

基于非分散红外光谱原理的无线式火灾早期报警系统设计与实现

周庆隆¹ 叶刚²

¹(佳能信息系统(上海)有限公司 上海 200235)

²(埃森哲(中国)有限公司先进技术中心 上海 200072)

摘要 针对高大或者开放空间等无法采用外部供电的木质古建筑,设计并实现采用热释电材料传感器,基于非分散红外光谱原理和无线传感网技术的远程分布式火灾监测报警系统。实验结果表明,该系统实现电池供电的低功耗无线火灾探测网络,易于布置,施工简单,可以非常方便地扩大监测规模。实现对碳氢化合物类物质燃烧的火灾早期探测,准确度高,误报率低,适合传统消防探测手段无效,或者无法外部供电等的特殊场合使用。

关键词 热释电材料 非分散红外光谱 无线传感网 物联网 自回归积分滑动平均模型 神经网络

中图分类号 TP3 **文献标识码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2019.04.019

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF WIRELESS EARLY FIRE ALARM SYSTEM BASED ON NDIR

Zhou Qinglong¹ Ye Gang²

¹(Canon Information Systems(Shanghai), Inc., Shanghai 200235, China)

²(Accenture(China) Co., Ltd. Advanced Technology Center, Shanghai 200072, China)

Abstract Tall wooden ancient buildings or open spaces cannot use external power supply. In this regard, we designed and implemented a remote distributed fire monitoring and alarm system based on pyroelectric material sensor, non-dispersive infrared spectrum and wireless sensor network. The experimental results show that the system realizes a low-power wireless fire detection network powered by batteries, which is easy to deploy, simple to construct and easy to expand the monitoring scale. It realizes the early detection of hydrocarbon combustion with high accuracy and low false alarm rate. It is suitable for special occasions such as invalid traditional fire detection means, or unable to provide external power supply.

Keywords Pyroelectric material NDIR Wireless sensor network Internet of Things ARIMA Neural network

0 引言

文物古建筑是中华民族珍贵五千年历史文化遗产的重要组成部分,是中华文明源远流长的历史见证,是不可再生的人文资源。因此,保护好这些文物古建筑,利在今世,功在千秋。在所有对文物古建筑的危害当中,火灾无疑是首当其冲。据统计,2012年至2016年5年时间,国家文物局接报重大文物火灾事故80余起,很多重要文物建筑在大火中受到严重损毁甚至全部灭失。文物古迹大部分为木材质,出于保护目的,现

在基本不允许接入电线,也不允许带有破坏性的穿管布线施工。所以针对文物古建筑以及高大或者开放空间等传统感烟、感温探测器不适用的场合,如何利用新型无线传感手段在火灾发生早初期及时报警,迅速调集资源,有效地进行扑救,减少火灾的危害,就具有非常巨大的意义。

1 系统传感原理

根据 Lambert-Beer 定律^[1],不同物质的分子结构对红外光具有特定的吸收波长,由吸收的强弱可测得

气体分子成分的浓度。 CO_2 的透射光谱如图 1(a) 所示,在 $4.26 \mu\text{m}$ 波长大气对 CO_2 存在很高的吸收率,如图 1(b) 所示阳光中的该波段能量基本被大气吸收。由于空气中 CO_2 的浓度基本恒定,传感器在 $4.4 \mu\text{m}$ 波长测得的辐射强度也应该基本稳定。

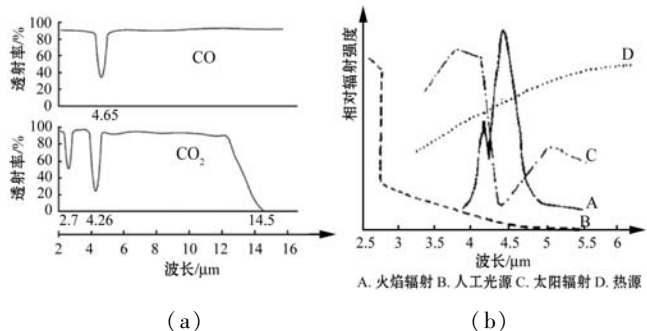


图 1 CO/CO_2 透射光谱图和不同光源能量光谱图

含碳物质燃烧会产生 CO/CO_2 , 不同物质燃烧时存在 $0.5 \sim 30 \text{ Hz}$ 的不同闪烁频率,其辐射能量和时间关系也存在不同。图 2 展示了木材和汽油燃烧的辐射能量和时间关系图。

