

适用于火箭环境监测的无线传感网络应用研究

崔思阳, 彭泳卿, 徐 辉

(北京遥测技术研究所, 北京 100094)

摘要: 无线传感技术在遥测领域一直以来有着重要地位, 以往的火箭监测传感网络对筒体内部环境参数测量时, 功耗较大, 且组网复杂; 为此, 提出了适用于筒体内环境参数测量的无线传感网络设计方案, 课题详述了硬件和软件的设计方案, 系统硬件选用 CC430F5137 型片上系统 (SOC) 芯片作为 CC430 模块的主要搭建装置, 阻抗匹配电路与 CC430 芯片的 RF_N 和 RF_P 连接; 线射频模块的天线选型为 AN1603—433 型天线, TL—4935 型电池, 并设计 ADS1210 测温模块; 软件配置 SimpliciTI 协议可实现点对点拓扑结构的定向连接, 并在 AP 节点处清晰标注网络主体的协调拓扑情况, 使整个网络传输信道呈现一种稳定的星型连接状态; 给出了基于 CC430 的适用于航天复杂环境的无线传感网络设计实例, 以监测筒体内的温度、湿度环境参数, 并通过实验证明了本设计根据电池容量和单次发射功耗计算, 电池可满足 316800 次数据传输, 满足在 1~2 年时间内进行实时性监测的使用要求, 具有低功耗的特点, 且系统误码率为 0.23% 可靠性较高, 组网灵活。

关键词: 无线传感网络; CC430; 火箭环境参数测量

Application Research of Wireless Sensor Network for Rocket Environment Monitoring

Cui Siyang, Peng Yongqing, Xu Hui

(Beijing Institute of Telemetry Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Wireless sensor technology has always played an important role in the field of telemetry. In the past, the rocket monitoring sensor network used for the measurement of simplified internal environmental parameters, the power consumption was large, and the networking was complicated. To this end, a wireless sensor network design scheme suitable for the measurement of environmental parameters in the rocket body is proposed. The subject details the hardware and software design. The system hardware uses the CC430F5137 system-on-chip (SOC) chip as the main construction device of the CC430 module. The impedance matching circuit is connected to RF_N and RF_P of the CC430 chip. The antenna selection of the line RF module is AN1603—433 antenna, TL—4935 battery, and the ADS1210 temperature measurement module is designed. The software configuration SimpliciTI protocol can realize the directional connection of the point-to-point topology, and clearly mark the coordination topology of the network main body at the AP node, so that the entire network transmission channel presents a stable star connection state. The design example of wireless sensor network based on CC430 for aerospace complex environment is given to monitor the temperature and humidity environment parameters in the rocket body. The experiment proves that the design is based on battery capacity and single emission power consumption. It meets 316800 data transmissions, meets the requirements for real-time monitoring in 1 year to 2 years, has low power consumption, and has a system error rate of 0.23%. It has high reliability and flexible networking.

Keywords: wireless sensor networks, CC430, rocket environmental parameters monitoring

0 引言

随着航天飞行器技术的发展, 箭载测试系统的规模和复杂程度日益提高, 现役箭载测试系统在测点规模、测点灵活配置、线缆复杂布线、多参数集成测试和数据智能分析等方面难以满足未来复杂航天器多样化的测试要求。这就对基于无线技术的新型遥测系统提出了需求。与传统测试系统相比, 箭载无线传感网络在电缆网设计, 智能化设计和系统组成具有诸多优势。目前, 在国际上, 美国成功的将无线传感技术应用于航天领域, NASA 曾在航天飞机上采用无线手段传输热敏电阻的温度数据; 国际空间站 Ki-

bo 试验舱内采用无线微重力测量单元以实现空间微重力的测量。自 2016 年以来, NASA 已将基于能量收集技术的无线传感测量系统进行试验, 并进行了三次成功的搭载实验。相比国外情况, 我国的箭载无线传感网络研究方兴未艾, 尚无法大规模满足测量要求。其差距主要体现在可靠性、低功耗水平和智能化水平不足 3 个方面。2018 年 5 月 4 日, 我国航天科技一院一部长三乙搭载无线传感网络系统首飞圆满成功预示着这项技术具有革命性的发展前景^[1]。

