

## 随机接入移动无线传感器网络快速组网媒体访问控制

黄亮\*, 王福豹, 马超, 杨晗

(西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072)

(\*通信作者电子邮箱 huangliangnumber1@163.com)

**摘要:** 基于非时隙 CSMA/CA 随机接入机制的 IEEE802.15.4 MAC 协议组网耗时过长, 不能满足自组网实时通信应用需求。针对这一问题, 分析了 MAC 组网流程中各步骤所耗时间, 提出一种新的快速组网策略, 采用预分配信道, 将关联过程从间接传输简化为直接传输, 改进 CSMA/CA 冲突避免机制以减少冲突。仿真实验和现场测试结果均表明, 与 IEEE 802.15.4 协议相比, 提出的快速组网策略使得信道冲突降低, 组网时间更快, 更符合实时通信需求。

**关键词:** 移动无线传感器网络; 快速组网; IEEE802.15.4 MAC; 非时隙 CSMA/CA; 组网时间

**中图分类号:** TP393.03; TN915.04 **文献标志码:** A

### Fast networking media access control for random access based mobile wireless sensor networks

HUANG Liang\*, WANG Fubao, MA Chao, YANG Han

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** This paper researched the fast networking Media Access Control (MAC) of mobile sensor networks based on unslotted CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) random access algorithm. This paper analyzed and optimized the networking process by pre-assigning the channels, simplified the association process using direct transmission instead of indirect transmission, and improved the CSMA/CA mechanism in order to reduce the collision. The simulation and field test results show that the proposed method can reduce the collision and the networking time effectively compared with the IEEE 802.15.4 protocol.

**Key words:** Mobile Wireless Sensor Network (MWSN); fast networking; IEEE802.15.4 MAC; unslotted CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance); networking time

## 0 引言

移动无线传感器网络 (Mobile Wireless Sensor Network, MWSN) 因其部署灵活、自组织和网络态势感知能力等特点, 应用日益广泛。在战场和灾害感知等紧急实时应用中, 由于环境复杂多变, 外部干扰强烈, 网络结构频繁变化, 需要网络具有快速组网和再入网能力。当前 MWSN 普遍采用 IEEE802.15.4<sup>[1]</sup> 媒体访问控制 (Media Access Control, MAC) 协议进行组网通信, 按应用需求可选用基于时隙或非时隙的载波监听多路复用/冲突避免 (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA) 算法。基于时隙的 CSMA/CA 采用超帧 (Superframe) 结构, 利用信标帧 (Beacon) 进行网络时间同步, 这种网络也叫信标网络。非时隙 CSMA/CA 算法则完全随机竞争接入信道通信, 节点间无需时间同步。文献[2]对 IEEE802.15.4 基于时隙的 CSMA/CA 机制进行分析和改进以提高信道利用率。文献[3]提出一种基于非信标模式 IEEE802.15.4 MAC 下的随机模型, 给定节点数和包速率, 可以预测丢包率和延迟。文献[4]提出一种饱和吞吐量状态下的非时隙 CSMA/CA 算法分析模型, 利用信道检测结果作为动态速率控制反馈机制, 并开发一种基于时间驱动的非信标 802.15.4 MAC 仿真器。文献[5]基于 M/G/1 队列系统提出一种 IEEE802.15.4 非时隙 CSMA/CA 数值模型, 用

来分析和获得延迟、丢包和能量等性能指标。文献[6]对非时隙 IEEE802.15.4 网络的吞吐量和延迟性能进行专门分析。文献[7-8]则对多跳 IEEE802.15.4 网络性能进行分析和建模。

然而目前关于 IEEE802.15.4 MAC 方面的研究多是在建模和性能评估等方面<sup>[3-8]</sup>, 对于协议改进和组网机制方面的研究涉及较少, 尤其是对非信标网络组网优化方面的研究更少。文献[9]仅针对 IEEE802.15.4 信标网络的关联过程进行分析改进, 减少了冗余原语和关联延迟, 并通过仿真进行验证。文献[10]为了让移动 Sink 节点快速接入网络, 删除了 802.15.4 MAC 的关联过程。文献[11]对非信标模式传感器网络组网过程进行分析, 通过地址预分配策略省略关联过程从而缩短组网时间; 然而该方法需要在网络部署前对每个节点进行配置, 并不适应自组网的需求, 此外也未分析冲突退避机制对组网的影响。因此本文对基于非时隙 CSMA/CA 随机接入算法的移动传感器网络 MAC 组网流程进行分析和优化, 并对信道接入机制进行改进, 以降低冲突概率, 减少组网时间, 提高组网效率。

