

一种无线传感器网络 MAC 层协议设计与实现

石为人 冯会伟 唐云建
(重庆大学自动化学院 重庆 400030)

摘要 针对节点总量不多、通信实时性要求不高的应用环境需求,参照 IEEE802.15.4 协议标准,提出一种高效、低能耗的无线传感器网络 MAC 层协议的设计与实现方法。协议的软件设计主要采用中断控制和函数回调方式,物理层通过对无线收发器的睡眠管理实现低功耗,MAC 层采用时隙 CSMA-CA 机制进行信道管理。网络节点分为普通节点和协调器,普通节点采用 POLL 轮询及睡眠机制,与协调器进行间接数据传输。实验表明,应用系统实现了低能耗和高效率。

关键词 无线传感器网络,协议,802.15.4,低功耗,高效

中图分类号 TP393.04 **文献标识码** A

Design and Implement of Wireless Sensor Network Medium Access Control Protocol

SHI Wei-ren FENG Hui-wei TANG Yun-jian
(College of Automation,Chongqing University,Chongqing 400030,China)

Abstract Referring to the application requirement that node number is not mass and real time communication is not very important,it put forward a high effective and low energy consume requirement of wireless sensor network MAC protocol based on the IEEE 802.15.4 standard. The software mainly makes use of interrupt control and function call-back. The physical layer is provided with the function of wireless transceiver management to support low energy consume. The MAC layer adopts slotted CSMA-CA to carry out the node to access channel. The nodes include common nodes and coordinators. Common nodes adopt poll and sleep mechanism,implement in-direct data transmit with the coordinator. The experiment result shows that the application system achieves the target of low energy consume and high effective.

Keywords Wireless sensor network,Protocol,802.15.4,Low energy consume,High effective

无线传感器网络(WSN)是综合了传感器技术、嵌入式计算技术、分布式信息处理技术和无线通信技术的交叉学科技术,在军事、环境、农业、建筑、智能家居等方面有着广泛的应用,成为信息科学领域一个重要的研究热点。

重点研究无线传感器网络 MAC 协议。在众多的无线传感器网络协议中,IEEE802.15.4 协议标准具有低速率、低功耗和短距离传输的特点,使它非常适宜支持简单器件^[1]。这个标准定义了“物理层”(physical layer)和“介质访问层”(medium access layer),其结构如图 1 所示。物理层(PHY)和 MAC 层通过数据服务访问点(PD-SAP,MACPS-SAP)和管理实体服务访问点(PLME-SAP,MLME-SAP)与上下层交互,提供数据和管理服务。

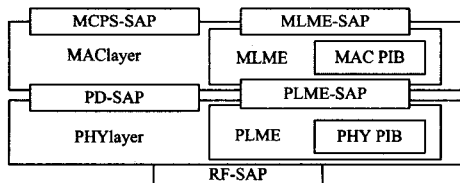


图 1 PHY 和 MAC 结构

802.15.4 标准支持星型和点对点两种网络拓扑结构(如图 2 所示);支持采用带冲突避免的载波侦听多路访问技术(CSMA-CA,Carrier sense multiple access with collision avoidance)的信道访问机制;支持确认(ACK)机制。

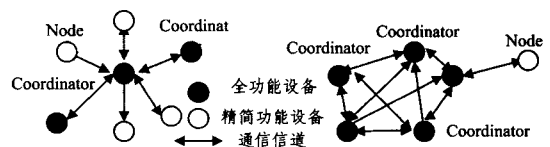


图 2 星型网络和点对点网络

基于 IEEE802.15.4 协议标准的分析与研究,本文提出一种 MAC 层协议设计与实现方法。协议体系主要包括物理层、数据链路层(包括介质访问层 MAC 和逻辑链路层 LLC)、驱动模块和功能函数模块。通过实验验证,本协议低功耗、高效、实用。

1 MAC 通信协议实现

1.1 协议总体构架

本文根据 802.15.4 标准设计的通信协议射频工作在

到稿日期:2008-08-07 返修日期:2008-10-27 本文受教育部博士点基金项目(20060611010),军工专项 JW20 * 27013 资助。

石为人(1948—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络及其应用、信息控制与智能系统、嵌入式系统等,E-mail:wrs@cqu.edu.cn;冯会伟(1981—),女,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络及其应用等;唐云建(1981—),男,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络机器应用等。