本文提出了一套适用于航天复杂环境中的无线组网的测量方案, 采用了 TDMA 技术, 实现了对不同节点的分时采集工作, 并利用节点的精确时间同步、低功耗侦听技术和超低的休眠功耗极大的延长了节点寿命; 并通过功耗试验和可靠性试验证明了该系统具有功耗低, 可靠性高的特点。

收稿日期:2019-03-08; 修回日期:2019-04-11。

作者简介:崔思阳(1993-),男,天津人,硕士,助理工程师,主要从事无线传感方向的研究。

1 总体设计方案

1.1 系统整体设计

一个完整的无线传感网络主要包含了无线传感节点, 中继节点和数据综合处理装置及 PC 端设备。各类型传感器的功能为采集环境信息, 如温度湿度等, 将信息以无线通讯的方式上传至数据综合处理装置, 如远距离传输还需要中继节点进行数据转发与传递。数据经数据综合处理装置以有线方式转发至 PC 端设备, 可通过 PC 端的成熟软件进行对各个无线节点进行监控。其整体框架以概念图模型的形式总结如下:

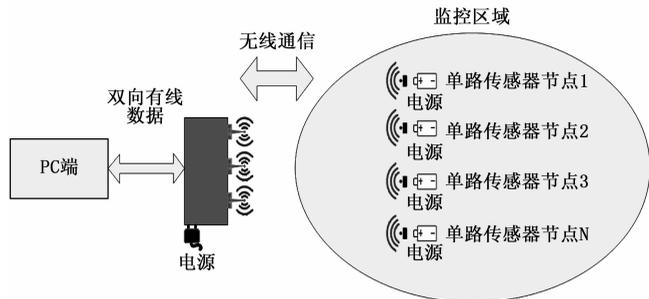


图 1 系统设计概念图

1.2 芯片选型

现阶段国际市场中的各大知名院校均以取得科研成果作为最终目的, 设计出大量具备低能效、高性能的传感器网络节点, 其详细参数及型号条件如表 1 所示。

表 1 无线节点技术参数设置

射频芯片	节点名称	使用频段	处理器
CC1101, CC2420	WSN430	433MHz, 868MHz	MSP430F1611
CC2420	Mica	2.4GHz	ATMEGA128
片上集成	CUTEBOX	433MHz	CC1101
片上集成	eZ430—Chronos	433MHz, 868MHz, 915MHz	CC430F6137

CPU 作为无线传感器节点中的重要数据处理设备, 可以单纯的依靠射频模块对数据信号进行无线收发处理。但在过去的实践过程中, 射频模块和 CPU 总是保持独立存在的连接状态, 不仅大大提升了硬件电路的铺设难度, 也使产品处理技术始终处于低级水平。随着科学技术手段的进步, CPU 和射频模块终于成为了合并芯片中的独立组成结构, 不仅有效降低了硬件电路的搭建难度, 也充分简化了外围电路、缩小了传感器节点所占物理体积, 促使产品设计水平逐渐走向成熟。如表一中 CUTEBOX 节点和 eZ430—Chronos 节点, 都是成熟的采用片上集成技术的芯片, 其方案集成度高, 周围电路设计简便, 提高了系统的可靠性。

ISM Band 是一种由 ITU—R 组织定义的系统频段选择方式, 其主要承用对象包含工业、医学、科学三大领域, 且整个使用过程不包含任何的授权费用。为提升传感器节点的综合安全系数, 在日常使用过程中只开放 260~470

MHz、902~928 MHz、2.4 GHz 三个免许可用频段, 对于不同国家或地区的多层次使用者来说, 可以根据其自身所处的地域环境来选择最为适宜的传输频段。就目前情况来看, 我国区域内所使用的 ISM 频段大多为 433 MHz 或 2.4 GHz, 其它频段虽也具备少部分使用者, 但因国际限制等多方面因素, 使得频段自身的稳定性仍然不能达到理想应用标准。从电磁波原理角度而言, 波长越长, 电磁波的传播能力越强, 同时传输的速率越低。考虑到箭载无线传感网络处于箭载环境的狭小封闭且多障碍的环境中, 无疑较小的频率可以保障数据传输的可靠性与整个系统的稳定性。本文设计的节点为缓变参数节点, 数据传输量较小, 且考虑到箭体内的遮挡环境, 需要电磁波具有较强的绕射能力, 故采用 433 MHz 的传输频段。