## 1 IEEE802.15.4 组网流程

在 IEEE802.15.4 非信标网络下, 协议采用基于非时隙 CSMA/CA 机制随机接入无线信道进行组网和通信。组网节

收稿日期: 2013-04-12; 修回日期: 2013-05-30。

**作者简介:** 黄亮 (1985-), 男, 湖北孝感人, 博士研究生, 主要研究方向: 无线自组网、无线传感器网络; 王福豹 (1963-), 男, 山西运城人, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向: 计算机网络、无线通信网络; 马超 (1978-), 男, 宁夏中卫人, 博士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络; 杨晗 (1988-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线传感器网络路由协议。

点分为协调器和终端节点两类,协调器用于建立网络,包括配置信道和个域网(Personal Area Network, PAN)、分配地址等,并作为网络中心控制网络通信,终端节点搜索并加入网络。这种集中式的组网策略便于网络维护和安全认证。对终端节点来讲,入网流程包含主动信道扫描和关联过程两个阶段,其流程如图 1 所示。

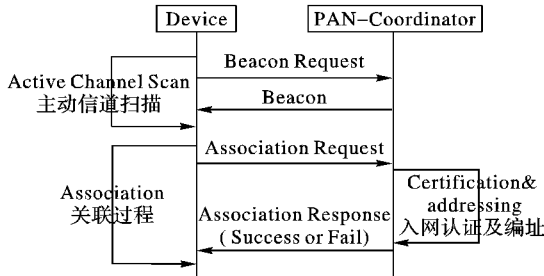


图 1 节点入网过程

主动信道扫描用于搜索协调器;关联过程用于终端节点向协调器发送入网请求,协调器对其进行认证和编址。信道扫描和关联机制为 802.15.4 网络提供了基本的自组织和自恢复能力。

## 2 组网时间分析

### 2.1 信道接入时间

IEEE802.15.4 非信标网络采用非时隙 CSMA/CA 机制接入信道,可用一个随机过程  $\{X(t); t \geq 0\}$  来描述某节点在  $t$  时刻所处的状态:

$$X(t) = \begin{cases} \text{Idle,} & \text{节点在 } t \text{ 时刻处于空闲状态} \\ \text{Backoff,} & \text{节点在 } t \text{ 时刻处于回退状态} \\ \text{CCA,} & \text{节点在 } t \text{ 时刻进行信道检测 (1)} \\ \text{Turnaround,} & \text{节点在 } t \text{ 时刻进行收发切换} \\ \text{Tx,} & \text{节点在 } t \text{ 时刻发送数据包} \end{cases}$$

节点在接入信道时,所处的状态可能是  $\{\text{Backoff, CCA, Turnaround}\}$ 。其中空闲信道评估(Clear Channel Assessment, CCA)用来检测信道空闲或忙,其长度为  $8T_s$  (符号周期)。非时隙 CSMA/CA 采用两个变量  $NB$  和  $BE$  来调度信道接入过程,  $NB$  是 CSMA/CA 算法回退次数,  $BE$  是退避指数,表明节点每次回退等待的时间,在完成退避后进行下一次 CCA 检测。非时隙 CSMA/CA 冲突避免信道接入算法的流程可概括为如下几步:

1) 初始化  $NB$  和  $BE$ :  $NB$  初始化为 0,  $BE$  设置为  $macMinBE$ , 默认值为 3。

2) 随机退避冲突: 节点在接入信道之前等待一个随机整数长度的退避周期, 其范围为  $[0, 2^{BE} - 1]$ , 单位回退周期 ( $aUnitBackoffPeriod$ ) 为  $T_{UB} = 20T_s$ 。

3) CCA 检测: 如果信道 Busy 则转到第 4) 步; 如果信道 Idle, 则转到第 5) 步。

4) 信道忙 Busy: 回退次数  $NB$  和退避指数  $BE$  加 1 ( $BE \leq macMaxBE$ ), 如果  $NB$  小于或等于  $macMaxCSMABackoffs$ , 则 CSMA/CA 算法跳转到步骤 2) 重新接入信道, 否则接入失败。

