

一种高吞吐量的无线传感器网络多信道 MAC 协议

金枫, 郑辑光, 曹建福, 孙东旭

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对工业现场环境下无线传感器网络易受干扰而导致可靠性和吞吐量降低的问题, 提出了一种基于单接口的多信道 MAC 层协议. 该协议针对分簇式网络, 采用改进的 MMSN 算法为各簇分配簇内通信基础信道, 保证网内任意相邻簇信道互异, 避免邻簇间的干扰, 并在通信过程中根据实际信道质量和干扰强度动态分配簇内节点的通信信道, 在抵御干扰的同时提高了信道的利用率. 仿真结果表明, 相比传统的 MAC 协议, 该协议能有效提高无线传感器网络的吞吐量和抗干扰性.

关键词: 无线传感器网络; 多信道; 吞吐量; MAC 协议

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)12-0032-06

A High Throughput Multi-Channel MAC Protocol for Wireless Sensor Networks

JIN Feng, ZHENG Jiguang, CAO Jianfu, SUN Dongxu

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A single interface based multi-channel MAC protocol (SIMC) is proposed to avoid the decrease of wireless sensor networks' throughput and reliability caused by variable interferences in industrial environment. SIMC protocol achieves distributed network management by clustering. The cluster head nodes construct the fixed channel network with the improved MMSN algorithm, which ensures the difference of each adjacent cluster's channel. During the communication, cluster nodes switch channels based on the current channel's actual quality and interference intensity to resist external interference and improve the channel utilization rate. The simulation results show that the SIMC protocol can effectively increase WSN's anti-interference ability and throughput in comparison with traditional MAC protocol.

Keywords: wireless sensor networks; multi-channel; throughput; MAC protocol

无线传感器网络(WSN)是一种短距离、低功耗的无线通信网络,近年来在军事、医疗、社区安保及环保监测等领域得到了迅猛发展,但在工业测控领域中,由于现场大型设备及其他无线设备常存在很强的电磁干扰,而且工业测控对网络实时性和吞吐量要求很高,现有 WSN 系统在这些方面还难以保证,目前并未得到普遍的应用.因此,研究高可靠性、高吞吐量的 MAC 协议是非常重要的.

目前 WSN 的 MAC 协议大体分为两类:一类为传统的单信道协议,即整个网络共用同一信道进行数据传输,如 S-MAC、T-MAC 等^[1],该类协议对

节点计算能力要求较低,便于实现,但吞吐量和信道利用率低,抗干扰能力差,易产生冲突导致较高的丢包率;另一类为多信道协议,即采用多个物理信道传输数据,可以有效提高数据的吞吐能力^[2],如 MMSN^[3]、TMCP^[4]、TFMAC^[5]及 DCA-PC^[6]等.但是,现有这些协议大多采用固定信道模式,信道一经选定,就不能随时更改,对突发的干扰抵抗能力有限,而且其中一些还要求节点配备多个射频收发模块.文献[7]提出了一种单接口的动态信道分配 MAC 协议 MMAC,但 MMAC 要求所有节点在每次发送数据前须切换至统一控制信道,通过 3 次握

手选定信道后才能进行通信,同时要求所有节点保持严格的时间同步,这在具体应用时实现难度较大,并不十分适用于工业测控 WSN.

本文提出一种基于单接口的高吞吐量 WSN 多信道 MAC 协议(SIMC).该协议以接包率的预测值评价信道质量,利用滑动阈值信道选择算法实现固定信道和动态信道的统一分配,能够在复杂的现场环境下以较低的切换频率保证通信的可靠性和数据的吞吐量.

1 工业测控无线传感器网络描述

1.1 网络拓扑结构

工业测控无线传感器网络采用分簇的路由结构,簇内为一跳网络,每簇至多 63 个簇内节点,邻簇簇首节点间可以实现一跳通信.各节点配置一枚同型号的半双工无线射频模块,同一时间只能完成单一信道的收/发任务,射频模块可以在 200 μs 内完成跳频,有效通信半径为 10~40 m 且通信链路对称.一跳邻节点可以实现时间同步.

