0254-6124/2012/32(6)-846–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhou Li, Cao Song, An Junshe. Research of wireless sensor networks for intra-spacecraft environmental monitoring. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 846-854

航天器内环境监测的无线传感器网络应用研究 *

周 莉[1,2] 曹 松[1] 安军社[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 无线接口技术是航天器电子系统技术发展的前沿和热点之一, 具有广泛应用前景. 提出了用于监测航天器内部及其设备环境参数的无线传感器网络设计方案, 详细介绍了构建航天器内无线传感器网络的通信协议、网络架构、软硬件设计方法, 并给出一个将 ZigBee Pro 技术应用于航天器内的典型设计实例, 以 TI 公司最新的 CC2530 芯片和 ZigBee 协议栈 Z-Stack 为基础, 用于监测航天器内部及其设备的温度、湿度、电压、电流等参数. 实验证明, 本设计具有低功耗、传输可靠、网络鲁棒性及组网灵活等优点.

关键词 无线传感器网络, ZigBee Pro, 航天器内环境监测

中图法分类号 V 556

Research of Wireless Sensor Networks for Intra-Spacecraft Environmental Monitoring

ZHOU Li[1,2] CAO Song[1] AN Junshe[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract Wireless interface service is now one of the most interesting and newest avionics technologies. The wireless technology will be used widely in space exploration in the future. Considering the characters of the intra-spacecraft environmental monitoring, a system scheme based on wireless sensor networks is designed, in order to decrease the power consumption as well as the spacecraft mass and volume. A low power RF chip and the ZigBee protocol stack Z-Stack of TI are used to design a demonstrator. The network structure and the sensor node architecture, including its hardware and software design, are described. The demonstrator can monitor the environmental parameters of the intra-spacecraft and its instruments, *e.g.*, temperature, humidity, the instruments' voltage and current. Experiments have been carried out. The results indicate that the sensor nodes' power consumption is extremely low, the mesh network architecture is robust and flexible, and the use of ZigBee Pro for WSN can achieve stable transmission of data between multiple terminals.

Key words Wireless sensor networks, ZigBee Pro, Intra-spacecraft environmental monitoring

* 中国科学院空间科学与应用研究中心创新项目资助

2011-07-05 收到原稿, 2011-11-14 收到修定稿

E-mail: zhouli@nssc.ac.cn

0　引言

在中国空间科学界提出的中国至 2050 年空间科技发展路线图中, 提出了载人登月、载人火星探测、建立载人空间站等空间科学任务 [1]. 随着空间探测领域的不断扩大, 探测深度的增加以及航天器功能的增强, 航天器上携带了越来越多的观测仪器和设备, 各个设备均需要在一定的环境条件下 (例如温度、湿度、压强、辐射度等) 才能正常正确工作. 另外, 载人飞船、空间站以及月球基地也需要进行内部环境监测, 以保证人员安全和设备的正常工作. 因此, 航天器内部的环境监测具有重要意义, 具有良好的应用前景.

众多监测点如果采用传统的有线方法采集, 会增加额外的线缆重量以及布线的难度, 给航天器增加重量和设计复杂度. 因此, 传统的有线方式不能满足航天器内环境监测的要求. 地面日益成熟的无线网络技术引起了各国航空航天组织的关注 [2−4]*, 空间数据系统咨询委员会 CCSDS (Consultative Committee For Space Data Systems) 对无线网络技术进行了多年的跟踪实验, 目前正在制定无线网络技术应用于空间各个场景的标准, 对于低速率航天器内部环境监测 [5] 推荐使用 IEEE802.15.4 标准 [6].

IEEE802.15.4 标准针对低速无线个人区域网络, 以低功耗、低速率、低成本作为重点目标, 定义了 MAC 层和 PHY 层协议, 很多机构将其作为无线传感器网络的通信标准.

1　体系结构

典型的传感器网络系统结构包括分布式传感器节点 (群)、接收发送器 (网关)、互联网和用户界面等. 其中, 传感器网络节点的基本组成包括如下 4 个基本单元: 传感单元 (由传感器和模数转换功能模块组成)、处理单元 (包括 CPU、存储器、嵌入式操作系统等)、通信单元 (由无线通信模块组成) 以及电源 [7]. 航天器内的无线传感器网络体系结构与典型的传感器网络相似, 只是网关连接的是星载数据总线, 最终将传感器信息传递到星载计算机. 这里提出了将无线传感器网络用于航天器内部环境监测的设计方案, 系统包括数据采集和传输网络 (本地网络)、网关、星载数据网络 (总线) 和星载计算机, 如图 1 所示.

无线传感器网络在航天器内部典型的应用功能为航天器内环境和仪器设备参数的监测, 包括温度、湿度、压强、辐射度等. 数据采集和传输网络用于采集这些参数, 采用 ZigBee Pro 网络技术传输信息, 将信息汇总到网关, 最终通过星载总线到达星载计算机, 由计算机判定参数是否有异常, 如若异常则做出相应调整.