5) 信道空闲 Idle: 接入成功, 节点发送数据。

$macMinBE$  取值范围为  $[0, macMaxBE]$ , 默认值为 3,  $macMaxBE$  取值范围为  $[3, 8]$ , 默认值为 5。  $macMaxCSMABackoffs$  取值范围为  $[0, 5]$ , 默认为 4。由文献 [4] 可知  $macMinBE, macMaxBE, macMaxCSMABackoffs$  在默认配置 (3, 5, 4) 时 CSMA/CA 性能最佳。假设信道为空闲状

态,那么最差情况下信道接入时间为:

$$T_{Access} = T_{Backoff} + T_{CCA} + T_{turn} = 2.56 \text{ ms} \quad (2)$$

其中  $T_{Backoff} = (2^3 - 1)T_{UB}, T_{CCA} = 8T_s, T_{turn} = 12T_s$ 。如果信道处于争用状态,可能会多次退避甚至接入失败,延长接入时间。尤其是随着节点密度增加冲突剧增,若因信道冲突退避超时导致信道扫描或关联失败,则要重启信道扫描或关联过程,每次增加数百毫秒延迟。

### 2.2 主动信道扫描

在非信标网络中,待入网终端节点通过主动信道扫描 (Active Channel Scan) 搜索通信范围内的协调器,如图 2 所示。

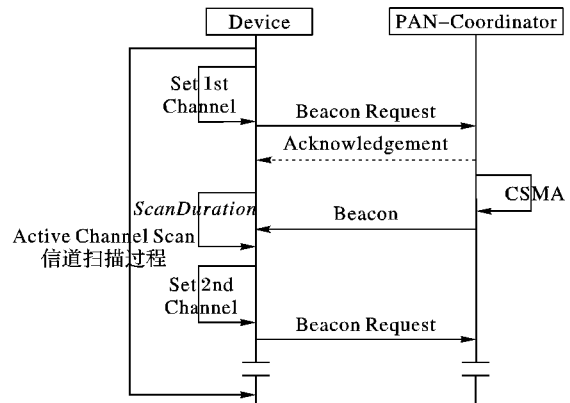


图 2 主动信道扫描过程

对于待搜索的每个逻辑信道,终端节点将射频切换到该信道,发送信标请求命令,然后等待协调器发送信标。由于协调器返回信标帧需要一定时间,终端节点最多等待  $T_{SD}$ , 在此期间若收到信标帧则进入关联过程,若没收到则重新扫描信道。根据 IEEE802.15.4 协议定义知信道扫描时间为:

$$T_{SD} = aBaseSuperframeDuration \times (2^{ScanDuration} + 1) \quad (3)$$

其中:  $aBaseSuperframeDuration$  为 MAC 常量,换算成时间为 15.36 ms;  $ScanDuration$  取值范围为  $[0, 14]$ , 默认值为 3。计算可得单信道扫描时间约为:

$$T_{singleChannel} \approx T_{SD} = 138.24 \text{ ms} \quad (4)$$

IEEE 802.15.4 定义了几个不同的工作频段,每个频段有多个信道。如 2.4 GHz 频段有 16 个信道,默认配置下所有信道全部扫描一次耗时  $T_{2.4G} = 16T_{singleChannel} \approx 2.2 \text{ s}$ ; 900 MHz 频段有 10 个信道,全部扫描耗时  $T_{900M} = 10T_{singleChannel} \approx 1.38 \text{ s}$ 。

### 2.3 关联过程

终端节点完成主动信道扫描后,需要与协调器关联成功方能加入网络。如图 3 所示,终端节点向协调器发送关联请求消息,协调器收到该消息之后返回一个 ACK 应答。协调器需要判断当前 PAN 是否允许容纳该节点,且必须在  $T_{RW}$  时间内做出决定:若协调器有足够的资源,在认证后给该节点分配一个网络地址,同时返回关联应答消息;如果协调器没有足够的资源,那么返回关联失败。

终端节点收到 ACK 应答后,等待  $T_{RW}$  时间,然后终端设备需主动发送数据请求消息,从协调器那里获得关联应答。协调器在收到数据请求后返回关联响应消息。若终端节点在等待  $T_{RW}$  时间后未收到协调器返回的关联成功响应,则关联失败。这里关联响应命令通过间接传输方式发送给终端节点。

由以上分析可知关联过程所需时间约为:

$$T_{Associate} \approx T_{RW} = 32 \times aBaseSuperframeDuration = 491.52 \text{ ms} \quad (5)$$