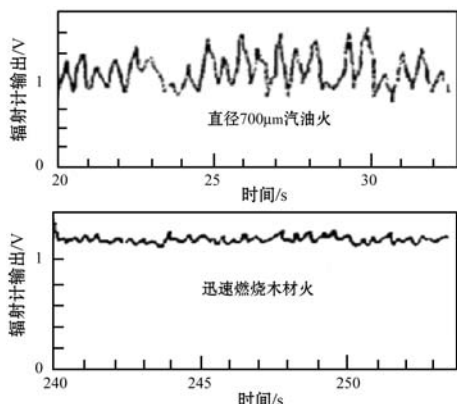


图 2 汽油和木材燃烧辐射能量和时间关系图

热释电材料受到调制辐射加热后,晶片温度将发生微小变化,由此引起晶体极化状态的变化,从而使垂直于自发极化轴方向的晶体单位表面上的电荷发生改变。如果利用滤光镜(Filter)实现对入射光线的特定波长选择过滤,利用 FET 场效应管将热释电效应引起的微小电荷变化信号放大输出,后续的信号处理电路即可采集出选择波长辐射中调制信号的幅度和频率。

本设计中选择了 $3.8 \mu\text{m}$ 作为参比光段, $4.4 \mu\text{m}$ 作为测量光段,采用中科院上海光机所袁新强团队开发的新型氟化物红外玻璃材料^[2]作为探测器密闭壳体的窗口材料,中科院上海硅酸盐所罗豪魁团队研发的新型弛豫铁电晶体作为传感单元材料,其信噪比相对于传统钽酸锂热释电材料提高 4 倍^[3]。利用上述原理开发了对火焰闪烁的调制信号进行采集的探测器,使用 Zigbee 协议^[4]的无线传感网传输至物联网关并上传中心系统,在中心系统中利用神经网络模型对信号

进行分析,实现了火灾的早初期报警。

2 系统总体结构

系统包括无线火灾探测器、无线传感网路由器、物联网关和远程监控中心四部分。其中无线火灾探测器、无线传感网路由器、物联网关采用 2.4 GHz 频段 Zigbee 协议构成局域无线传感网络。无线火灾探测器与无线传感网路由器之间采用星型组网。无线传感网路由器与物联网关之间支持 Mesh 组网。物联网关和远程监控中心采用 IP 网络协议构成广域通信网络。监控中心采用局域网构成一个多服务器的分布式系统。系统工作原理与整体架构如图 3 所示。设置于火灾探测现场的无线火灾探测器采集探测区域的 $4.4 \mu\text{m}$ 和 $3.8 \mu\text{m}$ 的红外信号,经无线路由器和物联网关上传给远程监控中心,在监控中心系统中采用神经网络模型对信号进行分析。

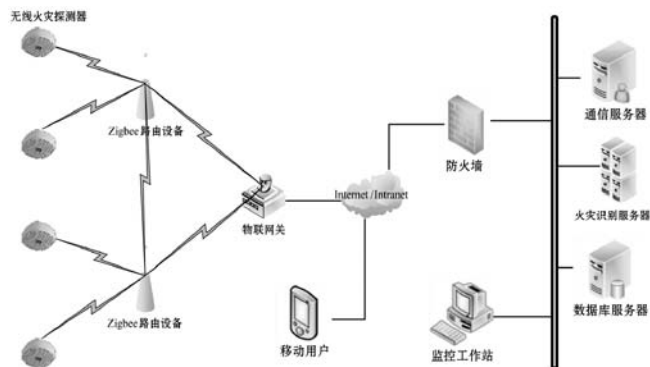


图 3 系统整体结构与工作原理

3 无线火灾探测器设计

无线火灾探测器主要由热释电传感器、低功耗模拟电路、MSP430 低功耗单片机^[5]、Zigbee 终端节点无线通信模组和大容量锂电池构成。探测器通过红外滤光片完成 $3.8 \mu\text{m}$ 和 $4.4 \mu\text{m}$ 波长的红外信号选择,使用 2 个热释电传感单元将红外信号转换为电压信号,利用 2 路采用巴特沃斯滤波和多级运放的低功耗模拟电路完成信号的低频带通滤波和放大。利用 MSP430 芯片自带的信号比较器实现 MSP430 内核的报警唤醒。其信号处理的流程如图 4 所示。

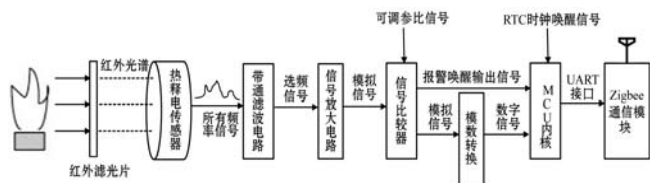


图 4 探测器信号处理流程

为节省电池用量, MSP430的内核采用间断工作机制。在 $4.4\ \mu\text{m}$ 信号强度处于设定阈值以下场合,探测器的微控制器通过RTC时钟定期休眠和唤醒,微控制器被唤醒期间采集红外信号并上传。如果信号强度高于设定阈值,则模拟信号比较器主动唤醒微控制器进行数据采集,并上传报警。信号比较器的参比信号可由中心系统远程调整。