1.2 工业现场环境下干扰对信道质量的影响

WSN 在进行无线通信时,周边大型电机的邻频辐射以及外围移动装置(如手机、蓝牙)等会产生较强电磁脉冲噪声,对数据传输造成严重的通信干扰,严重降低网络的吞吐量和数据传递率.已有研究^[8-10]表明,使用 802.11b/g(wifi)协议的移动设备是 WSN 的干扰源之一,图 1 是 802.15.4 和 802.11b/g 在 2.4 GHz 频段的信道分布,对于重叠频道,室内 802.11b/g 设备的辐射功率是 802.15.4 设备的 10 到 100 倍,而在室外将达到 400 倍,这将严重降低 WSN 的通信质量.图 2 为部分 WSN 信道在引入 NETGEAR 无线路由器前后的接包率积累分布函数曲线,信道 22 和 26 的接包率在加入路由器后显著降低.类似地,IEEE 802.15.1(蓝牙)和常见的微波设备都会对 WSN 造成类似的干扰,而且无线信号传输过程中的多径效应和多普勒效应以及信道间的干扰也会影响信道的链路质量,继而造成信道拥塞,降低数据吞吐量,而且大量的重传还会过度耗能,从而导致网络寿命的降低.

2 多信道 MAC 协议

2.1 多信道 MAC 协议设计思路

为提高 WSN 可靠性及数据吞吐量,本文设计了一种动、静态分配相结合的多信道 MAC 协议,该协议利用了 IEEE 802.15.4 在 2.4 GHz 频段的 16

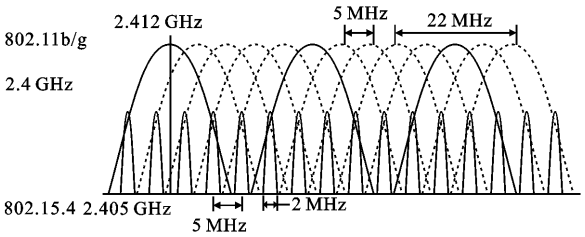


图 1 802.15.4 及 802.11b/g 的信道分布

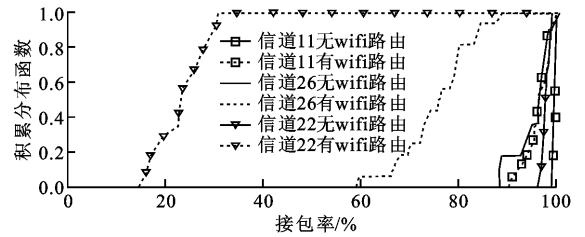


图 2 信道 11、22、26 的接包率积累分布函数曲线

个信道.本文采用 LEACH 协议^[11]将 WSN 划分成由多个节点簇构成的分布式网络,簇间相互独立,无重叠节点,整个网络的通信周期分为簇间通信与簇内通信两个阶段.各簇簇首节点形成第一层多跳网络,各簇簇内节点形成第二层一跳网络,通信流程如图3所示.簇首层负责各簇内信息向基站的汇总及

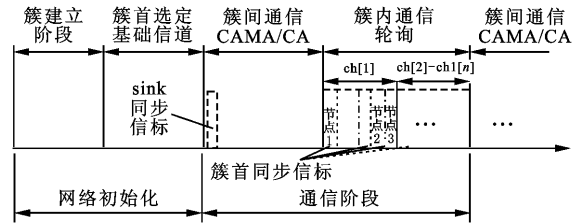


图 3 多信道 MAC 协议的通信流程

各种指令的下达,同时完成各簇基础网络的固定信道分配,簇首间采用 CSMA 模式进行通信.簇内网络采用动态信道分配,完成各节点的数据采集及指令实施,基于轮询模式进行通信.在时间同步方面,汇聚节点在簇间通信通过 sink 同步信标,它负责簇首层时间同步及矫正;簇首在簇内通信通过簇首同步信标,它负责簇内节点时间同步及矫正.在簇内通信过程中,节点会根据信道的实际信道质量进行选择,受干扰影响严重的信道会被剔除出网络,直至干扰消失.在接收器能量探测(RSSI/LQI)的基础上,引入节点接包率阈值,以增强信道质量的探测精度.接包率定义为

$$P = \frac{h}{\mu T} \tag{1}$$

式中: μ 为发包速率; h 为 T 时间内实际收到的包数; P 是一段时间内接收器成功收到的包数占发送器已发送包数的比例, 在低速长数据周期应用中, P 对信道质量的预测较 RSSI/LQI 更为稳定、准确。