433MHz,节点硬件采用 Atmega128L^[5] 作为主控芯片,CC1000^[6]作为射频收发模块芯片。通信距离 1m 到 400m 可调,CC1000 无线收发模块采用 FSK 调制方式,最大数据传输速率为 19.2kbps。

协议体系结构如图 3 所示,主要由物理层、数据链路层(包括介质访问层 MAC 和逻辑链路层 LLC)、驱动模块和功能函数模块组成。

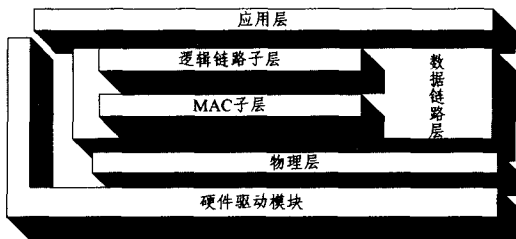


图 3 协议栈体系结构

本文协议设计将网络设备分为 node(精简功能设备)和 coordinator(全功能设备)两类。node 为普通节点,采用 POLL 数据请求和睡眠机制^[7]。没有任务时处于睡眠状态以节约能量,定时醒来向 coordinator 发送 POLL 请求,请求发送数据或接收数据。作为网络协调器的 coordinator 在没有采用时间同步机制时,其射频模块处于常开状态,实时接收 node 发送的数据包,并将要发送到各节点的信息存入 MAC 层任务队列,等待 node 发送 POLL 请求时建立通信链接,再将消息发送给节点。

node 间的数据通过 coordinator 存储转发,coordinator 间可实时通信,两种设备组成星型网络拓扑结构。POLL 机制如图 4 所示。

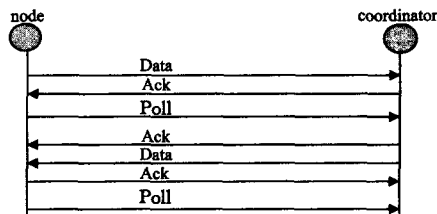


图 4 POLL 机制

协议中软件设计主要采用中断控制方式和函数回调方式,可以大大提高 CPU 利用率并降低节点能耗。

1.2 各层功能实现

1.2.1 物理层

物理层向上与数据链路层相接,通过 PD-SAP 和 PLME-SAP 提供数据服务和命令管理。向下与底层驱动交互,通过 RF-SAP 接口管理射频,具体执行收发数据和管理命令。主要具有如下功能:对无线收发器 CC1000 进行状态管理、空闲信道评估(CCA)、能量检测(ED)、链路质量指示(LQI)、数据发送和接收。物理层数据包格式如表 1 所列。

表 1 物理层包格式

18byte	2	1	0-127
导频字符	同步字节	负载长度	指示负载

物理层发送节点依次发送 18 个导频字符、2 个同步字节、1 个负载长度指示字节和负载数据字节。物理层接收节点只需连续接收到 5 个导频字符就可以表示进入接收状态,然后根据同步字节计算偏移量,接着继续接收后续字节并根

据偏移量进行同步。

(1)PHY 层和 MAC 层接口

PHY 层通过射频固件和硬件提供 MAC 层与物理无线信道接口,还包括数据服务接口 PD_SAP 和管理实体接口 PLME_SAP。

数据服务消息类型:数据发送请求和应答、数据接收指示等,定义如下:

```
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union{
        PD_DATA_request_t PD_DATA_request;
    }MsgData;
}PD_MACPHYMsg_t;
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union{
        PD_DATA_confirm_t PD_DATA_confirm;
        PD_DATA_indication_t PD_DATA_indication;
    }MsgData;
}PD_PHYMACMsg_t;
```

管理实体服务主要包括无线收发信机状态切换、空闲信道评估(CCA)、能量检测(ED)、链路质量指示(LQI)等。管理消息类型:载波侦听请求和应答、能量检测请求和应答、射频状态管理请求和应答等。消息类型定义如下:

```
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union{
        PLME_CCA_request_t PLME_CCA_request;
        PLME_ED_request_t PLME_ED_request;
        PLME_GET_request_t PLME_GET_request;
        PLME_SET_TRX_STATE_request_t
        PLME_SET_TRX_STATE_request;
        PLME_SET_request_t PLME_SET_request;
    }MsgData;
}PLME_MACPHYMsg_t;
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union{
        PLME_CCA_confirm_t PLME_CCA_confirm;
        PLME_ED_confirm_t PLME_ED_confirm;
        PLME_GET_confirm_t PLME_GET_confirm;
        PLME_SET_TRX_STATE_confirm_t
        PLME_SET_TRX_STATE_confirm;
        PLME_SET_confirm_t PLME_SET_confirm;
    }MsgData;
}PLME_PHYMACMsg_t;
```