4 系统网关设计

物联网网关的硬件系统构成如图5所示。Zigbee协调器负责和下属的路由节点,或者直接和终端节点通信。并利用UART接口和ATMEL9200微控制器^[6]进行数据通信,ATMEL9200的网络口可以外接其他无线通信DTU设备,或者通过有线网络与中心系统通信。

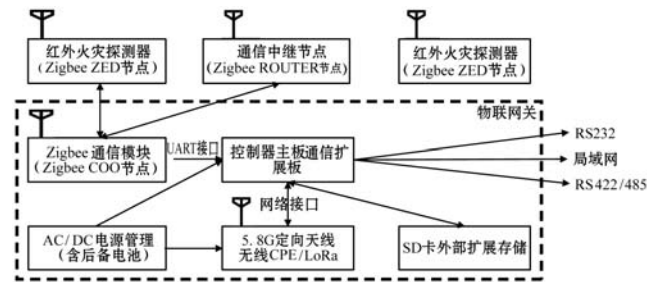


图5 物联网网关硬件系统图

物联网网关系统采用嵌入式Linux作为操作系统,应用程序使用QT/C++开发,嵌入式SQLite数据库保存各种配置参数和各个火灾探测器的数据,以备上行网络故障时重传使用。物联网网关还运行一个GoAhead嵌入式Web服务器以供网关的参数配置网页使用。物联网网关和中心系统之间采用MQTT协议进行数据传输。

根据含碳物质燃烧时会释放大量的 CO/CO_2 ,在 $4.4\ \mu\text{m}$ 波长的红外辐射信号会有较大增强,同时参比 $3.8\ \mu\text{m}$ 波长的信号强度相对稳定的物理现象,燃烧状态时的两个信号之间的强度差就比无燃烧状态时高。据此,假设火灾探测器输出信号为 $x(t)$,由于信号变化的不确定性和受环境背景噪声影响,可以把 $x(t)$ 看成一个随机过程,由火灾信号和非火灾的噪声信号两部分构成。其数学表示如下:

$$x(t) = x_f(t) + x_n(t) \quad (1)$$

式中: $x_f(t)$ 是火灾特征参数信号, $x_n(t)$ 是非火灾的噪声信号。两红外波长信号强度差计算可由下式表示:

$$y(t) = |x_{4.4}(t) - x_{3.8}(t)| \quad (2)$$

式中: $x_{4.4}(t)$ 表示火灾探测器的 $4.4\ \mu\text{m}$ 红外信号输

出, $x_{3.8}(t)$ 表示 $3.8\ \mu\text{m}$ 红外信号输出。根据阈值进行火灾判断的计算由下式表示:

$$D[y(t)] = \begin{cases} 1 & y(t) > S \\ 0 & y(t) \leq S \end{cases} \quad (3)$$

式中: $D[y(t)] = 1$ 表示判断为火灾, $D[y(t)] = 0$ 表示判断为非火灾, S 为中心系统远程设定调整的报警阈值。

利用上述算法网关可以进行一定程度的边沿计算,可对两个波长的信号数据经卡尔曼滤波后做差分处理,如果差分信号强度超过了SQLite数据库中设定阈值即向中心系统报警。

5 中心软件系统设计

由于本文的火灾探测器只是中心系统接入的一种传感设备,考虑到其他大量传感器接入的规模和降低开发的难度,中心系统尽量采用了各种开源项目的成熟软件作为工业化的系统组件,以积木化方式搭建了主要由数据采集系统和大数据系统构成如图6所示的中心软件系统。