综合以上方面考虑, 可选芯片型号为 CC430F5137。片上基于 CC1101 内核射频模块的简化框图如图 2 所示。

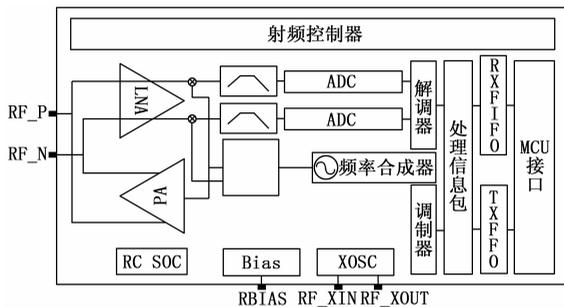


图 2 射频模块简化框图

RF1A 内核中的所有发射器结构均是射频频率作为合成基础, 且所有的用户数据必须在经过包处理器后, 才能添加足够的包同步字参数和地址信息, 再经由调制器传输至频率合成器, 完成后续的操作处理。频率合成器包含一个 LC 压控型振荡器和一个 90°相移器, 当后信号进入功率放大器后, 射频模块可自发通过天线组织对数字可调信号进行最大化处理, 并将这些信号借助输出组织传输到各级消耗结构。CC1101 内核作为射频模块的功耗优化设备, 具备完整的无线唤醒功能, 可使芯片在非工作时段保持良好的休眠状态, 这也是目前公认性能最优的 RF 模块低功耗芯片之一。

2 硬件电路设计

本文中节点的硬件结构图如图 2 所示。

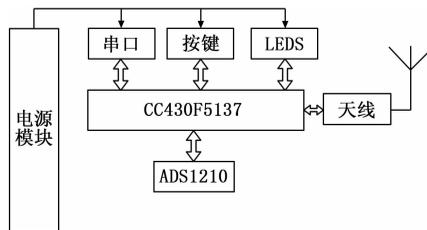


图 3 硬件节点结构图

2.1 CC430 芯片外围电路

硬件选择主要考虑射频模块和微控制器模块的选择, 我保证外围电路具备较强的供电输出能力, 本文以 TI 公司

生产的 CC430F5137 型片上系统 (SOC) 芯片作为 CC430 模块的主要搭建装置, 该芯片只能供小型无线传感网络使用, 具备小型化, 智能化, 集成化等多项特点^[2-3]。

在充分考虑 CC430 模块的各项组成设备后, 参考已投入使用的设计思路, 完成该模块的电路设计操作。

2.2 天线匹配电路设计及天线选型

天线阻抗匹配电路天线阻抗需要匹配电路。阻抗匹配电路与 CC430 芯片的 RF_N 和 RF_P 连接。为保证射频操作结果的良好适应能力, 工程师会根据设备所处环境条件的不同, 选择最为适宜的传输天线。天线选择过程中, 应用成本、传输性能、流量大小是最重要的基本物理条件。芯片天线、陶瓷天线、鞭状天线是三种常见的 PCB 天线种类, 根据材料物理性质的不同, 每种天线所面对的使用环境也不尽相同, 其具体应用优缺点及适应环境条件如表 2 所示。

表 2 几种常见天线对比

天线类型	特点
PCB 天线	成本低, 小尺寸, 性能一般, 设计难度适中
陶瓷天线	成本低, 较小尺寸, 性能较好, 设计难度低
鞭状天线	体积相对较大, 但物理性能优良, 建设成本较高, 在一些特殊的应用中难以适用。

本设计方案从成本、尺寸和性能 3 个角度考虑, 选择尺寸适中, 设计难度小且性能较好的陶瓷天线作为无线射频模块的天线使用, 具体选型为 AN1603—433 型天线。