2.2 固定信道分配

固定信道分配应用于簇首的网络初始化过程。由于网络分簇后, 各簇主体之间有一定距离, 故只要保证相邻簇间使用不同信道即可避免簇间的相互干扰。另外, 多信道方式也可避免固定频段的干扰源造成整个网络的瘫痪。文献[3]提出一种 Implicit-Consensus 算法进行簇间的信道分配, 这种算法要求各节点获得两跳的邻居节点信息后, 使用随机数生成器获取自己的信道。这种方法的不足之处在于信道选择有效性低, 耗时较长, 且当 WSN 规模较大时, 要求第 2 跳邻节点信道互异难以得到满足。

考虑到对 WSN 进行分簇后, 单簇的簇数远小于原网络的节点数, 且邻簇之间空间间隔较大, 两跳邻簇间不会发生相互干扰, 本文以单簇替代 Implicit-Consensus 算法中的节点, 故只需保证一跳邻簇使用不同信道即可, 因此信道数目需求大大降低, 而且 IEEE 802.15.4 在 2.4 GHz 频段定义的 16 个无线信道完全可以满足要求。这种方式与随机分配相比, 可以用有限次竞争完成信道分配, 同时也解决了单纯的 ID 号映射信道序号机制所存在的一跳邻簇信道重叠问题。

各簇首节点使用相同的竞争机制, 保证只需掌握信道序列及所有一跳邻簇首的 ID 号, 即可完成信道竞争。为了简化竞争过程, 减少组网时间, 本文在以邻簇代替邻节点来限制信道数量需求的基础上, 直接比较簇首 ID 来决定信道竞争结果。信道分配标准如下

$$D_n =$$

$$F_j, \quad (ID_n = \min\{ID_n, ID_{n1}, ID_{n2}, ID_{n3}, \dots\}) \quad (2)$$

式中: D_n 为簇首 n 分配到的信道序号; F_j 为本轮待分配的信道序号。若簇首 n 的 ID_n 小于所有邻簇簇首的 ID_n , 则簇首 n 获得信道 F_j 作为簇内通信基础信道。此方法可有效减少运算复杂度, 并通过 ID 的唯一性保证了每轮分配的有效性, 避免了 Implicit-Consensus 中由生成器非单调性造成的伪随机码重叠问题。固定信道分配算法描述如下。

步骤 1 初始化各参数。按信道序号 F_j 升序排列信道; 簇首创建一跳邻簇首 ID 表 $\{ID_{n1}, ID_{n2}, \dots, ID_{n3}, \dots\}$ 。

步骤 2 接收一跳邻簇首广播, 自邻簇首列表删除

已选定信道的簇首。

步骤 3 判断竞争结果。竞争标准如式(2)所示, 若簇首竞争成功, 执行步骤 5; 否则, 执行步骤 4。

步骤 4 $j = j + 1$, 返回步骤 2, 开始下一轮信道竞争。

步骤 5 退出竞争。簇首 ID_n 获得 F_j 作为簇内通信的基础信道并广播竞争结果。

2.3 动态信道分配

虽然信道分配后簇间通信互不干扰, 但在工业测控应用中, 各种突发的局部干扰仍会影响特定频段内信道的通信质量, 甚至导致节点通信中断。故本文在簇内通信阶段, 以信道接包率预测值为分配标准, 实现低频率动态信道分配来增强 WSN 的抗干扰能力。此处待分配信道为簇首与受扰的簇内节点间的通信信道, 其余节点仍在基础信道与簇首进行通信。

