

IEEE 1588 时间同步在 ZigBee 低功耗中的应用

Application of IEEE 1588 Time Synchronization
in ZigBee Low Power Consumption Operation

邢伟伟^{1,2} 白瑞林^{1,2}

(江南大学智能控制研究所¹,江苏 无锡 214122;轻工过程先进控制教育部重点实验室²,江苏 无锡 214122)

摘要: 在 ZigBee 无线网络中,为实现中继节点的休眠和唤醒功能,并达到降低系统功耗的目的,提出了一种新的时间同步算法。该算法利用模拟开关和 RTC 模块的中断信号控制主控模块的供电,使路由设备进入超低功耗运行状态;同时采用 IEEE 1588 的精确时钟同步协议 PTP 完成 MAC 层的时钟同步,减少了同步算法协议层间损耗,解决了传统时间同步算法精度不高的问题。试验表明,改进后同步算法的同步精度达到 $+50 \mu\text{s}$,系统运行功耗极低;节点仅靠锂电池即可持续工作半年以上,能够满足低频率数据监控等应用,使无线网络应用更加灵活、广泛。

关键词: 实时时钟 无线网络 时钟同步 低功耗 IEEE 1588

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Abstract: In order to realize the sleep and wake-up functions of the relay nodes in ZigBee wireless network, and to reduce the system power consumption, a new time synchronization algorithm is proposed. It uses interrupt signals of analog switch and RTC module to control the power supply for main control module, and to make routing equipment get into ultra-low power consumption operation state. Meanwhile, IEEE 1588 precision time protocol (PTP) is used to complete the clock synchronization of MAC layer, reduce the loss between layers of synchronization algorithms protocol, and solve the problem of low accuracy of traditional time synchronization algorithm. Tests show that synchronization accuracy of the improved synchronous algorithm reaches $+50 \mu\text{s}$, and the system operation power consumption is extremely low. Relying on Lithium battery, the nodes can continuously work up to six months. The method also can monitor the low frequency data, and make the application of wireless network more flexible and wider.

Keywords: RTC Wireless network Time synchronization Low power consumption IEEE 1588

0 引言

时间同步是无线传感网络应用的重要支撑技术,低功耗是 ZigBee 技术的显著特点。在实际应用中,不仅终端节点需要低功耗设计,而且由于特殊场合供电不便,通信过程主干网络的中继路由节点需要进入休眠低功耗运行,所以将时间同步协议应用于无线传感网络低功耗方案具有实际意义。

针对无线网络时间同步和低功耗应用,文献[1]提出了一种在无线传感器网络的时间同步协议(timing-sync protocol for sensor networks, TPSN)中同时考虑节点时钟偏移和频率漂移率的改进算法,减少了通信成本;文献[2]提出了通过分析 ZigBee 协议的星型拓扑网络节点退避过程,减少了节点接收和空闲的时间,实现了低功耗;文献[3]在传统的 TPSN 算法的

基础上,提出了适合 ZigBee 网络的先分簇再同步的时间同步算法。以上文献提出的时间同步方案均为传统的时间同步协议,这些算法运行于协议栈的应用层,往往由于协议层间延时而降低同步精度;而且由于传统休眠方案仅支持终端节点,不支持路由节点和协调器节点休眠,因此上述算法不适合本文系统。

针对上述同步算法的不足和协议的限制,提出利用实时时钟(real time colok, RTC)芯片的中断信号控制主控芯片 CC2530 的电源,实现主干网络的休眠。同时引入基于 IEEE 1588 的精确时钟同步协议(precision time protocol, PTP)实现在媒体控制访问层(media access control, MAC)读取时间戳,以减少协议层间延时、提高时间同步精度。经测试,时间同步精度达 $+50 \mu\text{s}$,休眠状态工作电流仅为 400 nA 。