2.3 电源模块设计

电源模块由电池供电。电池采用 TL—4935 型电池, 该电池输出电压为 3.6 V, 适用于各种仪器仪表。电源模块采用了 TPS62743 超低静态电流降压转换器。该器件具有典型值为 360 nA 的超低静态电流。该器件提供了 8 个可编程的输出电压, 可以在 1.2 V 到 3.3 V 之间调节输出电压。只需要一个小型输出电容即可获得低输出电压纹波和低噪声。一旦输入电压接近输出电压, 器件可进入 100% 无纹波模式, 以防止输出纹波电压增大。电源模块的设计满足了整体节点的低功耗需求。节点的电源系统如图 4 所示。

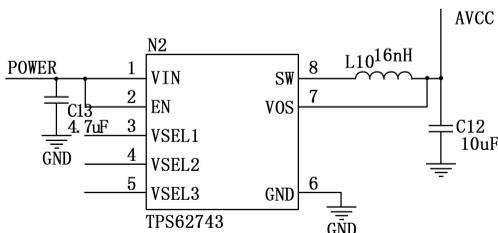


图 4 电源模块图

2.4 ADS1210 测温模块

ADS1210 模块主要包括热电偶模拟前端、热电偶冷节点温度补偿、热电偶集成测量电路等。其系统组成框图如图 5 所示。

其中, 热电偶模拟前端为模数转换提供合适的偏置同时滤除共模和差模高频噪声, 防止采样混叠; 热电偶冷节

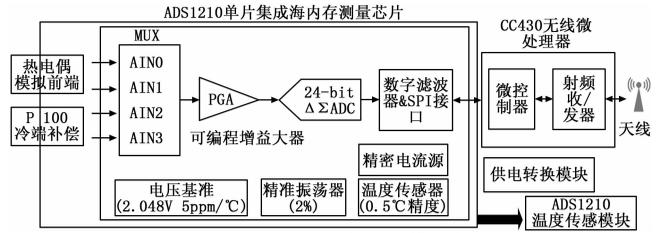


图 5 ADS1210 温度测量模块框图

点温度补偿, 利用 PT100 温度传感器补偿冷节点温度变化引起的测量结果漂移; 热电偶集成测量电路提供了 24 位高分辨率 A/D 转换, PT100 精密激励电流源, 利用 PT100 温度传感器实现冷节点补偿, 并且进行了数字滤波。

3 系统软件解决方案

3.1 SimpliCI 网络协议

根据硬件选择, 系统的软件设计采用 SimpliCI 网络协议。该协议具有如下特点:

通常情况下, SimpliCI 网络协议的物理规模相对较小, 完成简易的开发编译后只占用 8 K 左右的内存空间, 不仅具备应用成本低廉的实用有点, 且可以节省在处理器设备中所消耗的资源总量, 适用于中小型或小型的 WSN 应用开发环境。对于执行功能相对丰富的网络组织来说, SimpliCI 协议可实现点对点拓扑结构的定向连接, 并在 AP 节点处清晰标注网络主体的协调拓扑情况, 使整个网络传输信道呈现一种稳定的星型连接状态。作为网络层与网络应用层的唯一传输连接介质, SimpliCI 协议提供了最简单的执行管理功能, 在选择数据信道的同时, 实现对已占用频段的无线调制, 使互联网络始终处于一种安全加密状态。TI 公司在发布 SimpliCI 网络协议的同时, 对所有射频芯片和支持处理器都进行了移植处理, 使得与协议相关的所有源代码都处于透明化状态, 且受到外界云环境的影响, SimpliCI 协议从根本上实现了“零成本”占用, 这也是新型网络产品具备免费授权可能的主要原因^[4]。

其中, Nwk_freq.c 文件直接提供频率管理函数; Nwk_ioctl.c 文件负责处理 IO 接口事件, 并管理相关频率函数; Nwk_jion.c 文件可在占用网络中直接加入函数; Nwk_link.c 文件是生成网络连接函数的唯一目的区域; Nwk_mgmt.c 文件提供整个网络运行所需的管理函数; Nwk_ping.c 文件负责 Ping 功能函数的定向传输; Nwk_security.c 文件在主体网络中对函数进行加密处理; nwk.c 文件可以面向网络层提供基本运行函数; Nwk_api.c 文件是网络应用层的核心继承组织, 可逐一传输其它设备运行产生的 API 函数; Nwk_frame.c 文件则只能提供帧处理函数; Nwk_globals.c 文件在传输网络中管理所有数据型函数; Nwk_QMgmt.c 文件负责生成所有用于输入、输出处理的队列函数。