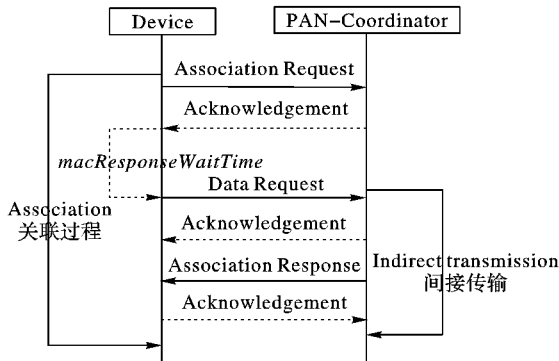


图 3 关联过程

### 3 快速组网机制

#### 3.1 缩短信道扫描过程

由前文可知,全部信道扫描耗时过长,为减少组网时间,一方面可预先指定信道,节省大量无效扫描时间,文献[11]通过实验对此进行了验证;另一方面可缩短单个信道的扫描周期,如将扫描周期  $ScanDuration$  从 3 减少为 2,单信道扫描时间从 138.24 ms 缩短到 76.8 ms,可节省 61.44 ms。

#### 3.2 缩短关联过程

IEEE802.15.4MAC 的关联过程采用间接传输的消息传递方式,发送关联请求的节点需要等待  $T_{RW}$  之后主动请求协调器发送关联应答,等待时间长达 491.52 ms,严重影响节点组网效率。本文采用直接传输方式进行关联应答,入网节点向 PAN 协调器发送关联请求,协调器在接收并判定完毕后立即返回关联应答消息,无需等待  $T_{RW}$  时间,从而缩短关联过程。改进的关联过程如图 4 所示。

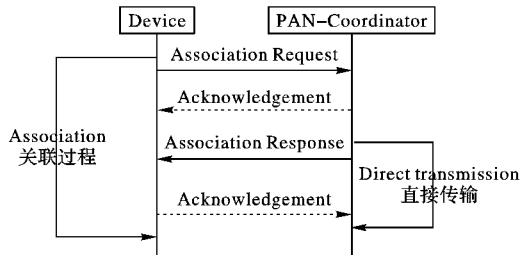


图 4 改进的关联过程

#### 3.3 减少 CSMA/CA 冲突

信道冲突通常会导致传输失败,如能够有效降低信道扫描或关联过程中冲突发生的概率,则可减少甚至避免重复扫描信道或关联,从而节省大量时间。

通常 CSMA/CA 协议容易发生两类冲突:一是由隐藏终端导致的冲突,二是两个节点选择相同的回退周期导致冲突。由于没有采用握手机制,IEEE802.15.4 协议目前无法完全避免这两类冲突。然而,协议中还存在另外两种容易被忽略的信道冲突:一是 ACK 包与数据包 (ACK-DATA) 冲突,二是数据包与数据包 (DATA-DATA) 冲突<sup>[5]</sup>。

##### 3.3.1 ACK-DATA 冲突

IEEE802.15.4MAC 协议中 CCA 检测信道需占用  $8T_s$ ,而收发周转时间  $T_{turn} = 12T_s$ ,二者重合就会发生冲突。如图 5 (a)所示,两个节点 A、B 相邻,A 向其他某节点发送数据,如果 B 在节点 A 进行收发切换时进行 CCA 检测到信道为 Idle,于是节点 B 经过  $12T_s$  从 CCA 切换到发送状态并发送数据包,

那么 B 发送的数据包就会与 A 接收的 ACK 包发生碰撞。此外,由于 A 未能收到 ACK 应答,会认为此前发送的数据包对方未收到,于是 A 会重复发送对方已接收的数据包。

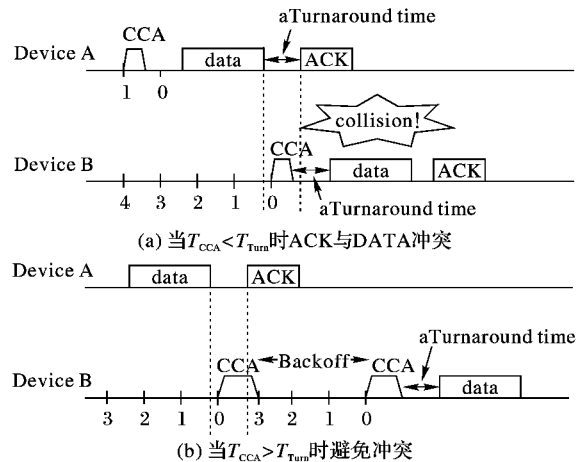


图 5 ACK 与 DATA 包冲突

分析可知,在非时隙 CSMA/CA 协议中,节点完成一次数据包发送过程所需的总时间为

$$T = T_{CCA} + 2 * T_{turn} + T_{Data} + T_{ACK} \quad (6)$$

则 ACK 与 DATA 包冲突发生的概率为

$$P = \begin{cases} (T_{turn} - T_{CCA})/T, & T_{CCA} < T_{turn} \\ 0, & T_{CCA} \geq T_{turn} \end{cases} \quad (7)$$

