文章编号:1007-2861(2007)06-0657-06

# 一种极低功耗无线唤醒收发机设计

张雪凡，　沈明华

(上海大学 通信与信息工程学院,上海 200072)

**摘要**: 在无线传感网中,接收机往往处于随时准备接收信息状态,因此节能是一个重要问题.该文提出一种降低功耗的硬件结构和软件协议联合优化策略,分析了无线收发机节能的关键因素,提出一种简易实用的无线唤醒通信协议,设计了一种低功耗无线收发机.实测结果表明,所设计的无线接收机功耗比传统设备降低 10 倍以上,达到了实用要求.

**关键词**: 无线传感网; 无线唤醒; 无线收发机

**中图分类号**: TN 76　　**文献标识码**: A

# Design of Ultra-Low Power Wireless Wake-on-Radio Transceiver

ZHANG Xue-fan,　SHEN Ming-hua

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract**: Power consumption is a serious challenge to designers of RF transceivers for use in distributed wireless sensor networks since the transceiver must always be powered on for possible incoming packets. In this paper, we propose to combine optimization of the integrated transceiver hardware and the medium access control protocol. By analyzing key factors of low-power hardware architecture and using a simplified media access control protocol for wake-on-radio, a low power RF transceiver is designed. Test results show that power consumption of the proposed RF transceiver is more than 10 times lower than conventional equipment, satisfying the practical requirements.

**Key words**: wireless sensor networks; wireless wake-on-radio; RF transceiver

在无线传感网设计中,无线收发机的节能是一个非常关键的问题.无线节点的主要功耗来自无线收发机,因为无线节点中的传感器可以用睡眠来降低功耗,而无线收发机为保持通信必须不断地工作.无线收发机的功耗与电路的工艺、电路形式、调制方式等都密切相关,文献[1]详细讨论了这方面电路的低功耗设计.要进一步减少功耗,只有通过减少无用工作时间,优化操作过程,控制各功能块协调工作,这是软件协议必须仔细考虑的,我们将在这方面作重点讨论.

无线通信时,无线接收状态是能量的主要消耗因素,因为在低速率窄带无线通信网中,发送的信息较少,所以发送时间很短,而接收机必须随时准备接收可能的信息.一个节点的理想状态应该是:当有信息传送给这个节点时,该节点处于接收状态,当该节点有信息要发送时,该节点处于发送状态,在其他时间该节点总是处于睡眠状态.而实际上,发射机并不知道接收机何时是醒的.无线唤醒的概念就是为了实现这一目标而提出的.为了实现无线收发机的功耗最小化,无线唤醒协议必须和具体的应用环境相

**收稿日期**:2007-04-04　**通信作者**:张雪凡(1965～),男,讲师,研究方向为无线数字通信. E-mail:xuefan@citiz.net

万方数据

结合,因为任何特性的优化都会有代价[2].我们将重点讨论合理分配工作时间来降低功耗的原理和方法,采用这种技术的无线收发机,特别适用于电池供电、信息量较小的窄带无线通信网中.

## 1 节能的几个要素

(1) 苏醒时间.这是指无线收发机从睡眠状态苏醒过来一直到收或发的切换时间,在这段时间内的能量是无用的消耗,因此唤醒时间越短,浪费的能量越小.

(2) 接收-发送状态转换时间.这个状态既不是收也不是发,因此转换时间越短越好.最新的单片无线收发机的发送和接收共用一个频率合成器和本地振荡器,在接收-发送状态转换时,频率合成器可始终保持工作状态,从而实现快速转换,转换时间大约在几十微秒.

(3)位和帧的同步时间.接收机在接收信号时与发射信号之间的同步时间,这个时间越短,接收机浪费的时间就越短,就越节省能量.

(4)苏醒时序的优化.无线接收机中不同功能单元的工作频率及耗电量不同,从睡眠至苏醒的先后次序也应不同,我们的目标是以最少的能量消耗达到快速的苏醒.比如,基带部分电流较小,RF模块电流大而且苏醒速度最快,所以低频时钟电路应首先苏醒,然后是基带处理单元,频率合成器,最后是IF放大和RF单元,这样做既省电又快速.