1 系统原理

现有无线设备的休眠均基于芯片内部的休眠机制完成设备的休眠和唤醒。IEEE 802.15.4 和 ZigBee 协议规定路由和协调器设备需要时刻在线,不可进入休

国家自然科学基金资助项目(编号:60804013)。

修改稿收到日期:2011-11-03。

第一作者邢伟伟(1987-),男,现为江南大学检测装置及其自动化专业在读硕士研究生;主要从事嵌入式系统及无线传感网络的研究。

眠,且终端节点进入休眠时的功耗只能达到毫安级,故传统方法无法满足本系统要求。

在本设计方案中,系统利用 RTC 时钟芯片的中断信号控制主控芯片 CC2530 的电源,实现系统的休眠和唤醒。系统设计方案如图 1 所示。

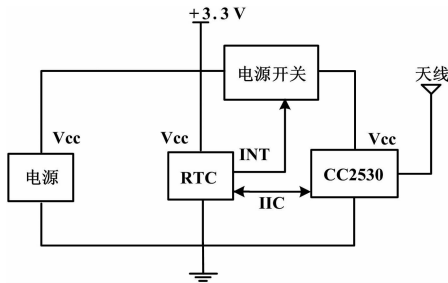


图 1 系统框图
Fig. 1 System scheme

图 1 中,RTC 信号和电源开关配合是系统的关键。硬件模拟开关电路及信号关系如图 2 所示。

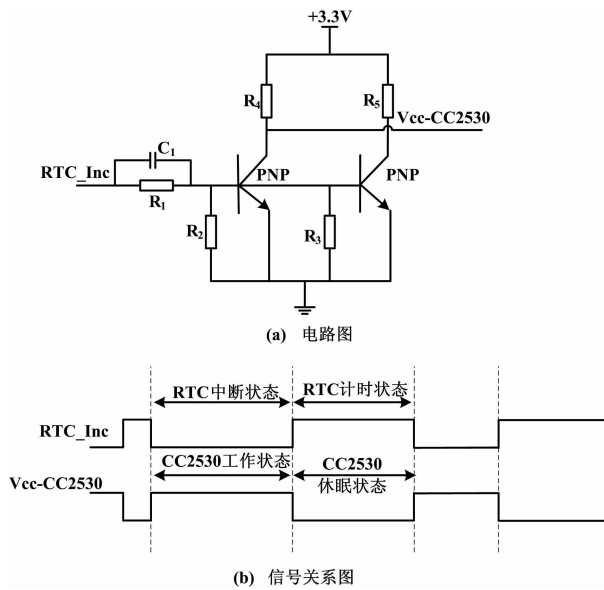


图 2 硬件模拟开关电路及信号关系图
Fig. 2 Hardware analog switching circuit and signal relation

本文选择的 RTC 模块型号为 BL5372,其实际工作功耗只有 400 nA,且具有一路中断信号。主控芯片通过 IIC 总线完成对 RTC 模块的配置。系统利用中断信号配合模拟开关控制主控芯片的工作和休眠,模拟开关由 2 个 PNP 三极管并联,分别连接 RTC 中断管脚和 CC2530 的电源管脚。RTC 工作于记时状态和中断状态。当 RTC 中断之后,中断信号通过开关打开 CC2530 的电源,并由 CC2530 清除 RTC 中断,设置下次中断时间;此后 RTC 模块进入记时状态,并关闭 CC2530 的电源,完成一次通信。

2 算法分析与实现

2.1 同步算法对比

传统时间同步算法有 RBS 算法、TPSN 算法、FTSP 算法以及基于连通支配集的全局时钟同步算法等。这些算法均采用提高单跳同步精度、最短路径同步以减少跳数的算法,从而达到降低多跳误差累积的目的;这些算法都运行于 ZigBee 协议的应用层,层间时间消耗较大,同步精度会降低^[4]。将以太网时间同步协议引入到 ZigBee 协议中,利用 IEEE 1588 的 MAC 层获取时间戳设置系统时间,并根据网络中各同步节点时间的特性改进上述算法中的层间时间消耗,从而改善了同步精度。

本文将 PTP 协议置于和 ZigBee 协议中 NWK 同级别的位置。由于 PTP 调用 MAC 层提供的服务完成数据收发,因此,为兼容原来协议标准,需要对 ZigBee 的 MAC 层进行扩展,在保留原功能的基础上增加对 PTP 协议数据的服务。