接口函数如下:

```
uint8_t PD_MsgSend(PD_MACPHYMsg_t * MsgPtr); //接口函数供 MAC 层调用
uint8_t PD_MsgRecive(PD_PHYMACMsg_t * MsgPtr); //接口函数供 PHY 层调用
uint8_t PLME_MsgSend(PLME_MACPHYMsg_t * MsgPtr); //接口函数供 MAC 层调用
uint8_t PLME_MsgRecive(PLME_PHYMACMsg_t * MsgPtr); //接口函数供 PHY 层调用
```

(2)PHY层与底层驱动接口(RF_SAP)

PHY层收到MAC层发送/接收数据等管理消息后,对底层进行操作,接口函数如下:

```
result_t RadiocontrolInit(void); // 射频初始化
result_t RadiocontrolSleep(void); // 射频进入睡眠
uint8_t RadiocontrolRxOn(void); // 射频进入接收状态
uint8_t RadiocontrolTxOn(void); // 射频进入发射状态
result_t RadiocontrolCarrierSenseStart(void (* CallBack)(uint16_t result)); // 射频进行一次载波侦听,侦听完成回调 CallBack 指向的函数。
uint8_t RadioncontrolSendMsg(void (* CallBack)(void)); // 射频发送侦听数据
.....
```

1.2.2 数据链路层

数据链路层由媒介访问控制子层 MAC 和逻辑链路子层 LLC 组成。MAC 层主要完成采用时隙 CSMA-CA 机制将节点接入信道,LLC 层采用 POLL 轮询机制在 node 与 coordinator 间进行通信。

(1) MAC 层

①MAC层数据包格式

MAC 层包格式如表 2 所列。

表 2 MAC 层包格式

2byte	1	2	2	2	2	1	0-113	2
控制标志	序列号	源网络地址	源节点地址	目的网络地址	目的节点地址	负载长度指示	负载	校验

控制标志 2 个字节,为以后扩展预留。在此只包括帧类型,分为 Data, PollRequest, PollConfirm。序列号是 MAC 层唯一的序列标识符,用于帧确认和重发;源网络地址代表帧发送方的网络标识符;源节点地址代表发送方网内的设备地址;目的网络地址代表帧接收方的网络地址;目的节点地址代表接收方网内的设备地址。负载长度指示给出负载长度,负载根据内容长度可调。对负载采用 CRC 校验,占用 2 个字节,附在负载后面。

②MAC层与 LLC 层接口

MAC 层与 LLC 层接口包括数据服务接口 MCPS_SAP 和管理实体服务接口 MLME_SAP。

数据服务消息包括数据发送请求和应答、数据接收指示。类型定义如下:

```
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union {
        MCPS_DATA_request_t MCPS_DATA_request;
    }MsgData;
}MCPS_NWKMACMsg_t;
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union {
        MCPS_DATA_confirm_t MCPS_DATA_confirm;
        MCPS_DATA_indication_t MCPS_DATA_indication;
    }MsgData;
}MCPS_MACNWKMsg_t;
```

管理实体服务消息包括: POLL 请求和应答。类型定义如下:

```
typedef struct{
```

```
uint8_t MsgType;
union {
    MLME_POLL_request_t MLME_POLL_request;
}MsgData;
}MLME_NWKMACMsg_t;
typedef struct{
    uint8_t MsgType;
    union{
        MLME_POLL_confirm_t MLME_POLL_confirm;
    }MsgData;
}MLME_MACNWKMsg_t;
```