每个簇首节点维护一个动态的信道列表 $F[j_{\max}]$ 。该列表保存所有可供簇首节点选择的信道, 需满足以下要求: ①列表中信道不能与任一邻簇基础信道相同, 防止与邻簇边缘节点产生隐藏/暴露终端问题; ②列表初始化按信道序号升序排列, 其中与邻簇基础信道频差最大的信道置于最前端, 保证最小簇间干扰信道优先使用; ③被淘汰信道按接包率降序置于列表末尾, 避免短时间内受扰严重信道二次使用; ④列表实时调整, 在所有信道都有接包率记录后, 列表按接包率降序排列。采用有序列表虽然增加了系统的内存开销, 但相比随机选择分配信道, 不仅增加了分配的针对性, 减少了无效分配, 还使得簇内信道相对集中, 更加便于管理, 而相比 MMAC 中控制信道协商的方式, 也减少了通信开销和系统时延。

簇首节点计算各簇内节点在其当前信道的接包率值, 对于发包速率高的节点, 直接采用接包率统计值评估信道质量, 对于数据交换率较低的节点采用 EWMA(Exponentially-Weighted Moving Average) 预估器得到接包率的预测值进行评估。EWMA 算法如下

$$P_t(m, F_j) = \frac{h_t(m, F_j)}{H_t(m, F_j)} \quad (3)$$

$$E_t(m, F_j) =$$

$$\sigma E_{t-1}(m, F_j) + (1 - \sigma) P_t(m, F_j) \quad (0 < \sigma < 1) \quad (4)$$

式中: $h_t(m, F_j)$ 为 t 时间内簇首 n 在信道 F_j 上收到的来自节点 m 的包数; $H_t(m, F_j)$ 为 t 时间内节点 m

在信道 F_j 上发给簇首 n 的包数; $P_t(m, F_j)$ 为簇首 n 在信道 F_j 上对节点 m 的接包率统计值; $E_t(m, F_j)$ 为本次的接包率预测值; $E_{t-1}(m, F_j)$ 为前一次的接包率预测值; σ 为权重系数. σ 起到调节 EWMA 预估器的作用: σ 越大, 平稳性越强, 即 $E_{t-1}(m, F_j)$ 的主导作用越强, $E_t(m, F_j)$ 变化越缓慢同时也更稳定; σ 越小, 灵敏度越强, 即 $P_t(m, F_j)$ 的主导作用越强, $E_t(m, F_j)$ 对 $P_t(m, F_j)$ 变化越敏感. 采用 EWMA 预估器, 可以在评估信道质量时提高预测准确性, 降低突发误差和误码对长通信周期节点预测的影响. 在实际应用中, 可以通过调节 σ 满足不同场合 (数据发送周期) 的需要.

接包率预测值可以反映信道的实际质量, 当接包率预测值过低时, 表示该信道遇到了严重的干扰, 质量变差, 此时簇首应为受影响节点重新分配信道. 由于无线射频模块在切换信道时会产生相应的时延, 如 CC2420 在 2.4 GHz 的频段上从当前信道跳频至一个新的信道最多会产生 $48\ \mu\text{s}$ 的延迟^[12], 这在高速传输过程中是一个不可忽略的量值, 而且切换过于频繁还会导致功耗的增加, 所以信道分配频率不可过高. 在工业现场往往出现瞬间的噪声 (电磁设备启动, 移动通信设备等) 导致信道质量突然下降, 但短时间内噪声消失、信道质量迅速恢复的情况, 如果这种情况下受扰节点盲目地进行了信道分配, 不仅不能有效提高 WSN 的整体性能, 而且还增加了通信的时延和能量消耗, 浪费了有限的信道资源.

为了减少此类无效切换的发生, 本文采用了一种滑动阈值信道选择算法 (STCS).

步骤 1 设定参数初始值. 质量差计数 $n_{\text{bad}}=0$, 阈值 $N=N_{\text{low}}$, 当前信道 $F=D_n$.