2.2 算法分析与实现

在系统软件架构中,添加的 IEEE 1588 协议由位于 ZigBee 协议的应用层的 PTP 协议和 MAC 层的时间戳模块两部分组成。系统软件架构如图 3 所示。

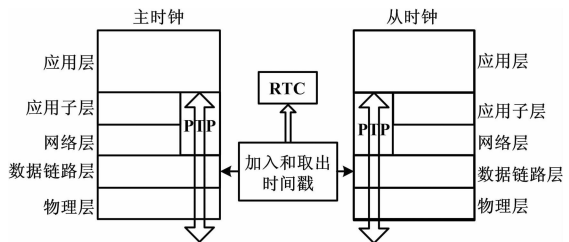


图 3 系统软件架构
Fig. 3 Architecture of system software

2.2.1 应用层 PTP 协议

整个 PTP 协议流程如图 4 所示。

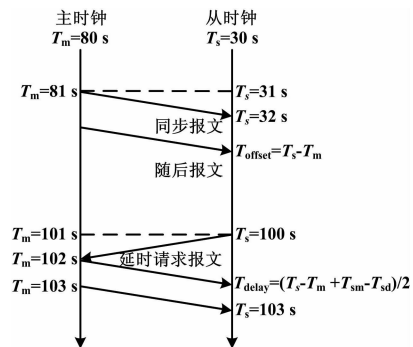


图 4 PTP 协议流程图
Fig. 4 Flowchart of PTP

应用层 PTP 协议主要用于实现 IEEE 1588 的 Sync、Followup、DelayReq 和 DelayResp 消息的产生和发送^[5]。同步主要分为偏差测量、延时测量和时间调整 3 个阶段。

主时钟发送 Sync 通知从时钟,紧接着的报文为时钟同步报文,该报文不会读取硬件时间。在 Sync 报文发送完毕后,主时钟紧接着发送 Followup 报文,该报文在进入 MAC 层之后会触发一次读取硬件时间戳的动作,并将读取的时间信息插入报文中。从时钟接收到 Followup 报文后,在 MAC 层会对数据进行分析并触发一次读取硬件时间的动作,读取本地时间,同时根据报文主时钟时间 T_m 和从时钟硬件时间 T_s 。

主从时间差 T_{offset} 为:

$$T_{offset} = T_m - T_s \quad (1)$$

由于传输过程中会有传输延时,为了增加同步精度,必须测试主从时钟的传输延时 T_{delay} 。从时钟会主动发送 DelayReq 报文,该报文中会触发从时钟的 MAC 层读取硬件时间戳,并记录在报文中,记为 T_{sd} 。主时钟接收到 DelayReq 后,在 MAC 层直接读取硬件时间 T_{md} 并立即回复给从时钟。

主从时钟传输延时 T_{delay} 为:

$$T_{delay} = \frac{(T_{sk} - T_{mk}) + [T_{m(k+1)} - T_{s(k+1)}]}{2} \quad (2)$$

从时钟得到 T_{offset} 和 T_{delay} 之后,可以计算调整本地时钟 T_{sl} ,以达到和主时钟同步的目的。

$$T_{sl} = T_s - T_{offset} + T_{delay} \quad (3)$$

2.2.2 MAC 层时间戳操作实现

MAC 层的改进主要体现在协议服务和 PTP 帧格式的定义。

由于需要兼容现有协议,所以必须保持现有协议的服务和数据结构,同时增加 PTP 服务和 RTC 硬件时间戳的动作。

① 帧服务定义

传统的 PTP 协议位于 UDP 协议的应用层,它与 MAC 层的读取和设置硬件时钟的动作结合使用,将使得协议的同步精度得到很大提升。本文将 PTP 协议引入 IEEE 802.15.4 的无线传感协议。