显然,通过延长 CCA 检测时间,使 CCA 检测时间大于收发器切换周转时间,即  $T_{CCA} > T_{turn}$ ,可有效避免此类冲突,如图 5(b)所示。

##### 3.3.2 DATA-DATA 冲突

当两个节点的 CCA 启动时间间隔  $\Delta t$  小于收发切换周转时间,即  $\Delta t < T_{turn}$ ,则会发生 DATA-DATA 包冲突,如图 6 所示。在非时隙 CSMA/CA 协议中,这种数据包与数据包冲突发生的概率为:

$$P = T_{turn}/T \quad (8)$$

由于周转时间  $T_{turn}$  较短,这类冲突发生的概率较低。此外,延长 CCA 检测时间也可降低此类冲突发生的概率。

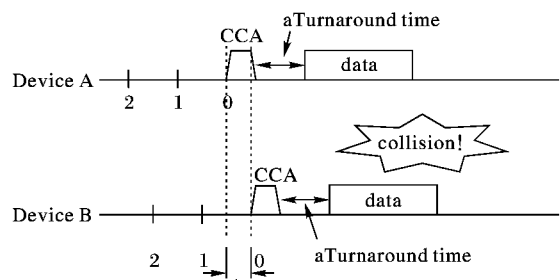


图 6 DATA 包发送冲突

## 4 实验及结果分析

本文首先通过仿真实验验证 MAC 快速组网策略对降低系统组网时间的贡献,然后在现场实验验证其在真实应用中的有效性。

### 4.1 仿真实验结果

在 NS2 网络仿真平台下,在 10 m × 10 m 的仿真区域中部署 15 个节点组建星型网络,分别采用 802.15.4MAC 和本文提出的快速组网 MAC 机制进行比较实验。

鉴于文献[9]对信道预分配策略已进行分析和验证,这里不再重复研究和讨论。实验预分配信道 11, *ScanDuration* 参数配置为 2, 单信道扫描时间最长为 76.8 ms, *macMinBE*、*macMaxBE*、*macMaxCSMABackoffs* 等参数默认配置(3,5,4)。

仿真实验结果如图 7 所示。采用改进 MAC 协议 15 个节点组网时间约 1 s, 而 802.15.4 MAC 组网则需 10 s 以上, 相比组网时间极大地缩短, 组网效率提高 90% 以上。此外, 在 CCA 分别为  $8T_s$  (CCA = 8) 和  $16T_s$  (CCA = 16) 下进行对比实验, 结果表明当组网节点数量较少时两种情况下的效果相差不多, 随着组网节点数量的增加, CCA = 16 时系统组网所耗时间更短。

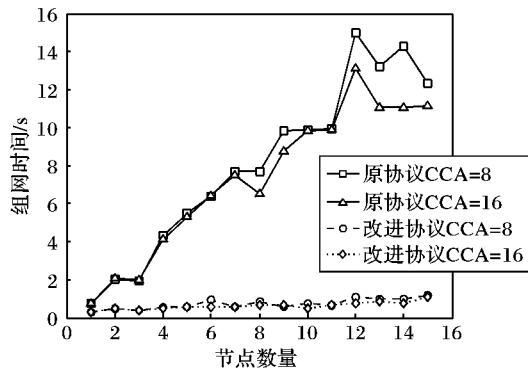


图 7 NS2 仿真实验组网时间对比

#### 4.2 节点实验结果

本文采用 Atmel 公司的 ATZB-900-B0<sup>[12]</sup> 节点进行现场节点实验。该节点包含一个 Atmega1281L 的 MCU 和 AT86RF212 射频模块, 射频可工作在 700/865/915 MHz 频段, 最高支持 1000 Kb/s 的物理层传输速率。实验在 10 m × 10 m 的室内环境下部署 15 个网络节点组建星形网络, 分别采用 IEEE 802.15.4 协议栈和本文的快速组网策略进行比较实验。实验参数配置如表 1 所示。