由于目前星载数据总线 (有线) 和星载计算机单元设计均已十分成熟、稳定, 结合航天应用的特殊性, 该系统的难点在于在保证网络传输可靠性、鲁棒性和组网灵活性的情况下实现低功耗, 使无线传感器网络能够在航天器内运行的时间更长. 系统的关键技术是 ZigBee Pro 网络技术、网关设计和低功耗软硬件设计.

2　关键技术

2.1　ZigBee Pro 网络技术

ZigBee 技术以其低速率、低功耗、近距离、低成本的特点著称, 是无线传感器网络的典型代表, 目前

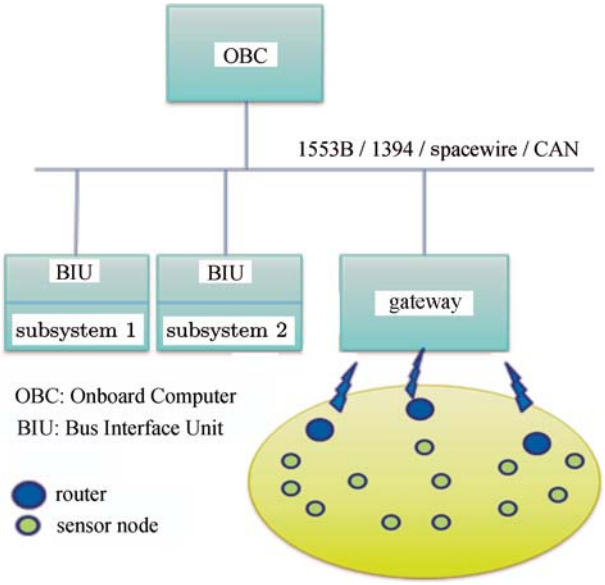


图 1　用于航天器内环境监测的无线传感器网络设计方案

Fig. 1　Wireless sensor networks design for intra-spacecraft environmental monitoring

*http://cwe.ccsds.org/sois/default.aspx#_SOIS-WIR

广泛应用于工业监控领域. ZigBee 技术是 IEEE802.15.4 标准 [5] 的基础, 是 IEEE802.15.4 标准的典型应用技术. IEEE802.15.4 标准定义了网络的物理层和媒体访问控制层 (MAC), ZigBee 联盟定义了网络层、安全层和标准化的应用程序接口 API, 大大简化了用户开发的进程.

ZigBee Pro 是 ZigBee 技术的升级版本, 在继承了 ZigBee 技术优点的同时, 显著增强了网络的可扩展性、易用性和安全性 [8], 达到工业应用的标准要求. ZigBee Pro 采用随机地址分配机制取代 ZigBee 技术的树地址分配机制, 不再支持树状路由, 只支持网状路由构成的网状网络, 大大增强了网络的鲁棒性. 针对传感器网络中心节点汇聚来自大量传感器节点采集信息的特点, 提出了集中器 (collector) 数据传输模式 [9], 为多点和一点间的数据交换增加了多对一路由选择 (many-to-one routing) 和源路由选择 (source routing) 两种全新的路由方式, 能很好地优化大型无线网络中的信息流.

ZigBee 无线网络功能的实现是建立在 ZigBee 协议栈基础上的 (见图 2), 协议栈采用分层的结构, 协议分层的目的是为了使各层相对独立, 每一层都提供一些服务, 服务由协议定义, 程序员只需关心与其工作直接相关的那些层的协议, 它们向高层提供服务, 并由低层提供服务.

TI 公司提供的 ZigBee 协议栈 Z-Stack (包含 ZigBee 与 ZigBee PRO 两个特性集), 达到 ZigBee 测试机构德国莱茵集团评定的 ZigBee 联盟参考平台 (golden unit) 水平, 目前已为全球众多 ZigBee 开发商所广泛采用. 图 3 为 TI Z-Stack 协议栈架构分析. 整个 Z-Stack 采用分层的软件结构, 硬件抽象层 (HAL) 提供各种硬件模块的驱动, 包括定时器 Timer, 通用 I/O 口 GPIO, 通用异步收发传输器 UART, 模数转换 ADC; 应用程序接口 API, 提供各种服务的扩展集. 操作系统抽象层 OSAL 实现了一个易用的操作系统平台, 通过时间片轮转函数实现任务调度, 提供多任务处理机制. 用户可以调用 OSAL 提供的相关 API 进行多任务编程, 将自己的应用程序作为一个独立的任务来实现.