步骤 2 接包后计算接包率预测值. 在簇首接收到来自簇内节点 m 的数据包后, 按式 (3)、式 (4) 计算接包率预测值 $E_T(m, F)$.

步骤 3 判断信道质量. 若接包率预测值小于门限值 ($E_T(m, F) < E_{\text{TH}}$), 信道质量差, 执行步骤 4; 否则, 信道质量好, 执行步骤 6.

步骤 4 信道分配判定. 首先记录信道质量差次数, n_{bad} 加 1. 若 $n_{\text{bad}} < N$, 质量在容忍范围内, 返回步骤 2; 否则, 执行步骤 5.

步骤 5 信道分配. 以 $E_T(m, F)$ 标记当前信道的接包率, 重新排序 $F[j_{\text{max}}]$. 指定新信道 $F=F[1]$, 向节点 m 发布信道分配命令, 复位 $n_{\text{bad}}=0$, $N=N_{\text{low}}$. 返回步骤 2.

步骤 6 增加信道容忍度, 阈值滑动. 复位 n_{bad} 并在 $[N_{\text{low}}, N_{\text{high}}]$ 内向上限滑动 N .

STCS 程序流程如图 4 所示. 该算法可以在保证高可靠性高吞吐量的同时, 有效降低信道分配的频率和盲目性.

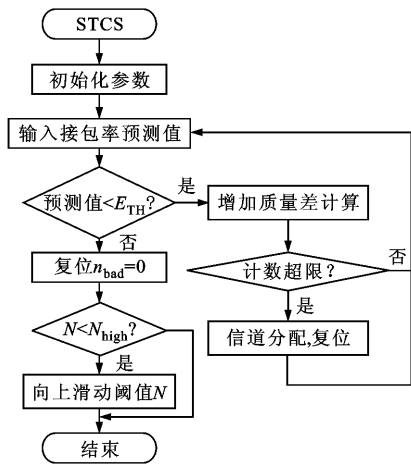


图 4 STCS 算法

簇首在启动动态分配进程后, 于当前信道向目标节点发布信道分配命令, 目标节点收到信道分配命令后, 发送分配确认并调整信道, 待簇首收到节点分配确认后, 便可于新信道与目标节点进行数据交换. 分配流程如图 5 所示. 由于动态信道分配是针对簇首与簇内某一节点而言, 所以在复杂的干扰环境中, 每一簇内都会有工作在不同信道的节点. 为了进一步降低簇首的跳频频率, 簇内通信采用轮询机制, 簇首轮询顺序安排原则如下: ①使用相同信道的节点排列在一起待询; ②使用簇内基础信道的节点优先进行数据交换; ③使用簇间控制信道的节点最后

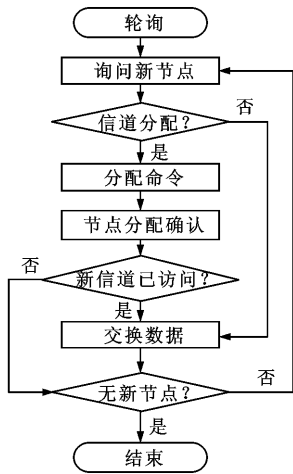


图 5 簇内节点信道分配流程

进行数据交换;④其余信道按节点数目降序排列;⑤某节点完成信道分配后,若新信道待询位置在原信道后,该节点自动排入新信道序列,否则直接完成数据交换。

3 网络协议仿真与性能分析

本文使用 NS-2(NS2. 33 版本)网络模拟器进行仿真实验。在实现 SIMC 协议的基础上,对单信道 IEEE 802. 15. 4 和多信道 MMAC 协议,从吞吐量及数据包投递率两个方面进行了对比分析。