(5)载波场强指示(RSSI).虽然RSSI不是一个时间量,但利用它可以减少接收机的无用激活时间,节省能量.RSSI能够测量无线信号强度,我们可以设置合适的域值,只有当信号强度足够强时才认为是有效的,唤醒MAC层的帧处理模块;相反,当信号强度低于域值时,认为信道是空的,不唤醒其余的功能模块.

(6)信息的过滤.在侦听时将不适合的数据尽早过滤抛弃,这样后续数据处理的模块就不必唤醒.例如,根据帧地址和CRC校验,检测出地址不匹配和校验出错的数据帧,这时没必要唤醒MCU,从而降低系统的整体功率消耗.

(7)无线唤醒.这里的无线唤醒是从现象上看,好象发射机把接收机从睡眠中"唤醒".其实接收机是周期性地自动醒过来的,在醒来的极短时间内若没有发现呼叫信号,则马上又睡眠;若正好有呼叫信号,则被"唤醒"而进入接收状态.所以,在没有呼叫信号时,接收机平均耗电极低,好象一直在睡眠一样,几乎不耗电.

以上要素(1)~(3)与无线收发机的硬件结构密切相关,所以在方案选择时必须仔细考虑;要素(4)~(7)与协议的底层软件密切相关,是我们要重点讨论的.目前国际上先进的低功耗无线接收机,采用低电压工艺,新型电路结构,配合低功耗协议WiseMAC[3],将RF和MCU集成在一块3.3 mm×3.6 mm芯片上,在1.5 V电池电压下,只需要2.5 mW功率消耗,在波特率100 kbit/s时,接收灵敏度达-108 dBm,而功耗仅是IEEE 802.15.4的功耗的1/250,节能效果非常好[4].

## 2 低功耗无线收发机结构

为使功耗尽可能地降低,无线收发机在硬件上应采用能耗分层控制结构,硬件结构如图1所示.无线收发单元(RF)为第一能耗层,FPGA为第二能耗层,微处理器(MCU)为第三能耗层.第一能耗层的无线收发单元内部除了RF收发模块外,还有低功耗时钟和信号场强检测器(RSSI),这样它就可以不在MCU参与情况下定时地"醒来"侦听无线信道.RSSI可用来滤除信号强度低于设定值的干扰信号,从而减少不必要的苏醒以节省电能.第二能耗层FPGA的MAC层是用来判断帧结构是否符合条件的,它从MCU中独立出来的优点是快速而又省电.第三能耗层是MCU,是最后处理数据的核心部件.RTC是一个常开的低功耗实时时钟,在系统的时钟同步中起作用.