本系统采用了 TI 公司最新的 ZigBee 单芯片 SOC 解决方案 CC2530, 其支持 ZigBee 和 ZigBee Pro 两个特性集. 本地网络采用网状网络拓扑, 使用多对一/源路由的路由方式, 具备一条以上的传输路径和强大的自修复能力, 提高了网络的鲁棒性和组网灵活性; 支持确认 ACK 机制, 保证了传输可靠性.

2.2 网关设计

网关用来连接数据采集网络与星载数据总线, 将

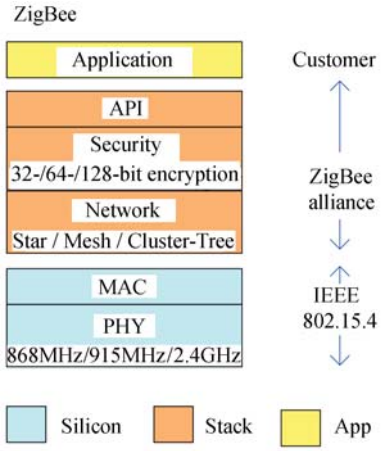


图 2 ZigBee 协议的分层结构

Fig. 2 ZigBee protocol stack architecture

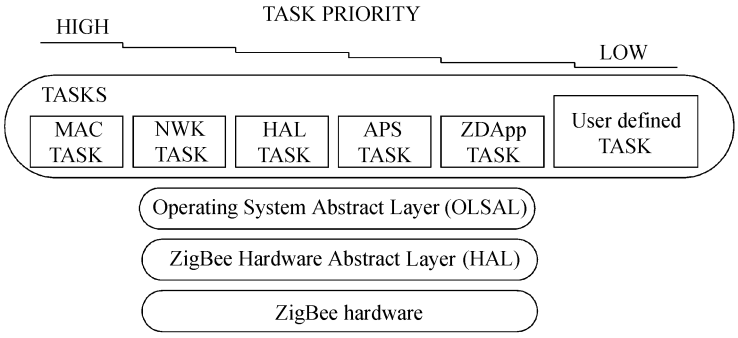


图 3 TI Z-Stack 协议栈架构

Fig. 3 TI ZigBee protocol stack architecture

采集的数据发送到星载数据总线, 同时将星载计算机下传的命令发送到采集网络. 网关由星载总线接口单元、微控制器和采集网络接口单元三部分组成, 其组成如图 4 所示. 星载数据网络 (总线) 常用的有 1553B, Spacewire, CAN, 1394 等, 本系统采用了中国航天器常用的 1553B 总线, 星载总线接口单元为 DDC 公司的 1553B 接口芯片 BU61580; 微控制器用于控制两个网络的数据交换, 采集网络接口芯片采用了常用的串口芯片 MAX3232.

2.3　低功耗设计

无线传感器网络的低功耗设计可分为网络级和节点级的低功耗技术. 网络级低功耗技术包括协议栈的优化设计、动态的簇头分配及网络的数据传输模式等; 节点级低功耗技术需要设计和实现超低功耗的传感器、微处理器, 特别是射频通信的超低功耗芯片. 单芯片解决方案 SOC 也是发展的必然方向, 而且还要进行 SOC 芯片和 MAC 协议的软硬件协同设计.

结合航天器内的应用背景, 本系统采用的网络级低功耗技术如下.

①通过采用 TI 公司简化的 Z-Stack 协议栈, 减少不必要的资源消耗.

②采用事件驱动型数据传输模式, 只有在事件发生时才触发正常模式, 其余时间处于休眠模式, 大大节省了单节点的功耗.

③采用单播方式, 每个传感器节点只向自己的父节点发送和接收数据, 减少网络不必要功耗损失.

本系统在节点级低功耗技术上, 采用最新的 ZigBee 单芯片解决方案 SOC, 减少了射频外围电路的功耗; 另外选用的传感器都是低电压低功耗的芯片, 再结合节点的软件低功耗设计 (事件驱动型唤醒节点), 从而达到单节点的功耗最小化.

经过芯片调研, 最终采用 TI 公司最新的 SOC 方案 CC2530. 方案 CC2530 具备高速低功耗 8051 内核、8 KB 的 SRAM、高达 256 KB 的 Flash 存储器, 以及丰富强大的外设资源, 例如 DMA、定时/计数器、AES128 协处理器、8~14 bit ADC、USART、睡眠模式定时器等 *. CC2530 有三种工作模式, 在接收机传输模式下, 电流消耗分别为 24 mA 和 29 mA; 在空闲模式下, 最低只需要 0.4 μA 的供电电流. CC2530 的供电电压的范围是 2~3.6 V, 工作温度范围为 $-40 \sim 125$°C, 接收灵敏度为 -97 dBm.