由于原有无线传感协议架构已经成型,因此,在不打断原始协议的情况下引入 PTP 的数据链路层特性显得尤为关键。

PTP 协议贯穿整个应用层,由网络层直接向应用层提供服务,并使用 IEEE 802.15.4 的数据链路层提供的接口服务。

改进的 MAC 架构如图 5 所示。

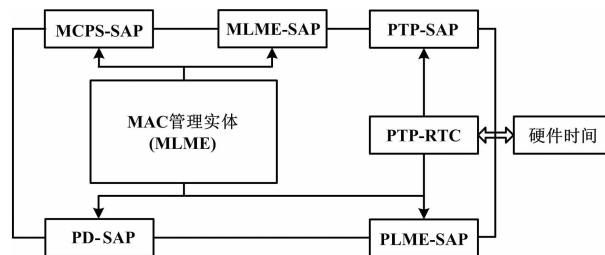


图 5 改进 MAC 架构

Fig. 5 Architecture of improved MAC

由图 5 可以看出,系统在原有的架构上添加了 PTP-SAP 接口。该接口连接的是 PTP 协议,由此接口进入的数据包会触发 PTP-RTC 的动作,进而读取硬件 RTC 时间戳信息。PTP-RTC 的另一个作用是将 RTC 硬件时间戳信息加入到 PTP 协议包内。

启动服务接口函数为 void PTP_Start(PTP_Period time);关闭服务接口函数为 int PTP_Stop()。启动服务接口中的参数为重复时间同步协议的周期,该参数十分重要,决定了最终系统的时间同步精度和功耗。该值越大,同步精度越差而系统功耗越低,在实际使用过程中需作动态调整。

② 帧格式定义

IEEE 802.15.4 的数据链路层定义了 4 种不同的帧格式,分别是信标帧、数据帧、确认帧和数据链路层命令帧^[6]。本文在保留 4 种帧格式的情况下,扩展了 PTP 时间戳 macPTP_t,帧格式如表 1 所示。

表 1 PTP 时间戳的帧定义

Tab. 1 Frame definition of PTP timestamp

名称	定义	类型	说明
帧标志	PTP_Symbol	UInt16	时间戳帧标志
序列号	PTP_Num	UInt8	记录同步次数
目的地址	dstAddr	sAddr_t	需要同步的节点网络地址
源地址	srcAddr	sAddr_t	服务器节点的网络地址
时间戳	PTP_time_t	Timestamp	此次同步的 PTP 记录
校验位	FCS	UInt16	所有数据的校验和

时间戳由数据结构 PTP_time_t 组成,主要包含了 PTP 完成一次同步所需要的 4 个时间戳信息。协议根据帧标志内容判断当前的操作类型,再决定是否读取 RTC 时钟。

3 系统测试

3.1 同步精度测试

节点的时间同步精度是本设计能否成功的关键因素之一^[7-8]。本设计通过对本文算法和传统时间同步算法的同步结果进行对比来评估算法的同步精度。所

有算法的同步频率均为每分钟一次,经过 6 000 次的采样,主从时间的误差结果如图 6 所示。

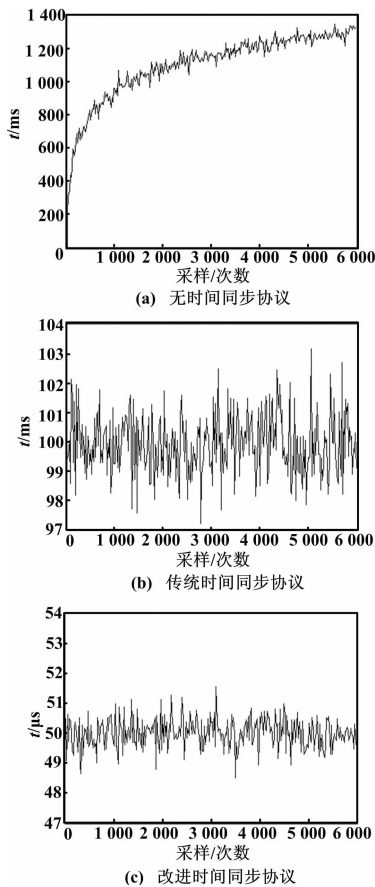


图 6 时间同步误差图

Fig. 6 Error diagram of time synchronization

由图 6 可知,由于主从时间晶振的偏差逐步积累,如果不使用同步算法校正误差,将使主从时间误差越来越大;传统同步算法误差在 100 ms 左右,且算法开销大;本文引入的 PTP 时间同步协议由于采用了数据链路层读取时间戳的办法,使同步误差降低到 50 μ s 左右,同步精度得到很大程度的提高。