表 1 节点实验参数配置

参数	取值
节点数量	15
RF 频率	915 MHz
预分配信道	Channel 1
通信速率	1 000 Kb/s
发射功率	4 dBm
<i>ScanDuration</i>	2
<i>macMinBE</i>	3
<i>macMaxBE</i>	5
<i>macMaxCSMABackoffs</i>	4

实验按照组网节点数量的不同分别开展测试, 比较 IEEE 802.15.4 MAC 和改进 MAC 机制的组网时间, 每项测试进行 10 次取平均组网时间。

实验结果图 8 所示, 采用 802.15.4 MAC 协议时组网时间随节点数量增多呈阶梯状上升, 而采用改进 MAC 协议的组网时间明显缩短, 15 个节点的组网时间在 1 s 以内, 而 802.15.4 标准协议组网时间则需数秒。

#### 5 结语

本文提出一组移动无线传感器网络快速组网 MAC 优化策略, 通过缩短信道接入时间, 简化关联过程, 改进 CSMA/CA

机制减少信道冲突, 极大地缩短了节点的入网时间。仿真实验和节点实验均证明提出的快速组网策略可提高系统组网效率 90% 以上, 可有效降低系统组网时间, 更好地满足紧急部署和快速自恢复网络需求。在本文工作基础上, 下一步研究多跳网络条件下的退避延迟优化和安全接入等问题。

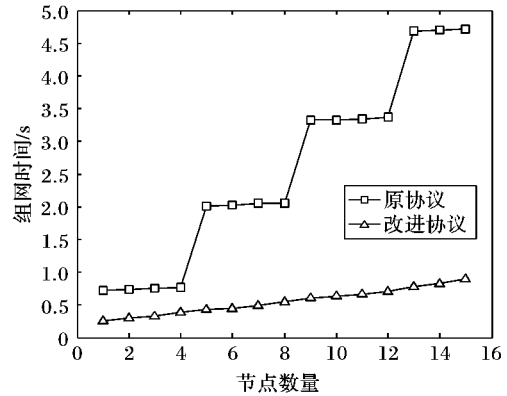


图 8 Zigbit 节点实验组网时间对比

#### 参考文献:

- [1] 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[S]. Piscataway: IEEE, 2006.
- [2] WONG C M, LEE B H. An Improvement of slotted CSMA/CA algorithm in IEEE 802.15.4 medium access layer[J]. *Wireless Personal Communications*, 2012, 63(4): 807 - 822.
- [3] GOYAL M, ROHM D, XIE W, et al. A stochastic model for beaconless IEEE 802.15.4 MAC operation[J]. *Computer Communications*, 2011, 34(12): 1460 - 1474.
- [4] LAUWENS B, SCHEERS B, van de CAPELLE A. Performance analysis of unslotted CSMA/CA in wireless networks[J]. *Telecommunication Systems*, 2010, 44(1/2): 109 - 123.
- [5] KIM T O, PARK J S, CHONG L H, et al. Performance analysis of IEEE 802.15.4 non-beacon mode with the unslotted CSMA/CA [J]. *IEEE Communications Letters*, 2008, 12(4): 238 - 240.
- [6] LATRÉ B, de MIL P, MOERMAN I, et al. Throughput and delay analysis of unslotted IEEE 802.15.4 [J]. *Journal of Networks*, 2006, 1(1): 20 - 28.
- [7] MARCO P D, PARK P, FISCHIONE C, et al. Analytical modeling of Multi-hop IEEE 802.15.4 networks [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2012, 61(7): 3191 - 3208.
- [8] FEO E, CARO G A D. An analytical model for IEEE 802.15.4 non-beacon enabled CSMA/CA in multihop wireless sensor networks, DSIA-06-11[R]. Lugano, Switzerland: [s. n], 2011.
- [9] ZHANG F, WANG F, DAI B, et al. Performance evaluation of IEEE 802.15.4 beacon-enabled association process[C]// *Proceedings of 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Piscataway: IEEE, 2008: 541 - 546.
- [10] CHEN C, MA J. Simulation study of AODV performance over IEEE 802.15.4 MAC in WSN with mobile sinks[C]// *Proceedings of the 21nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Piscataway: IEEE, 2007: 159 - 164.
- [11] 孟繁亮, 韩毅刚. IEEE802.15.4 在快速组网中的研究和实现 [J]. *南开大学学报*, 2010, 43(3): 61 - 65.
- [12] Atmel Corporation Ltd. ZigBit™ 700/800/900 MHz wireless modules ATZB-900-B0 datasheet [EB/OL]. [2009-06-01]. <http://www.atmel.com/Images/doc8227.pdf>