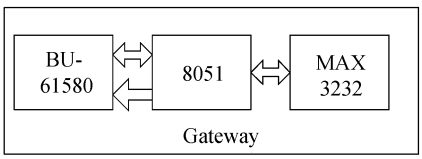


图 4　网关组成

Fig. 4　Gateway architecture

3　设计实例

为验证无线传感器网络在航天器内环境监测问题上的可行性, 这里提供了一个验证系统可行性设计实例, 并在第 4 节给出实验结果. 本验证系统的应用场景是在有 4 个舱的航天器中, 测量每个舱内及其设备的环境参数, 以温度、湿度为例. 如果监测到温度不在要求的范围之内, 则通知星载计算机, 做出相应的动作调节温度.

本验证系统由数据采集和传输网络 (本地网络)、网关、星载数据网络 (总线) 和星载计算机组成, 如图 5 所示. 星载数据总线以中国航天器常用的 1553B 总线为例; 星载计算机单元由 PC 机来模拟. 由于星载数据总线和星载计算机单元设计都已非常成熟、稳定, 可以利用插有 1553B 板卡的 PC 机来模拟这两部分 [10−11]. 本地网络采用 ZigBee Pro 网络, 网关是星载数据网络和无线网络信息交互的桥梁, ZigBee Pro 网络的协调器通过串口与网关通信, 从而与 1553B 网络实现信息交互, 串口软硬件实现简单. 因此, 本验证系统的研究重点是本地网络中数据的采集和传输, 其中, 节点是组成网络的基本单元, 网络功能都是依靠节点以及节点间的软硬件协调工作实现的. 下面详细介绍本地网络中节点的软硬件设计.

3.1　本地网络节点硬件设计

在 ZigBee Pro 网络中, 节点分为如下三种逻辑设备类型.

①协调器: 整个数据采集网络的核心, 建立启动网络; 汇聚功能, 汇总整个网络的传感器采集到的数据; 桥接功能, 通过串口将数据传给网关.

②路由器: 运行其他设备加入网络, 数据转发.

*http://focus.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/cc2530.pdf

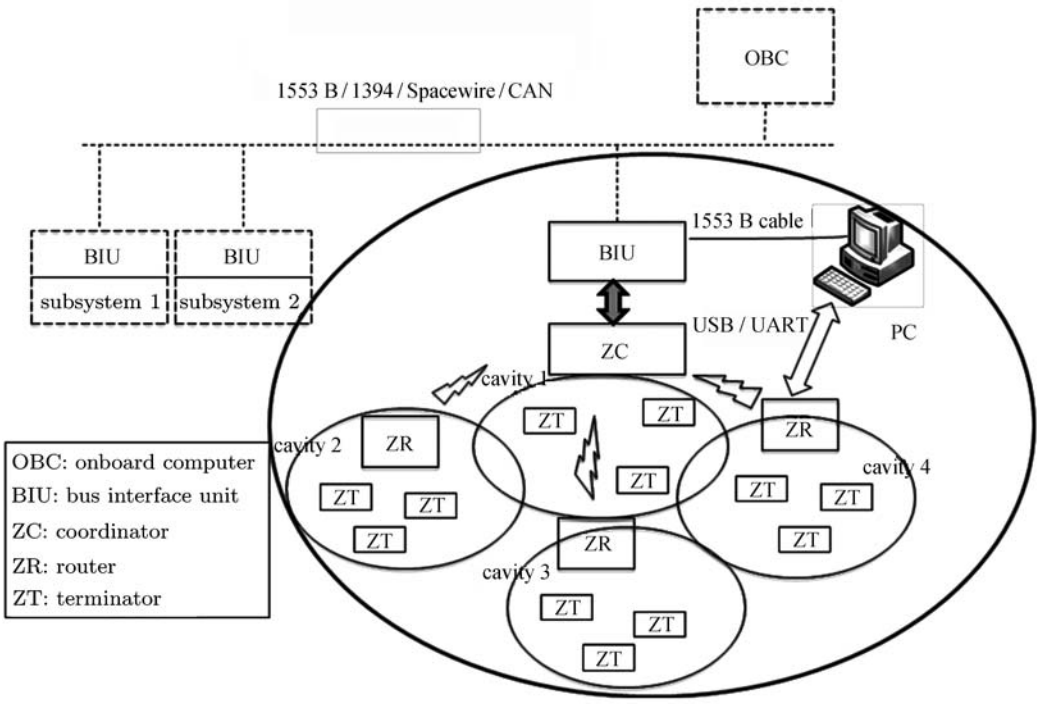


图 5 用于航天器内环境监测的无线传感器网络验证系统

Fig. 5 Wireless sensor networks demonstrator for intra-spacecraft environmental monitoring

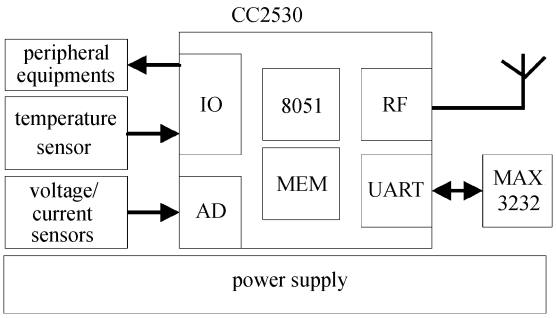


图 6 传感器节点硬件组成

Fig. 6 Sensor node architecture

③终端设备: 即传感器节点, 采集温度、湿度、电压、电流等环境参数.