3.2 系统功耗测试

本设计通过测量系统正常工作和休眠时的电流测试系统的功耗。将电路中的精密电阻串联,并通过示波器测量电阻两端的压差来指示系统的工作电流。测试分为完全工作和休眠 2 种模式,精密电阻阻值为 2 k Ω 。经测试,系统的完全工作电流为 1.5 mA,而在休眠情况下只有 400 nA,系统中采用的电池容量为 400 mAh。如果调整工作和休眠的时间,可以延长节点的工作时间;调节系统的时间同步周期,将会降低系统的平均功耗。对某山顶水塔水位监测系统进行测试,每天采集一次水位数据,每小时进行一次时间同步,系统可连续运行 3 个月以上。

4 结束语

测试结果表明,PTP 同步协议为无线网络的实时应用和提高时间同步精度提供了有效的解决方案,实现了 ZigBee 无线网络路由节点的休眠,节约了网络的平均功耗。通过在 MAC 层读取硬件时间戳,使 PTP 时间同步协议实现通信主干链路上的节点时间的同步精度高于传统同步方案,且通信开销小^[9-10]。利用 RTC 芯片的中断信号控制主控单元,改进了传统协议仅仅依靠终端节点实现低功耗运行的弊端。本方案尤其适用于节点工作时间和休眠时间比例比较大的场合。

时间同步协议在 ZigBee^[11-15] 无线传感网通信中的应用是目前技术人员研究的热点。试验表明,本文所述改进方案的同步精度更高、平均功耗更低,能耗和设备成本得到了降低,具有一定的实际意义。

参考文献

- [1] 刘迪忻. 无线传感器网络中基于时钟漂移补偿的时间同步技术[J]. 时间频率学报, 2009(12): 120-127.
- [2] 吴伶俐, 詹杰, 李琳. 无线传感器网络节点的低功耗研究[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 97-99.
- [3] 谢琦, 刘兰涛. 用于 ZigBee 网络的同步休眠与唤醒算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(6): 12-18.
- [4] 杨宗凯, 赵大胜, 王玉明. 无线传感器网络时钟同步算法综述[J]. 计算机应用, 2005(5): 32-38.
- [5] Dirk S. IEEE 1588 precise time synchronization as the basis for real time applications in automation [J]. Industrial Networking Solutions, 2003(6): 14-19.
- [6] 桂本焯, 刘锦华. IEEE 1588 高精度同步算法的研究和实现[J]. 光电与控制, 2006, 13(5): 90-94.
- [7] Li Qun, Daniela R. Global clock synchronization in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2006, 55(Z1): 214-226.
- [8] 黄云水, 冯玉光. IEEE 1588 精密时钟同步分析[J]. 国外电子测量技术, 2005(9): 9-12.
- [9] 彭伟, 卢锡诚. 一个新的分布式最小连通支配集近似算法[J]. 计算机学报, 2001(3): 58-64.
- [10] IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE Std 15882 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control system[S], 2008.
- [11] 任秀丽, 于海滨. ZigBee 无线通信协议实现技术的研究[J]. 计算机工程与应用, 2007(6): 10-12.
- [12] 李文仲, 段朝玉. ZigBee 无线网络技术入门与实战[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [13] 乔大雷. 基于 ARM9 的嵌入式 ZigBee 网关设计与实现[D]. 北京: 中国矿业大学, 2007.
- [14] 周玉. 基于 ZigBee 协议的飞机无线嵌入式实时油液监测系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2010(10): 45-46.
- [15] 陈莉. 基于 ZigBee 协议的环境监测无线传感器网络测量节点的设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.