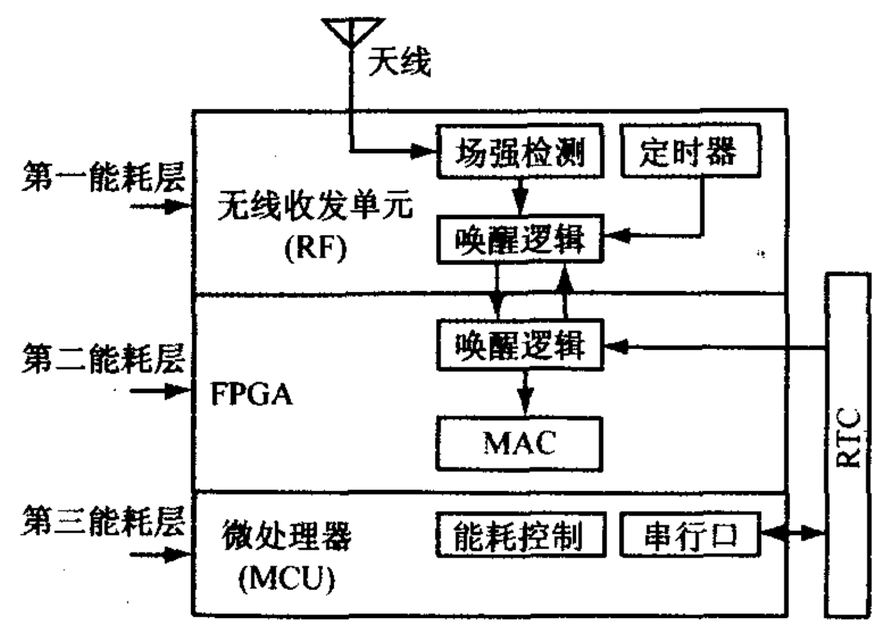


图1 无线收发机的能耗分层

Fig.1 Power consumption domain of wireless transceivers

## 3 低功耗无线收发机设计实例

根据前面讨论的节能要素和能耗分层控制结

构，我们设计了一个低功耗无线唤醒收发机，结构上是二片结构，其中第一能耗层和第二能耗层集成在一个无线芯片上，MCU 是在片外．二片结构的优点是 MCU 对 RF 的干扰减小了，而且 MCU 选型更灵活方便．其缺点是体积比 SOC 的单片结构稍大．

### 3.1　硬件结构

我们选用的 RF 芯片是 TI 公司的 CC1100，它采用 0.18 μm CMOS 工艺，集成了功能强大的许多功能模块；MCU 选用 ATMEL 公司的低功耗 AVR Atmega88，在电压 1.8 V，工作于 32 kHz 时钟时，电流仅 20 μA，掉电模式时，电流 0.5 μA，是目前最省电的 MCU 之一．RF 芯片内部除了基本的无线收发模块外，还包括 MAC 层的一些基本部分，具体有：(1)数字化的 RSSI，可提供有效的载波场强检测；(2)低功耗 RC 定时器，提供收发模块的睡眠定时；(3)交织和纠错，可改善误码性能；(4)数据包自动处理，包括自动打包、拆包、地址判断和 CRC 校验；(5)小容量的 FIFO 存储器．所以从能耗分层角度看，它包括第一能耗层和第二能耗层．无线收发机硬件结构如图 2 所示．

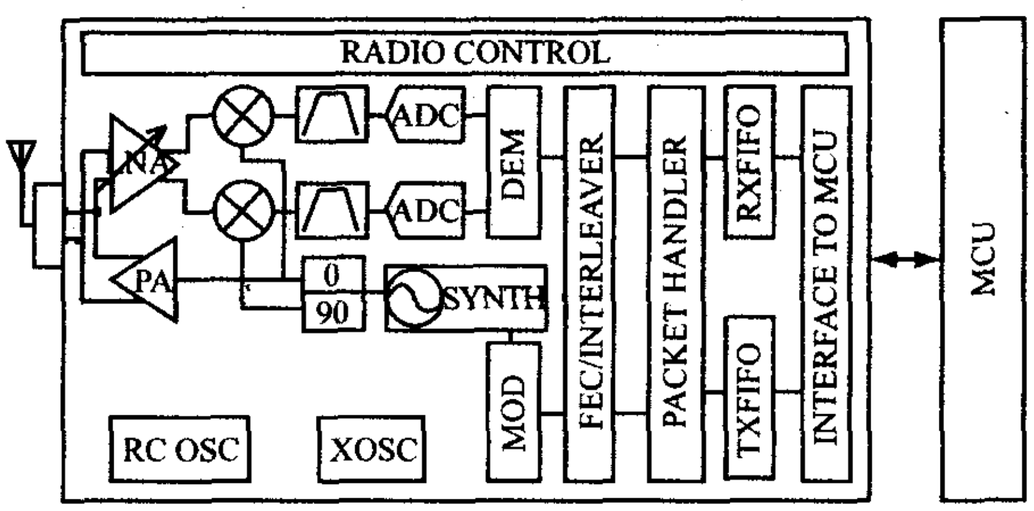


**图 2　无线收发机硬件结构**

**Fig.2　Hardware architecture of wireless transceivers**

### 3.2　节能措施

与普通结构的无线收发机相比，我们采取了几个关键的节能措施．

#### 3.2.1　睡眠时的节能

新型 RF 收发芯片，集成了低功耗内部时钟，所以自动苏醒非常方便，因而既省电又快速．而普通结构的无线收发机，在睡眠时段 MCU 必须保持低频时钟工作，以保证能定时唤醒 RF 电路，这样做有两个缺点，一是 MCU 低频时钟工作时电流还不够小，二是到了苏醒时刻，MCU 必须通过串行接口与 RF 芯片通信才能唤醒 RF 电路，所以费电费时．表 1 是 RF 芯片 CC1100 和 MCU 芯片 Atmega88 的有关参数，通过计算可以看出节能的改善效果．