3.2 应用层程序设计

数据采集节点也叫终端节点, 以进行完整的数据采集操作作为实用目标, 在满足出发条件时, 利用 SimpliCI 协

议将已经采集到的网络数据传输至各级中心处理节点。在进行传感器网络信息接入之前, 终端节点设备必须经过底层协议栈、睡眠定时器、温度传感器等多项组成设备的初始化处理看, 并在确定输入具备反馈能力的前提下, 将其传输至数据存储中心。待一次完整的信息回馈运行后, 终端节点才可以完整的加入网络组织结构。在固定的间隔时间内, 温度传感器所采集的温度数据都必须在终端节点的促进下才可以进入中心节点, 其具体传输流程如图 6 所示。

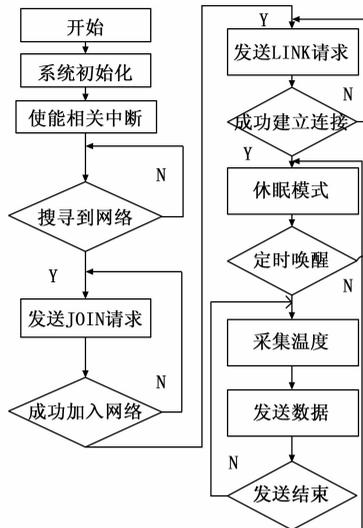


图 6 终端节点流程图

在休眠模式中, 为了降低系统功耗, 最优化的使用了 LPM3 模式, 使 CPU 停止活动, ACLK 保持活动, MCLK 和 DCO 被禁止。在程序设计中, 更多使用计算分支和快速查表来代替程序标志位和冗长软件计算, 减少了软件设计难度, 避免了频繁的子程序调用。同时为了增加系统可靠性, 设计了如图 7 的节点中断在入网流程^[5]。

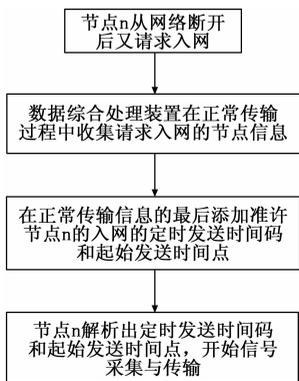


图 7 节点断网后重新入网流程

传感器节点断网后再次入网时, 根据无线网络协议监测网络的状态, 如发现网络已经建立, 则在网络传送数据的间隙时间段发送入网请求。负责管理传感器节点的最后一级中继器节点收到该请求后, 在下次正常传输过程中发送传输指令包, 传输指令包格式为在正常传输数据的最后两个字节添加时间码和起始发送数据时间点。传感器节点解算出时间码和起始发送时间点后开始进入网络正常

工作。

为了保证数据完整可靠传输, 采用了数据帧丢失监测方案。所有数据帧的末尾都缀连一个 TID 数据域结构, 用以检测数据在传输过程中是否出现了不可逆的丢失行为, 且对于接收到的数据信息来说, 仅提取其后缀的 TID 数据, 并将其与上一帧进行对比, 即可判定数据帧是否出现丢失行为。

表 3 TID 值与数据帧关系

TID 状态	结果
本次收到 TID < 上次收到 TID + 1	数据帧重传
本次收到 TID = 上次收到 TID + 1	正常
本次收到 TID > 上次收到 TID + 1	数据帧丢失

上述系统 TID 数据的原始宽度为 8 位, 与之相对应的 TID 最大值即为 255。当发送端 (接收端) 完成一次正常的的数据发送 (接收) 处理后, 相关 TID 数据变回自行进行加 1 处理。而当 TID 数据等于最大值 255 时, 下一次的 TID 数据变回自行回归为 0。若数据帧丢失行为出现在最大 TID 数据附近时, 首先需要确定具体的帧数丢失数量, 再将上述数值结果与数据 0 相加, 得出最终的 TID 数据结果, 但在此情况下, 系统会判定 TID 数据出现重传行为, 与之相关的一切操作都为误判断结果, 而 TID 窗口的出现有效避免了这种过于片面的判断操作。若预先设定 TID_WINDOW = 5, 当数据出现帧丢失行为时, 若本次丢失的帧数在最大误差范围 5 内, 则判定此次行为仅为一般性数据丢失现象; 若本次丢失的帧数超过最大误差范围 5 时, 则判定此次行为属于数据帧重传^[4]。