这三种设备的通用硬件组成如图 6 所示, 均采用 TI 公司的 CC2530, 硬件实现简单, 且成本低, 功耗低, 面积小. 为了尽量减少功耗, 温度湿度的测量采用瑞士 Sensirion 公司推出的 SHT10 单片数字温湿度集成传感器; 设备电压的测量直接用 CC2530 本身的 AD 采集; 设备电流的测量采用美国 MAXIM 公司推出的精密电流传感放大器 MAX471; 协调器通过串口与 1553B 总线的终端连接; 外围电路包括开关、指示灯、复位电路、JTAG 等. 在验证系统中采用商用的外置 Whip 天线, Whip 天线的全方向性好并且性能最佳.

SHT10 单芯片传感器 [12] 是一款含有已校准数字信号输出的温度、湿度复合传感器. 每个 SHT10 传感器都在极为精确的湿度校验室中进行校准. 校准系数以程序的形式储存在 OTP 内存中, 传感器内部在检测信号的处理过程中可以直接调用这些校准系数. SHT10 传感器可以在单个芯片上实现相对温度和相对湿度测量, 并且传感器可以完全浸没在水中使用.

SHT10 最大的优点是使用时不需要校准, 使用 CC2530 的 IO 口来模拟 I^2C 总线时序采集 SHT10 测量到温度湿度, 电路连接如图 7 所示.

设备电压的测量直接通过 CC2530 的 AD 采集, 可提供的最高精度为 14 bit. 电流的检测电路是由美国 MAXIM 公司生产的双向、精密电流传感放大器 MAX471. 其内置 35 mΩ 精密传感电阻, 可测量电流的上下限为 ±3 A. 供电电压为 3~36 V, 所能跟踪

的电流变化频率可达 130 kHz. MAX471 通过一个输出电阻将电流输出转化为对地电压输出, CC2530 通过 AD 即可采集到要测量的电流值. 电压电流采集电路如图 8 所示.

串口接口电路采用 MAX3232 芯片进行电平转换, 连接到 1553B 总线接口单元.

3.2　本地网络节点软件设计

节点软件采用了 TI 公司简化的 Z-Stack 协议栈, PC 端使用的 ZigBee 协议开发环境是 IAR Embedded Workbench for 8051. 应用层程序采用了 C 语言编写.

3.2.1　系统初始化设计

电路板加电后, 首先进行系统初始化, 即由启动代码来初始化硬件系统和软件架构需要的各个模块, 为操作系统的运行做准备. 主要分为初始化系统时钟检测芯片工作电压, 初始化堆栈, 初始化各个硬件驱动, 初始化 flash 形成芯片 MAC 地址, 初始化非易失变量存储器, 初始化 MAC 层协议, 初始化应用层帧协议, 初始化操作系统等 [13].

操作系统的初始化函数需要执行内存分配、设置定时器及电源管理等, 然后负责执行任务的初始化工作, 分配任务 ID, 初始化 tasksArr 数组定义的一系列任务, 最后, 调用应用层初始化函数来启动用户任务.

系统初始化结束后, 开始执行操作系统入口程序, 并将控制权交给操作系统, 由操作系统管理调度各项任务. 操作系统入口代码是 osal_start_system(); 操作系统将进入无返回的死循环, 直至系统复位. 该函数为轮转查询式操作系统, 即不断查询是否有新事件发生, 若有新事件发生, 则执行相关事件函数, 若没有发生, 则继续查询下一个任务, 依次循环. 操作系统共要处理 6 项必须处理的任务和 3 项可选任务 (串口调试、网络层管理、APSF 任务处理函数), 必须处理的任务分别来自 MAC 层、网络层、硬件抽象层、应用层、ZigBee 设备应用层及用户应用层, 优先级由高到低.

3.2.2　应用层设计

图 9 给出了协调器和终端设备系统初始化后执行任务的流程. 首先, 协调器加电, 系统初始化结束后, 自动建立一个 ZigBee Pro 网络, 允许其他设备加入并允许绑定, 然后等待新事件出现. 这时如果收到路由器或终端设备加入网络的请求, 允许其加入并允许绑定. 加入网络并成功绑定后, 终端设备就会触发发送传感器信息的事件.