**表 1　RF 和 MCU 芯片的电流**

**Tab.1　Current of RF and MCU**

| | RF 芯片 | | MCU 芯片 | |
|---|---|---|---|---|
| | RF 睡眠 | RC 定时器工作 | MCU 睡眠 | MCU 低频工作 |
| 电流/μA | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 20 |

普通的无线收发机在睡眠时，MCU 保持低频时钟工作，所以电流为：

$$I = \text{RF 睡眠电流} + \text{MCU 低频工作电流} = 0.4 + 20 = 20.4\ (\mu A).$$

采用 RF 内部低功耗定时器时，无线收发机在睡眠时段的电流为：

$$I = \text{RF 睡眠电流} + \text{RC 定时器电流} + \text{MCU 睡眠电流} = 0.4 + 0.5 + 0.5 = 1.4\ (\mu A).$$

很显然，两个电流之比是 15 倍左右．

CC2420 是支持 802.15.4 协议的无线收发芯片，XE1205 是零中频型的无线收发芯片．它们都是目前性能较好、应用较多的芯片，但其内部都不包含低功耗定时器，它们在睡眠时的平均电流就相对较大．

综上所述，当采用 RF 内部低功耗定时器时，无线收发机睡眠时的耗电仅是传统耗电的 1/15．

#### 3.2.2　苏醒过程的节能

无线接收机周期性地被内部定时器唤醒，以侦听信道中是否有信号，而由睡眠到激活无线接收机是需要时间的，这个时间内消耗的电能是浪费的．通过合理优化苏醒时序，可以节省苏醒过程的电能．

图 3 是 RF 接收机在苏醒过程到接收状态时的相关参数．

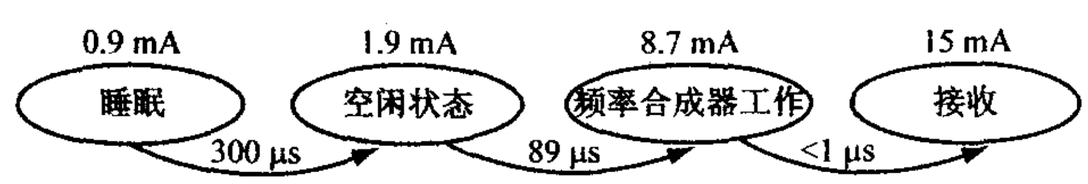


**图 3　RF 接收机优化的苏醒过程**

**Fig.3　Optimized wake up procedure of RF receiver**

由图 3 中电流值和转换时间可以看出，节能优化的苏醒顺序应该是：首先，激活基带处理电路，进入到空闲状态，这个过程电流不超过 1.9 mA，而时间是 300 μs，占用整个过程的大部分时间；其次，从空闲状态到频率合成器正常工作，这大约需要 89 μs，电流上升到 8.7 mA；最后启动 RF 接收，这个时间极短，比较而言可忽略不计．如果苏醒过程不按图 3 的优化过程，从一开始就把所有的电路一齐启动，

万方数据

则耗电就会明显增加.

3.2.3 接收过程的节能

根据图1无线收发机的能耗分层结构,通过合理的软件编程,控制各能耗层尽量减少工作时间,能不激活的尽量不激活.第一,利用RSSI作为第一道过滤器,滤除场强小于域值的信号,减少第二层苏醒时间;第二,利用地址匹配和CRC校验作为第二道过滤器,滤除地址不匹配和CRC校验错误的信号,减少第三层苏醒时间.能耗层唤醒流程图如图4.