4 实验结果

4.1 测温实验

本次温度数据采集实验测试的目的是检测温度无线传感网络能否正常测温。系统中包含 1 个数据中心节点、5 个温度传感节点, PC 机作为串口调试助手软件, 可借助直接串口设备与数据中心节点直接相连。实验结果汇总如图 8 所示。

4.2 可靠性试验

上述实验过程中, 节点 1、节点 2 不参与 SimpliCI 网络协议的运行过程, 操作地点为相距 10 m 左右的空旷区域, 节点 1 在接收到有效数据后, 直接将其记录在射频模块的 FIFO 发送数据中, 并在射频模块启动后自主进入发送状态^[5-6]。节点 2 在接收到有效数据后, 首先向 FIFO 数据发出读取指令, 再借助串口设备将其发送至主机的 PC 端。在主机端接收数据并判断接收数据是否正确。整个过程中节点 1 每隔 1 ms (间隔时间可调) 发送一次数据, 连续发送数据 “1234” 10 000 次。

对于节点 1 来说, 经过 100 000 次的数据发送后, 就可以通过统计已接受到数据的数量级情况来判断数据的计算误码率。在上述实验测试过程中, 节点 2 接收到 23 个错误

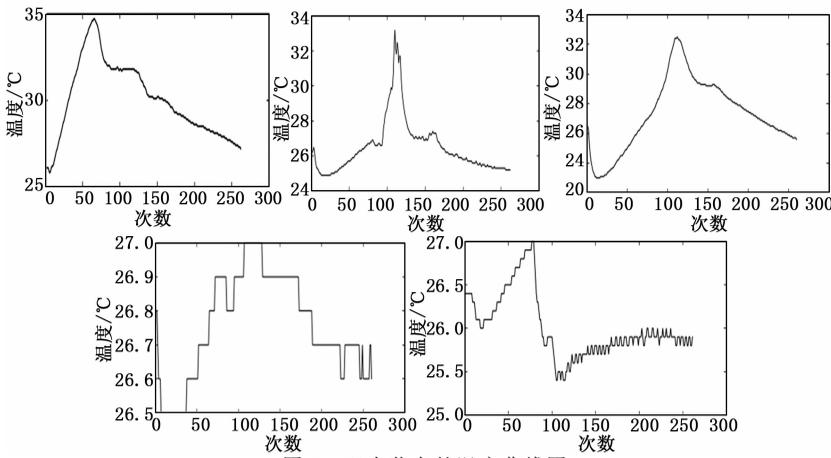


图 8 五个节点的温度曲线图

的数据字节,故与之相关的误码率结果为 $(23/10000) 100\% = 0.23\%$ 。

4.3 功耗实验

为了有效控制节点的电流消耗情况,将所有无线节点电阻外部都串联一个外接电源,并通过阻值调整的方式,使节点消耗电流始终小于小电阻电流^[7-9]。小电阻电流属于电阻自身的物理性质,可以通过小电阻电压与电阻值作比的方式获得。实际测量中,小电阻电压值始终在 $0 \sim 0.684$ V 之间浮动,所以节点两端电压只在 $3.8 \sim 4.5$ V 之间保持浮动。除上述标注值以外的节点电压数值,不会对节点的正常工作行为造成影响。将数据采集卡 NI PCI-6220 与小电阻相连,直接测量小电阻两端的电压变化情况。

实验过程中,先控制无线节点使其保持休眠状态,在固定时间节点 t_0 后,开始数据包发送行为,并为时间节点 t_1 作为结束,完成上述操作后再控制无线节点进入休眠状态。分析数据采集卡中的信息可知,无线传感器网络节点将大部分能量消耗在无线数据收发过程中。数据采集卡采集波形与数据发送过程经 matlab 处理结果如图 9 所示。