3.1 无线传感器网络系统参数

仿真参数设置如表 1 所示。Propagation 模型采用引入了障碍物反射等多径效应的 Shadowing 模型,同时定性地引入邻频干扰源(对接收功率和信噪比产生影响),模拟实际干扰环境。EWMA 权重系数 $\sigma=0.1$ (仿真过程中发包速率较实际应用高,以加重实际接包率的影响), $E_{TH}=0.88$ 。IEEE 802. 15. 4 和 MMAC 采用相同的拓扑结构,其中 IEEE 802. 15. 4 用协调节点替换簇首节点,组成与 SIMC 相似的簇树型网络,MMAC 的 ATIM 窗口取 20 ms,信标周期取 100 ms。

表 1 无线传感器网络参数

参数	设置	参数	设置
场景区域	300 m×300 m	控制信道	15 信道
数据流	Exponential	通信距离	15 m
最大速率	250 kb/s	传停比例	1:0.9
包大小	80—250 bytes	频段	2.4 GHz

3.2 性能分析

图 6 给出了 SIMC 协议与单信道 MAC 协议在通信性能上的对比。图 6a 为分别使用 4 个信道、16 个信道的 SIMC 协议和使用 IEEE 802. 15. 4 协议的 WSN 在干扰环境下的汇聚节点吞吐量的比较,可以看出随着簇数的增加,簇间形成多跳网络,控制信

道效率降低,吞吐量较簇首较少时的星形网络逐渐减小,但 SIMC 协议由于在簇内采用多信道机制,故在高负载情况下吞吐量明显优于 IEEE 802. 15. 4 协议。图 6b、图 6c 表明,在两级同步信标和高容忍度 STCS 的机制下,SIMC 由低频信道切换造成的时延不会影响系统的稳定性,而且 SIMC 的多信道轮询解决了信道受扰问题及限制 CSMA/CA 的隐藏/暴露终端问题,故在各种场景下 SIMC 的多信道轮询机制均较 IEEE 802. 15. 4 协议的单信道 CSMA/CA 有更高的包投递率,通信更为可靠。

图 7 为单汇聚节点多数据流的场景中, SIMC 与 MMAC 的性能对比。由于 SIMC 采用两级同步信标并只要求局部时间同步,所以不会像 MMAC 那样由于时钟误差导致 ATIM 窗口漂移,继而造成协商失败、数据包丢失甚至节点脱网。同时, SIMC 采用轮询和 STCS 分配机制,避免了 MMAC 在每次通信前必须进行的 3 次协商通信(ATIM, ATIM-ACK, ATIM-RES),显著提高了通信效率。由图 7 可见,在常用的发包速率范围内, SIMC 在吞吐量方面至少可以获得 14. 1% 的提高。另外,由于簇首数目较少, SIMC 在簇间直接采用控制信道交换数据,汇聚节点无需在不同信道间频繁切换,源节点等待时间减少,丢包率降低,而且 SIMC 以接包率评估信道质量,相比 MMAC 以信道使用次数进行评估的方案,在考虑外部干扰的实际场景中更为有效。图 7b 显示在各种数据流数下 SIMC 的包投递率均高于 MMAC。

4 结 论

本文根据目前无线传感器节点仅配置单一射频模块的特点,设计了一种针对工业测控环境的单接口多信道 MAC 协议——SIMC。该协议以接包率预测信道质量为基础,融合簇间固定信道分配和簇内动态信道分配,保证了干扰环境下 WSN 通信的可靠性。仿真结果表明, SIMC 相比传统的 MAC 协议,