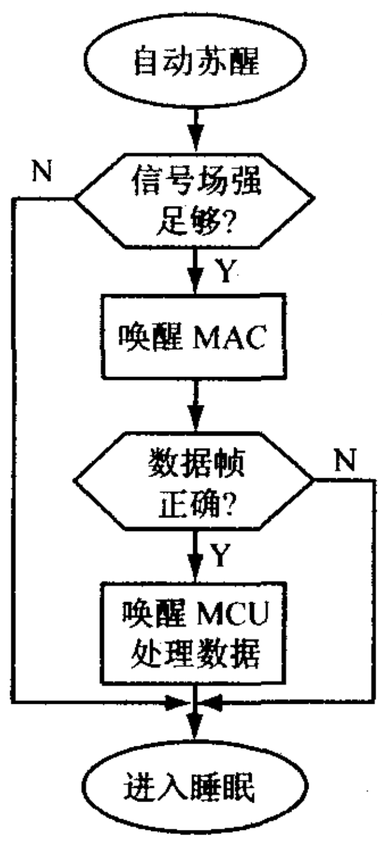


**图4 能耗层唤醒流程**

**Fig.4 Wake up procedure of power consumption domain**

## 4 无线唤醒的节能

### 4.1 无线唤醒过程

无线唤醒可以大幅度地降低接收机的功耗,但是在唤醒过程中由于收发机在时间上不能完全协调,很多能量被白白浪费掉.因此,为了协调收发时间,基于时刻表的协议被提出来,这些协议虽然没有明确地表明避免空闲监听问题,但以某种间接的方式对这个问题作了说明.然而这些方法也存在一些缺点,对于廉价的传感器节点要实现它并不容易[5].文献[6]对基于时刻表的协议作了改进,进一步降低了功耗.

我们基于以下两个原因提出了一个简单实用的无线唤醒协议:(1)如果通信系统信息量较小,也就是说发射时间很短,大多时间是等待接收,所以等待接收时的平均电流必须很小;(2)无线收发机成本以及实现的复杂度.

为了说明无线唤醒的过程,先把问题简化成单向发送和单向接收.如图5所示.发射机:发射唤醒帧序列,每个帧间隔时间为 $T_1$,帧持续时间为 $t_TX$;接收机:每隔周期 $T_0$ 醒来搜索无线信息一次,有效接收时间为 $t_RX$,其余为睡眠时间.