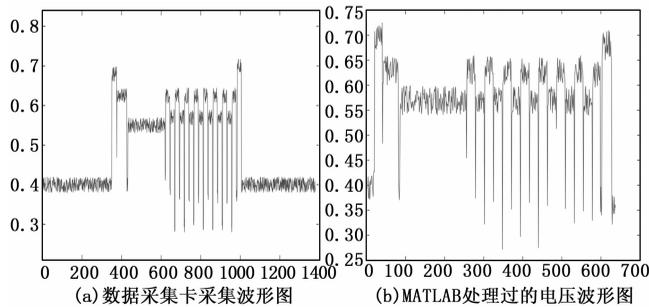


图 9 数据次波形与 MATLAB 处理波形

为数据采集卡中所显示数据为 15 欧姆电阻两端的电压值,计为 V_R ,则流经该节点的电流值为 $I = V_R/15$ 。受到稳压芯片的影响,节点电压 V_{MODE} 应等于 3.3 V,节点的瞬时功率 $P = V_{MODE} \times I$,总功耗为:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P dt \quad (1)$$

带入具体数据为:

$$E = \int_{t_0}^{t_1} 3.3 \times (V_R/15) dt \quad (2)$$

本次采样过程中的采样频率始终保持为 1000 samples/s,所以转换为离散公式后应有:

$$E = \sum_{n1}^{n2} P_n \Delta t \quad (3)$$

其中: $\Delta t = 0.001$ ms。

分析图 9 可知,本次数据采集操作射频模块的开启时间为 369 ms、结束时间为 994 ms,即 $t_1 = 369$ 、 $t_2 = 974$,整个过程经历了 625 ms。根据 matlab 积分计算结果可知,从 t_0 到 t_1 时间段内消耗的总功耗为 110.2 mW。

由电池容量和单次发射功耗计算,电池可满足 316 800 次数据传输,满足在 1 年—2 年时间内进行实时性监测的使用要求。

5 结论

本文以箭载应用的迫切需求为背景,结合无线传感器的技术特点,针对性的提出了用于监测箭载环境参数的无线传感网络的设计方案。硬件运行环境搭建采用低功耗的 CC430 芯片,并使其作为整个控制操作环节的唯一执行组件,在电源模块采用了 TPS62743 型低功耗芯片,和 AN1603-433 型天线选型完成测温节点的设计工作;在软件方面优化代码,减小运算量,延长节点休眠时间来进一步降低节点功耗并针对箭载环境监测的可靠性需求设计了节点断网重新入网流程。并且节点体积小,质量轻,工作于 433 MHz 使信号具有良好的强度。最终的三项实验证明了系统的设计有效可行,具有较强的可实现性和火箭应用价值。

参考文献:

- [1] 我国首次实现运载火箭测量系统传感系统无线传输 [J]. 传感器世界, 2018, 24 (6): 42.
- [2] 李伟,陈泽军,黄艳芳,等. 基于 CC430 与 PIC24FJ256 的无线温湿度监测系统设计 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (4): 158-160.
- [3] 王昕玮. 基于 SimplicTI 网络协议的无线温度采集系统 [J]. 科技创新与应用, 2017 (18): 63.
- [4] 何进. 基于无线传感网络的无人船舶远程遥控系统设计 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (16): 176-178.
- [5] 张超,金光,江先亮. 面向海岛环境的海雾能见度监测系统应用研究 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (8): 151-158.
- [6] 陈懿,王绍源,陈清华. 基于无线传感网络的实时环境监测系统的设计与实现 [J]. 仪表技术与传感器, 2018, 428 (9): 83-87.
- [7] 李军,赵畅. 基于核自适应滤波的无线传感网络定位算法研究 [J]. 农业机械学报, 2018, 49 (4): 241-248.
- [8] 聂云峰,汪涛,鄢化鹏,等. 基于四叉树多层次数据融合的无线传感网络路由协议研究 [J]. 传感技术学报, 2018, 31 (9): 110-114+128.
- [9] 吴小军,沈士根,赵金皓. 基于 NB-IoT 技术的无线传感网融合组网研究 [J]. 计算机应用与软件, 2018, 35 (6): 201-205.