终端设备每隔 10 s 向操作系统发送报告温度湿度的事件标志, 采集一次温度湿度值并向采集节点发

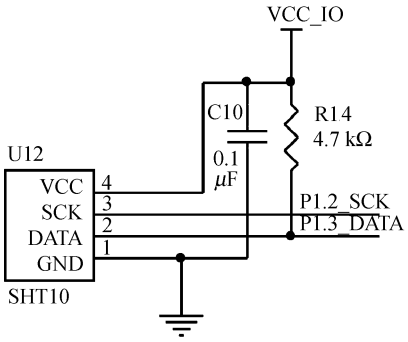


图 7　温度和湿度采集电路

Fig. 7　Temperature and humidity measurement circuit

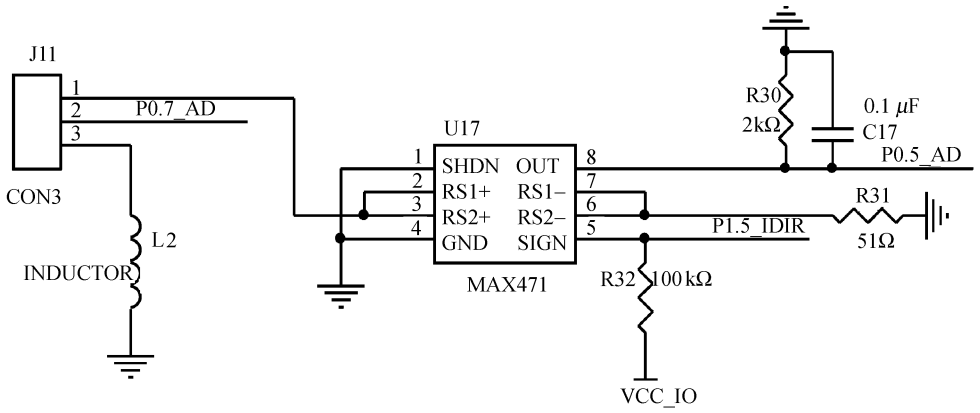


图 8　电压、电流采集电路

Fig. 8　Voltage and current measurement circuit

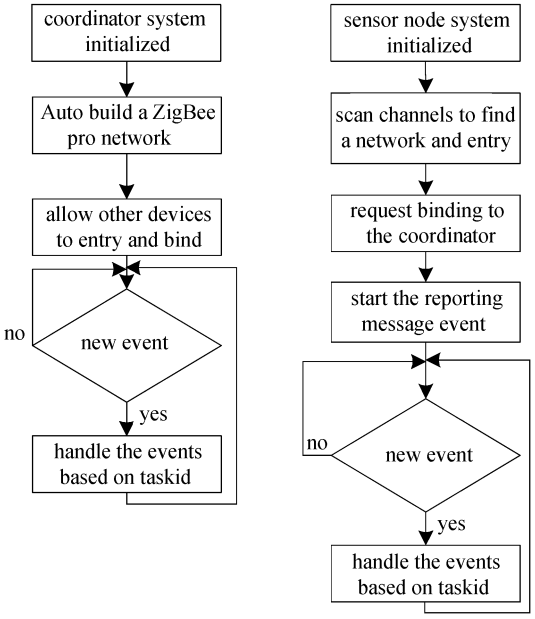


图 9 节点初始化后执行事务流程

Fig. 9 Flow chart of the nodes events processing after initialization

送; 每隔 10 s 向操作系统发送报告电压电流的事件标志, 采集一次电压电流值并向采集节点发送. 为了区分不同位置的节点, 需要对应用层数据进行编码. 编码格式如图 10 所示. 协调器收到信息后根据编码格式进行解码, 然后通过串口发送给上位机显示.

4 实验结果

无线传感器网络验证系统在一个体积为 10 m × 10 m × 10 m 的室内模拟实验.

4.1 低功耗设计

为延长电池的使用寿命, 传感器节点每次发送完

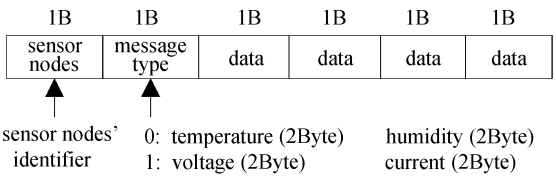


图 10 应用层数据编码格式

Fig. 10 Application layer data encoding

数据后即进入休眠状态, 系统每隔 10 s 上报一次数据, 休眠时电路板电流约为 50 μA. 节点采集时候的供电电流为 10 mA, 大约需要花费 60 ms 的时间; 节点发送数据时, 电路板电流测量值为 20 mA, 发送时间相对于采集时间和休眠时间可以忽略不计. 因此, 传感器节点 0.6% 的时间处于正常运行状态, 99.4% 的时间处于休眠状态, 由此计算出节点的平均耗电量为 $10 \times 0.6\% + 0.050 \times 99.4\% = 0.11$ mA. 单节点平均功耗是 3.3 V × 0.11 mA = 0.363 mW, 该功耗很低, 体现了 ZigBee 网络低功耗的特点.