接口函数如下:

```
uint8_t MCPS_MsgSend(MCPS_NWKMACMsg_t * MsgPtr); // 接口函数供 NWK 层调用
uint8_t MCPS_MsgRecive(MCPS_MACNWKMsg_t * MsgPtr); // 接口函数 MAC 层调用
uint8_t MLME_MsgSend(MLME_NWKMACMsg_t * MsgPtr); // 接口函数供 NWK 层调用
uint8_t MLME_MsgRecive(MLME_MACNWKMsg_t * MsgPtr); // 接口函数 MAC 调用
```

③CSMA-CA 算法^[2,8,9]

MAC 层采用带时隙的 CSMA-CA 信道访问机制,进行无线信道管理。该算法中定义了 3 个变量。NB: 执行当前发送任务之前需要进行退避的次数,初始值为 0;CW: 竞争窗口长度,即检测到信道空闲后还需等待多长时间才能开始真正发送数据,初始值为 2;BE: 退避指数,与设备接入信道前需要随机等待的退避周期有关。节点网络层通知 MAC 层有数据要发送时,MAC 层通知 PHY 层进行能量扫描、信道监听,采用 CSMA-CA 机制接入信道。算法描述流程如图 5 所示。

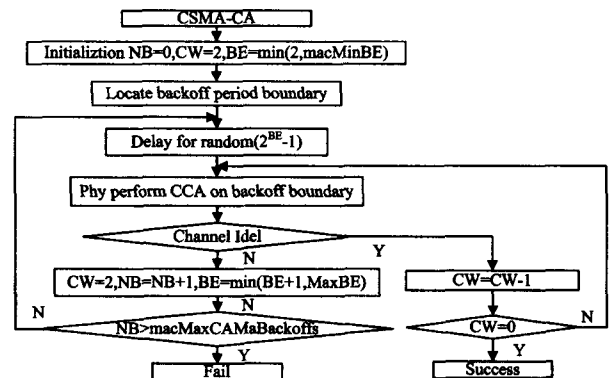


图 5 CSMA-CA 算法流程图

(1) 变量初始化, $NB = 0$, $CW = 2$, $BE = \min(2, macMinBE)$, 定位节点退避时段边缘;

(2) 随机延时 $(0 \sim 2^{BE} - 1)$ 个时间片完成一次退避时段;

(3) 请求物理层执行信道能量检测 CCA, 判断信道是否空闲;

(4) 信道忙碌, $NB = NB + 1$, $BE = \min(BE + 1, MaxBE)$, CW 复位为 2。当 NB 不大于最大退避次数时, 转到步骤 2。若 NB 大于最大退避次数, CSMA-CA 算法终止, 返回接入信道失败。

(5) 信道空闲, CW 减 1, 判断是否为 0。不为 0, 转到步骤 3; 为 0, 关闭竞争窗口, MAC 层进行帧发送, 接入信道成功。

(2) LLC 层

[6] Yager R R. On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision Making[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988, 18(1): 183-190

[7] Torra V. The Weighted OWA Operator[J]. International Journal of Intelligent Systems, 1997, 2(12): 153-166

[8] Torra V. Empirical Analysis to Determine Weighted OWA Orness[A]// Proceedings of the 4th International Conference on Information Fusion[C]. Montreal, Canada, 2001: 11-16

[9] Fullér R , Majlender P . An Analytic Approach for Obtaining

Maximal Entropy OWA Operator Weights[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 124(1): 53-57

[10] Fullér R, Majlender P. On Obtaining Minimal Variability OWA Operator Weights[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 136(2): 203-215

[11] Chen J E, Otto K N. Constructing Membership Functions Using Interpolation and Measurement Theory[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1995, 73(3): 313-327

[12] 吕镇邦, 周利华. 基于有序加权平均算子的概率模糊认知图[J]. 计算机科学, 2008, 35(12)

(上接第 62 页)

LLC 层包格式如表 3 所列。

表 3 LLC 层包格式

2byte	2	1	0-113
目的网络地址	目的节点地址	负载长度指示	负载

LLC 层信息包包括目的网络地址、目的节点地址、负载长度、负载,用于 LLC 与应用层进行数据交互。

LLC 层采用 POLL 轮询机制, node 节点 LLC 层启动一个 Timer 函数,定时向 coordinator 发送 POLL, coordinator 收到 POLL 后,在 MaxWaitTime 内向 node 发送 ACK,建立通信链接,进行数据包传送。当超时没有 ACK 返回时, node 节点 LLC 层重发 POLL 轮询。超过最大次数 MaxPollNum 而没有 ACK 返回时, LLC 层向应用层发送 POLL-FAIL. confirm 指示,应用层进行相应处理。