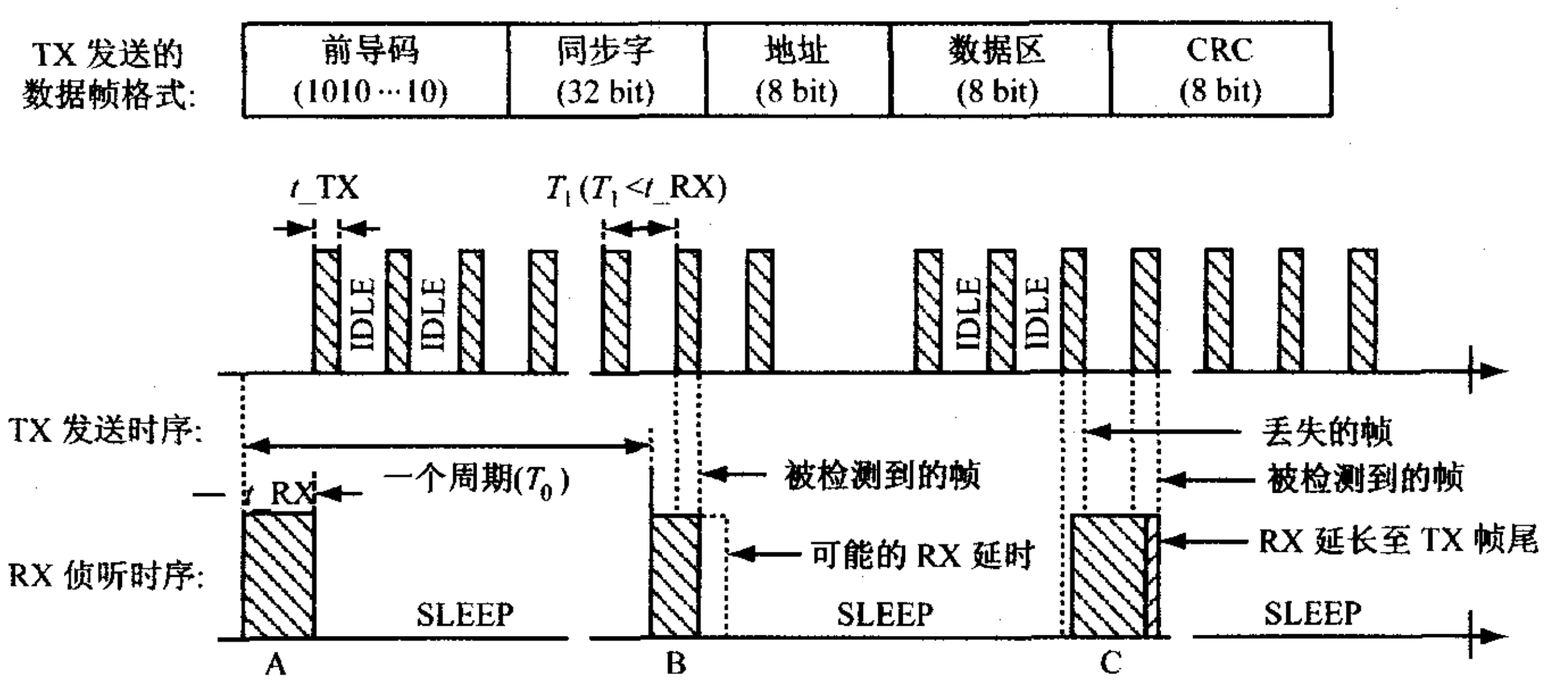


**图5 无线唤醒过程**

**Fig.5 Wake-on-radio procedure**

由图5中的时序关系,我们不难得出以下结论:

(1) 有效接收时间 $t_RX$ 必须大于发送信号的帧间隔时间 $T_1$,否则接收机可能会漏掉要接收的帧.而 $T_1$ 是由TX发送的唤醒数据帧和IDLE决定,由于只是一个唤醒信息,所以数据帧结构可以很简单,数据区只留1个字节.在实际的应用中TX后紧跟RX时隙以侦探ACK应答信号,在4.2节中将详细讨论.

(2) 接收机醒来时,在 $t_RX$ 时隙内没发现有效的帧,则马上又进入睡眠,如A时刻所示;如果在 $t_RX$时隙内发现有效的帧,而且数据已全部收到,则马上睡眠,没必要等 $t_RX$ 全部结束时才结束,如B时刻所示;如果在 $t_RX$ 时隙内发现有效的帧,$t_RX$ 全部结束时数据还未收完,则必须等到全部接收

万方数据

完毕后才进入睡眠，如 C 时刻所示.

### 4.2 实际的无线唤醒协议

无线唤醒协议时序如图 6 所示.