4.2 网络吞吐量测试

使用传感器节点 A 尽可能快地发送一个数据包给节点 B, 节点 A 在收到节点 B 对已收到数据的一个确认后将继续发送下一个数据包给 B, 如此循环, 来测试一个 ZigBee Pro 网络中两个设备间应用层数据的最大吞吐量. 表 1 列出了连续 20 s 的每秒平均字节数量. 将 20 s 求和取平均, 得到 20 s 内的平均字节数量为 4970.85, 则 20 s 的平均位速率为 4970.85 ×8 = 39 766 bit/s. 因而两个节点间应用层数据的最大吞吐量约为 40 kbit/s, 体现了 ZigBee 网络低速率的特性.

4.3 网络架构测试

网状网拓扑最大的优势就是网络的自愈能力, 具

表 1 连续 20 s 的每秒平均字节数量

Table 1 Average bytes number per second in constant 20 seconds

序号	接收到字节数	序号	接收到字节数	序号	接收到字节数	序号	接收到字节数	序号	接收到字节数
1	5058	5	4973	9	4965	13	4973	17	4963
2	4988	6	4973	10	4973	14	5002	18	4930
3	4973	7	4930	11	4963	15	4930	19	4988
4	4968	8	4973	12	4965	16	4968	20	4973

体实验过程实物如图 11 所示. 首先, 根据应用需求建立网络, 如图 12 所示, 然后, 关掉网络中的一个路由器电源来模拟节点故障, 终端设备寻找新的父节点, 重新加入网络, 如图 13 所示. 图 12~15 是使用 TI 公司 PC 端监控软件 Z-Sensor Monitor 来观察网状网拓扑自愈能力的一个完整结果.

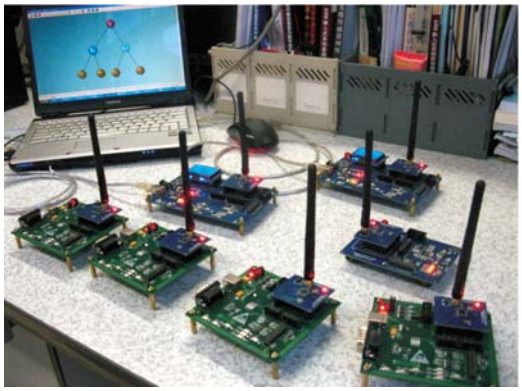


图 11　实验照片

Fig. 11　Experiment photo



图 12　星载环境监测的网络架构

Fig. 12　Network structure of the demonstrator

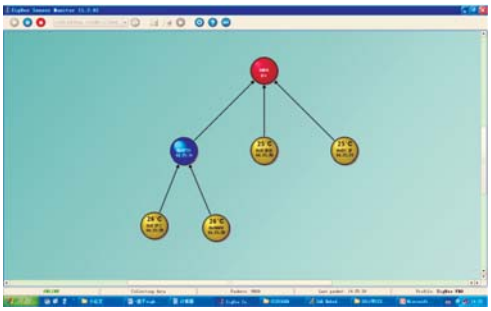


图 13　当一个路由器故障时其子节点重新加入网络

Fig. 13　When one router fails, its child nodes search and rejoin the network

4.4　环境参数测量

根据应用需求, 实验测量的参数包括设备的温度、湿度、电源电压和电流. 协调器接收到的信息通过串口发送到上位机, 上位机使用 TI 公司的 Z-Tool2.0 软件来观察数据, 如图 16 所示. DebugString: 后的 4 个字符是终端设备的设备 ID, 可以发现, 在相同的环境条件下, 这 4 个终端设备测量的温度、湿度相符.

