press, 2006.
- [4] 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.
- [5] Yu-Kai H, Ai-Chun P, Hui-Nien H. A comprehensive analysis of low-power operation for beacon-enabled IEEE 802.15.4 wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11): 5601-5611.
- [6] Jeon J, Jong W L, Jae Y H, et al. DCA: Duty-Cycle Adaptation Algorithm for IEEE 802.15.4 Beacon-Enabled Networks: Vehicular Technology Conference [C]//VTC2007-Spring. Dublin: IEEE 65th, 2007.
- [7] 吕治安. ZigBee 网络原理与应用开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [8] 高博. 无线传感器网络中 IEEE 802.15.4 MAC 的协议建模与能量有效性研究 [D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电子工程学院, 2009.
- [9] Anwender M, Wagenknecht G, Braun T, et al. BEAM: a burst-aware energy-efficient adaptive MAC protocol for wireless sensor networks; networked sensing systems (INSS) [C]//2010 Seventh International Conference on Networked Sensing Systems (INSS), Kassel, 2010.
- [10] Dongheui Y, Seong-Eun Y, Daeyoung K, et al. OD-MAC: an on-demand MAC protocol for body sensor networks based on IEEE 802.15.4 [C]//RTCSA'08. 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications, Kaohsiung, 2008.
- [11] 仝杰, 杨帆, 钱德沛. 移动 Sink 传感网中基于 IEEE 802.15.4 的拓扑控制与路由 [J]. 通信学报, 2011(6): 107-115.
- [12] Mohameden A, Boukhatem L, Pujolle G. Class Aware Duty Cycle (CADC) to improve QoS of IEEE 802.15.4 networks [C]//Wireless Days (WD), Paris: 2009 2nd IFIP, 2009.
- [13] Wijetunge S, Gunawardana U, Liyanapathirana R. Performance analysis of IEEE 802.15.4 MAC Protocol for WSNs with ACK frame transmission under unsaturated traffic conditions [C]//Sixth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Brisbane, QLD, 2010.
- [14] Kumar V, Raghuvansi A S, Tiwari S. Performance study of beacon-enabled IEEE 802.15.4 standard in WSNs with clustering [C]//International Conference on Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), Allahabad, 2010.
- [15] Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C S. Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks [C]//IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications, Arizona, 2004.
- [16] 万静. 信标模式下 802.15.4 MAC 协议研究 [D]. 成都: 电子科技大学通信与信息系统专业, 2012.

[责任编辑: 顾晓天]