1.3 底层模块

底层驱动模块主要有 UART 模块、Timer 模块、ADC 模块和 LED 模块等。UART 模块主要是收发不同格式的数据; Timer 模块主要完成任务调度和定时; ADC 模块主要用于传感器采集数据并转化以及信道侦听, ADC 转换完成调用中断。Node433 通信节点设计有红、绿和黄 3 个 LED,用来指示各种状态。

2 实验验证

在由 50 个节点组成的温湿度环境监测网络条件下进行本文协议的有效性和实用性实验验证。节点硬件采用 Atmega128L^[5]作为主控芯片, CC1000^[6]作为射频收发模块芯片。

网络系统中,设置一个 coordinator 节点,通过 RS232 串口与上位机相连,与各 node 节点组成星型网络。串口调试助手显示 coordinator 收发数据。由数据帧的规定,可判断串口调试助手收发数据正确与否,如图 6 所示。

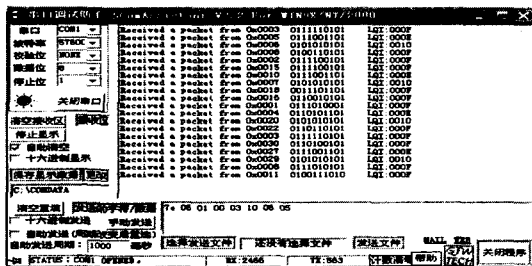


图 6 串口调试助手收发数据

在测试过程中,通过改变发送速率,观看收发效果。当发送速率不高于 10kbps 时,数据收发正确。此速率满足大多数应用需求。各节点采用 POLL 轮询机制,均能先后接入信道。

在 2h 时间段内对节点数据收发进行统计,丢包率低于 1%。

在温湿度监测系统中, node 节点采用 5 号镍氢充电电池供电,初始电量 1500mAH, Atmega128L 工作电压 3.3V,工作频率 8MHz,平均工作电流 10mA^[5](包括 ADC 采集模块和温湿度传感器模块)。CC1000 射频收发芯片,频率选为 433MHz 时,接收状态平均电流损耗约 7.4mA,发射状态平均电流损耗约 15mA,睡眠模式(晶振关闭)平均电流损耗约 0.2μA,从睡眠模式唤醒需 5ms^[6]。设定数据发送频率 120s 一次(ADC 转换一次数据,输入时钟为 100kHz,射频发送一次数据),对 node 节点进行能耗测算, node 节点可工作 200 天左右。

结束语 本文基于 IEEE802.15.4 协议标准,参照 802.11 MAC 层规范^[10,11],设计实现了一种高效、低功耗的无线传感器网络 MAC 协议。网络节点分为 node 和 coordinator,大量的 node 节点通过物理层对无线收发机睡眠管理实现低功耗,极少量的 coordinator 节点射频处于常开状态,实时处理并协调节点消息。实验数据表明, coordinator 和 node 节点构成的系统高效工作, node 节点实现了低功耗。本文协议可用于节点总量不多、通信实时性要求不高的应用系统,如温湿度监测系统。

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

[2] 李晓雄,徐勇军,任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007

[3] Kristofer S, Pister J. Tracking vehicles with a UAV-delivered sensor network[OL]. <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/29Palms0103/>

[4] Butler Z, Corke P, Peterson R, et al. Networked Cows: Virtual Fences for Controlling Cows[C]// Proc. WAMES2004. Boston, USA

[5] Atmega128L DataSheets[OL]. <http://www.atmel.com>

[6] CC1000 DataSheet[OL]. http://www.chipcn.com/files/CC_1000_DataSheet_2_2.pdf

[7] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium Access Control with Coordinator Adaptive Sleeping for Wireless Sensor Networking[J]. IEEE /ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493-506

[8] IEEE Std 802.15.4[B]-2003. pdf. 142-144

[9] IEEE 802.15.4[B]-2006/2003

[10] Wu Haitao, Cheng Shiduan, Peng Yong. IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) Analysis and Enhancement [J]. IEEE Magazine, 2002

[11] Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC protocols for wireless sensor networks: a survey[J]. Communications Magazine, IEEE, 2006, 44(4): 115-121