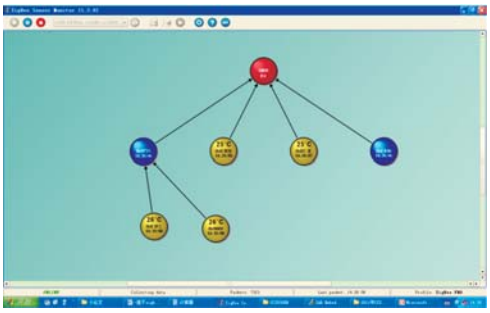


图 14　路由器重新加电加入网络

Fig. 14　Router is powered again, then search and rejoin the network

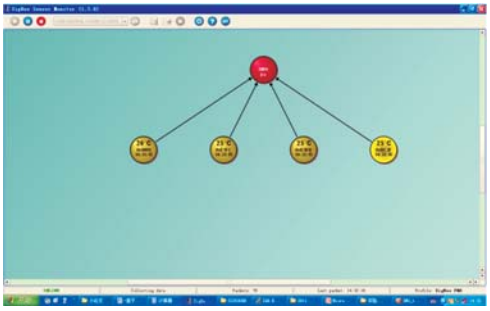


图 15　两个路由器全部故障时终端设备自动重新加入网络

Fig. 15　When both routers fail, their child nodes research and rejoin the network

```
Start Time: 2011-6-21 15:55:02
  DebugString: 9AD8 CRAVE3 25.4C 40.1%..
  DebugString: 9AD8 CRAVE3 3.3 V 1.300A..
  DebugString: 4F6A CRAVE1 25.7C 39.2%..
  DebugString: 4F6A CRAVE1 3.3 V 1.100A..
  DebugString: AC90 CRAVE4 25.2C 40.3%..
  DebugString: 7532 CRAVE2 25.8C 39.0%..
  DebugString: AC90 CRAVE4 3.4 V 1.400A..
  DebugString: 7532 CRAVE2 3.5 V 1.200A..
```

图 16　串口接收到的数据

Fig. 16　UART received data

5 结论

提出了用于监测航天器内部及其设备环境参数的无线传感器网络的软硬件设计方案, 利用 TI 公司的 CC2530 芯片, 搭建了一个基于 ZigBee Pro 的地面演示系统, 并进行演示测试实验, 给出实验数据和结果, 进而验证了系统的可行性. ZigBee 技术简便易行, 传输可靠, 功耗极低, 具有很高的组网灵活性和可靠性, 是取代航天器上有线环境监测的理想方式.

参考文献

[1] Research Group on Space Science & Technology of the Chinese Academy of Sciences. Space Science & Technology in China: A Roadmap to 2050 [M]. Beijing: Science Press, 2009. 67-70. In Chinese (中国科学院空间领域战略研究组. 中国至 2050 年空间科技发展路线图 [M]. 北京: 科学出版社, 2009. 67-70)

[2] Plummer C, Plancke P. The Spacecraft Harness Reduction [R]. ESA SP-509, 2002

[3] Magness R, Plancke P, Hernandez I, Plummer C. Current activities and status of the ESA/ESTEC-industry wireless onboard spacecraft working group [C]//the 4th Space Internet Workshop SIW-4. Baltimore, USA, 2004

[4] Amini R, Aalbers G, Hamann R, *et al.* New generations of spacecraft data handling systems: less harness, more reliability [C]//the 57th International Astronautical Congress (AIAA 2006-448). Valencia, Spain, 2006

[5] CCSDS. Wireless Network Communications Overview for Space Mission Operations Informational Report [R]. CCDS 880.0-G-0.169, JSC-CN-18518. Johnson: NASA, 2010

[6] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) [S], IEEE std. 802.15.4-2006. IEEE, 2006

[7] Cui Li, Ju Hailing, Miao Yong, *et al.* Overview of wireless sensor networks [J]. *J. Comp. Res. Devel.*, 2005(01):163-174. In Chinese (崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 等. 无线传感器网络研究进展 [J]. 计算机研究与发展, 2005(01):163-174)

[8] Brian M Blum. ZigBee and ZigBee PRO: Which Will Be More Suitable. Electronic Engineering & Product World [J]. *Elect. Eng. Prod. World*, 2008(09):1-2. In Chinese (Brian M Blum. ZigBee 与 ZigBee PRO: 哪一个特性集最适合 [J]. 电子设计技术, 2008(09):1-2)

[9] Tan Jiaxi, Le Xiufan, Hu Nan, Wang Pengcheng. Design of low-power temperature monitoring system based on ZigBee Pro [J]. *Sensor World*, 2009(12):1-4. In Chinese (谈加西, 乐秀璠, 胡南, 王鹏程. 基于 ZigBee Pro 的低功耗温度监测系统的设计 [J]. 传感器世界, 2009(12):1-4)

[10] An Junshe, Liu Yanqiu, Sun Huixian. Implementation of an Embedded System Based on VxWorks [J]. Computer Engineering and Applications, 2003(07):117-120. In Chinese (安军社, 刘艳秋, 孙辉先. 基于 VxWorks 的嵌入式计算机系统的设计与实现 [J]. 计算机工程与应用, 2003(07):117-120)

[11] Liu Feng, An Junshe. 1553B simulation system based on VxWorks [J]. Computer Engineering And Design, 2006, **27**(24):4739-4742. In Chinese (刘峰, 安军社. 基于 VxWorks 的 1553B 仿真开发系统 [J]. 计算机工程与设计, 2006, **27**(24):4739-4742)

[12] Sensirion. SHTlx/SHT7x Humidity & Temperature Sensor Datasheet [EB/OL]. http://www.sensirion.com/en/home/#

[13] Texas Instruments. Z-Stack Developer's Guide [M]. San Diego, California: Texas Instruments, 2006