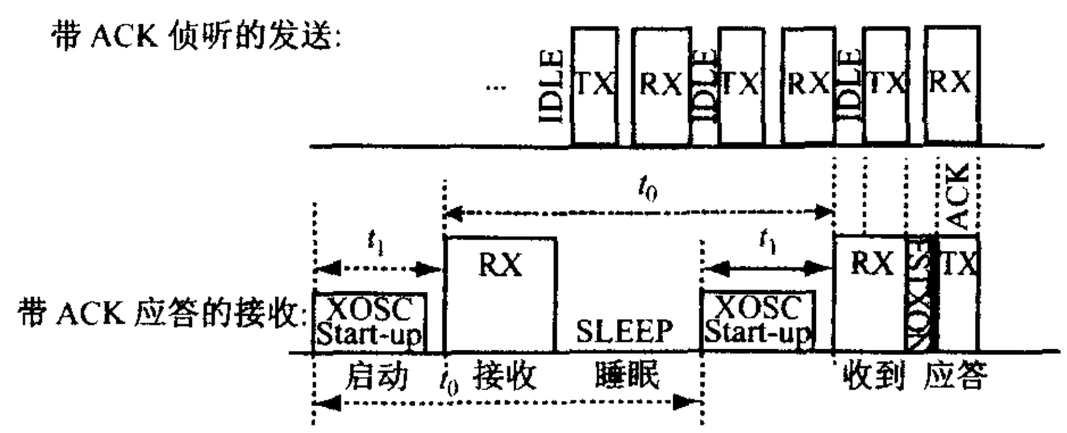


图 6　无线唤醒协议

Fig.6　Wake-on-radio protocol

发射机：发射唤醒帧序列，同时在两个发射帧之间插入接收状态，监听是否有 ACK 应答，若有 ACK，则马上停止发送唤醒帧序列.

接收机：每隔周期 $t_0$ 醒来搜索无线信息一次，其中每次醒来时需要启动时间，这个启动时间在 $t_1$ 内完成.当侦听到无线唤醒信息时，转换到发送状态，发 ACK 应答信号，其中从 RX 到 TX 需要转换时间，中间过渡状态为 FSTXON，这个状态是时刻准备发送的等待状态.

几个关键参数的设置：

(1) $t_1$ 是从睡眠状态醒来到接收状态所需要的时间，这个时间分两种情况：醒来时不进行 PLL 自校，这个启动时间是 389 μs；醒来时对 PLL 进行自校，这需要额外的 720 μs.对于 PLL 自校，一般设置为每 4 次唤醒校正一次，以减小电压、温度等外界因素可能对 PLL 造成的影响.

(2) $t_0$ 是自动醒来的周期间隔时间，$t_0$ 越大越省电，但通信的延时也越长，这两者应根据实际使用情况进行权衡考虑.

(3) 接收状态停留时间 $t_RX$，与发送的波特率和数据帧长度相关，波特率越高所需时间越短，数据帧长度越长所需时间越长.

## 5 测试结果

### 5.1 电池寿命

在波特率 250 kbit/s，$t_1$ = 389 μs，每 4 次 PLL 自校一次，接收状态停留时间 $t_RX$ = 1.17 ms，自动醒来的周期间隔时间 $t_0$ = 300 ms，待机时 MCU 处于睡眠状态，参数如表 2 所示.

由表2和图6可以计算得到待机平均电流，方法如下：总时间是 4 个 $t_0$，其中 3 次不自校，1 次自校.则无线接收机在不睡眠时消耗的电流折合到总时间上的平均电流 $I_{avl}$ 为

表 2　RF 和 MCU 芯片的电流与时间

Tab.2　Current and time of RF and MCU

| | 电流 | 时间 |
|---|---|---|
| RF 睡眠 | 0.9 μA | |
| MCU 睡眠 | 0.5 μA | |
| RF 苏醒过程 | 8.7 mA | 389 μs |
| RF 苏醒自校 | 8.7 mA | 1 109 μs |
| RF 接收 | 15 mA | 1.17 ms |

$I_{avl}$ = (3 次不自校 + 1 次自校 + 4 接收)/4 个 $t_0$，即，$I_{avl}$ = (3 × 389 × 8.7 + 1 109 × 8.7 + 4 × 1 170 × 15)/(4 × 300) = 75 μA.再考虑到睡眠时的 RF 和 MCU 睡眠电流 $I_{av总}$ = 76.4 μA.AA 碱性电池容量(在负载电阻 43 Ω，电压跌至 0.9 V 时)为 2 200 mAh，则：

$$电池寿命 = 2\,200 \times 10^3/76.4 = 29\,333\ h = 3.35\ 年.$$

如果 $t_0$ = 1 s 醒一次，则：$I_{av}$ = 22.5 μA，计算得：电池寿命 = 11 年.

实际上不可能只有待机而没有通信，所以真正的电池寿命会比计算短一些，这和网络的通信量密切相关.