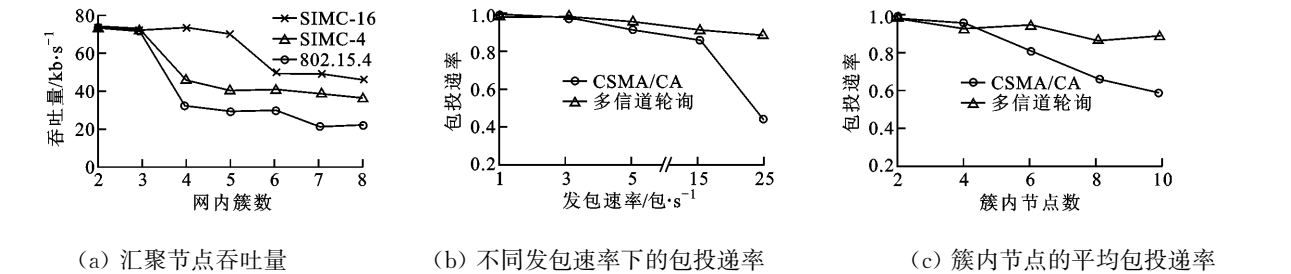
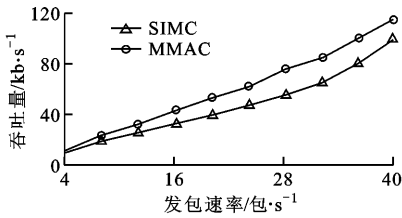
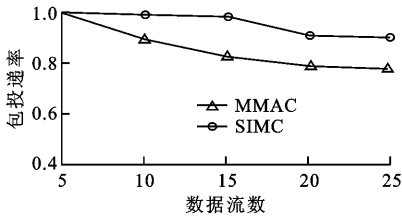


图 6 SIMC 与单信道 MAC 协议通信性能对比

有效提高了 WSN 的吞吐量和接包率,尤其在多种较高速的周期性数据流并发的情况下,可以显著改善 WSN 的通信性能。



(a) 不同速率下吞吐量



(b) 不同数据流数下的包投递率

图 7 SIMC 与 MMAC 协议的性能对比

参考文献:

[1] 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.
JIAN Qiang, Gong Zhenghu, ZHU Peidong, et al. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2008, 19(2): 389-403.

[2] SI Weisheng, SELVAKENNEDY S, ZOMAYA A Y. An overview of channel assignment methods for multi-radio multi-channel wireless mesh networks[J]. Parallel and Distributed Computing,2010,70(5):505-524.

[3] ZHOU Gang, HUANG Chengdu, YAN Ting, et al. MMSN: multi-frequency media access control for wireless sensor networks[C]//The 25th IEEE International Conference on Computer Communication Proceedings. Piscataway, NJ, USA;IEEE Press, 2006:1-13.

[4] WU Yafeng, STANKOVIC J A, HE Tian, et al. Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE INFOCOM 2008. Piscataway, NJ, USA;IEEE Press, 2008:1193-1201.

[5] JOVANOVI M D, DJORDJEVIC G L. TFMAC: multi-channel MAC protocol for wireless sensor net-

works[C]//The 8th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services. Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2007:23-26.

[6] WU Shihlin, LIN Chihyu, TSENG Yuchee, et al. A multi-channel MAC protocol with power control for multi-hop mobile Ad Hoc networks[J]. The Computer Journal, 2002, 45(1):101-100.

[7] SO J, VAIDYA N. Multi-channel mac for Ad Hoc networks; handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver [C]//The 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York, USA;ACM,2004:222-233.

[8] POLLIN S, TAN I, HODGE B, et al. Harmful coexistence between 802. 15. 4 and 802. 11: a measurement-based study[C]//Proceedings of the International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. Piscataway, NJ, USA; IEEE Press, 2008: 1-6.

[9] HERRERA M M, BONASTRE A, CAPELLA JV. Performance study of non-beaconed and beacon-enabled modes in IEEE 802. 15. 4 under bluetooth interference [C]//Proceedings of The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies. USA;IEEE Computer Society,2008:144-149.

[10] XING Guoliang, SHA Mo, HUANG Jun, et al. Multi-channel interference measurement and modeling in low-power wireless networks[C]// Proceedings of The 30th IEEE Real-Time Systems Symposium. Washington, DC, USA; IEEE Computer Society, 2009: 248-257.

[11] HEINZELMAN W R, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]//Proceedings of The Hawaii International conference on System Sciences. Washington, DC, USA;IEEE Computer Society,2000:1-10.

[12] Chipcon AS. CC2420 Datasheet; rev. 1.3 [EB/OL]. (2005-10-03)[2010-07-01]. http://www.engineering.uiowa.edu/~mcover/lab4/cc2420_data_sheet_1_3.pdf.

(编辑 武红江)