### 5.2 节点间通信距离

表 3 是在 2 种环境下，433 MHz 频段的 CC1100 与 2.4 GHz 频段的 CC2420 无线收发机通信距离的测试结果，CC2420 是支持 802.15.4 协议的无线收发机.测试条件：天线离地面高度 1 m，0 dBm 发射功率，波特率 250 kbit/s，误码率小于 $10^{-3}$.结果表明，433 MHz 频段的 CC1100，对转弯等障碍物的绕射性能明显比 2.4 GHz 频段的 CC2420 要好.

表 3　通信距离测试

Tab.3　Communication distance test　　m

| | CC1100(433 MHz) | CC2420(2.4 GHz) |
|---|---|---|
| 开阔地 | 50 | 60 |
| 90°转弯 | 30 | 5 |

## 6 结　论

本次讨论的极低功耗无线唤醒收发机，由于采

万方数据

用了软硬件联合低功耗优化设计,结合实用的无线唤醒功能,使得其具有低功耗、低成本等特征,是一种性价比极高的无线节点.以上的测试和计算表明,我们设计的无线接收机的功耗比普通设备降低10倍以上,用普通2节AA碱性电池可以工作3~5年,非常适合于电池供电的、信息量较小的窄带无线通信网中.

虽然ZigBee产品正渐渐地在推向市场,但由于其工作频段位于868/915和2.4 GHz,在国内只允许用2.4 GHz频段,而2.4 GHz频段绕障碍物的性能明显较差,因此工作于433 MHz的低功耗无线收发机,由于其优异的传输特性和低廉的价格,在工业监控、简易传感器网络、家庭监控等领域有着广泛的应用前景.

**参考文献:**

[1] ENZ C C, SCOLARI N, YODPRASIT U. Ultra low-power radio design for wireless sensor networks [C]// Radio-Frequency Integration Technology: Integrated Circuits for Wideband Communication and Wireless Sensor Networks, Proceedings of 2005 IEEE International Workshop. 2005: 1-17.

[2] INIEWSKI K, SIU C, KILAMBI S. Ultra-low power circuit and system design trade-offs for smart sensor network applications [C]// Information and Communications Technology, Enabling Technologies for the New Knowledge Society: ITI 3rd International Conference. 2005:309-321.

[3] ENZ C C, EL-HOIYDI A, DECOTIGNIE J D. WiseNET: an ultralow-power wireless sensor network solution [J]. Computer, 2004, 37(8):62-70.

[4] EL-HOIYDI A, ARM C, CASEIRO R. The ultra low-power WiseNET system [C]// Design, Automation and Test in Europe, DATE '06 Proceedings. 2006, 1:1-6.

[5] HOLGER K, ANDREAS W.无线传感器网络协议与体系结构[M].邱天爽,等译.北京:电子工业出版社,2007:115.

[6] SHI X L, STROMBERG G, GSOTTBERGER Y. Wake-up-frame scheme for ultra low power wireless transceivers [C]// Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '04, IEEE. 2004, 6:3619-3623.

(编辑:赵 宇)

·简讯·

## 我校八位教师荣获2007年度上海市浦江人才计划资助

为加快集聚高层次海外留学人才,进一步优化科技创新和自主创业环境,上海市人事局和上海市科委联合设立了"上海市浦江人才计划",每年投入4000万元作为支持留学人员来沪工作、创业的政府专项资助.

浦江计划主要面向近期回国来沪工作及创业的海外留学人员和团队,按照科研开发(A类)、科技创业(B类)、社会科学(C类)以及特殊急需人才(D类)四种类型项目申报和资助.

根据2007年上海市浦江人才计划申请指南,我校科技处积极组织符合条件的教师参与申报.经过专家网上评审、见面会考核、领导小组审核、网上公示、市人事局和市科委联合审定,2007年度上海市浦江人才计划资助人员名单已于近日公布,上海大学共有八位教师榜上有名.

力学所钱跃竑教授、理学院许斌教授、邓振炎副教授、严六明副教授、环化学院王勇教授获得A类资助,环化学院尹东光副研究员获D类资助.另有两位社科类教师杨莉、乌力吉图获得C类资助.以上人员将分别获得10至30万元(个人)的专项经费开展课题研究.

(科技处)

万方数据