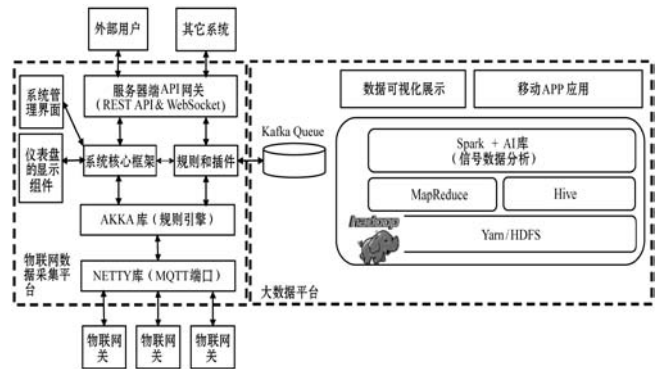


图6 中心软件系统架构图

5.1 数据采集系统

数据采集中心系统是笔者所在公司开发的一个通用数据采集平台。主要完成对现场各种设备的数据采集,并负责中心系统的指令向目标设备的下行传输。中心系统的通信服务必须满足大量接入设备的并发通信,考虑到通信的可靠性和通信服务器的性能,通信服务采用了非阻塞的异步通信模型(NIO)^[7],对于并发通信线程池的管理采用基于事件通知机制的Reactor反应堆线程模型^[8]。大量使用异步并发的线程满足大容量、高并发的要求。并通过线程池管理的线程复用减少线程启动开销,满足通信的速度要求。为此系统采用了开源NETTY库来满足前述通信相关的技术要求。

整。考虑到未来其他监测因子对阈值参数的影响,系统选择了在便于数据综合分析的大数据系统中进行相关处理。

本系统采用了自回归积分滑动平均模型 ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Model)^[10] 来实现对 2 个波长红外信号的差分数据阈值做预测。并计算实际数据和预测的误差,据此更新网关设备的阈值参数。所谓 ARIMA 模型,是指将非平稳时间序列转化为平稳时间序列,然后将因变量仅对它的滞后值以及随机误差项的现值和滞后值进行回归所建立的模型。应用的基本模型为 $ARIMA(p, d, q)$, 其中 p 为自回归项数, q 为滑动平均项数, d 为使之成为平稳序列所做的差分次数(阶数)。ARIMA(p, d, q) 模型是 ARMA(p, q) 模型的扩展。ARIMA(p, d, q) 模型可以表示为:

$$(1 - \sum_{i=1}^p \varphi_i L^i)(1 - L)^d x_t = (1 + \sum_{i=1}^q \theta_i L^i) \varepsilon_t \quad (4)$$

式中: L 是滞后算子(Lag operator), $d \in Z, d > 0$ 。Z 为全体整数集合。 φ_i 表示自回归的系数, θ_i 表示滑动平均系数。 ε_t 表示非线性的零均值白噪声随机误差序列。

单纯利用阈值过滤还是会存在一些漏报和误报的情况。经过对燃烧信号的特性分析,得知火焰波形具有很强的跳动性,即使经过了探测器低通滤波电路处理,仍然具有较强的波动性。火焰频谱也具有比较大的幅值,经统计发现频谱实际主要集中在 5 ~ 10 Hz 附近。虽然,背景噪声的频谱也集中在该频段,但火焰频谱的最高幅值通常比背景噪声大,这主要是因为燃烧释放的辐射能量比较强。结合这些特性可以将具有跳动性而幅度能量小和具有大的能量而波动非常平滑的数据归类为噪声干扰。以此,系统采用 FFT(Fast Fourier Transform)进行信号变换。FFT 是离散傅里叶变换的快速算法,可分为按时间抽取算法和按频率抽取算法,可以将一个时域信号变换到频域。有些信号在时域上是很难看出什么特征的,但是如果变换到频域之后,就很容易看出特征了。FFT 还可以将一个信号的频谱提取出来,这在频谱分析方面会经常用到。利用取得信号的频域数据和电压幅值,采用 Spark 自带 BP 神经网络^[11] 对所采集的实时数据进行频域和时域相结合的分析来减少漏报和误报,并提供对阈值判断难于实现的木材阴燃的探测。

在信号特征参数提取上,对信号电压波形跳动性的描述方面,系统首先查找信号电压的最大和最小值,根据设定窗口数据的均值取一个基准系数 k , 分别按照 $k \times$ 最大值和 $k \times$ 最小值画两条水平直线,作为正基准线和负基准线,用于度量波形跳动性的大小。若跳

动大,则波形和基准线交点就多,跳动小则交点少。波形与基准线交点个数分别计算成正交点数和负交点数。并根据波形跳动性利用统计分析数据远程修改探测器信号比较器的参比信号报警阈值。对频谱幅值的描述方面,系统查找频谱图中的波峰,记下幅度最大的前三个峰值的幅度和频率。另外,系统也通过高斯正态分布的相关参数对频谱幅值进行描述。系统主要选取上述的特征参数用于 BP 神经网络的火灾识别。BP 神经网络输出火焰确率、阴燃确率的 2 个参数,分别为 $fire(t)$, $smolder(t)$ 。进行火灾判断的计算由下式表示:

$$DF[fire(t)] = \begin{cases} 1 & fire(t) > M \\ 0 & fire(t) \leq M \end{cases} \quad (5)$$

式中: $DF[fire(t)] = 1$ 表示判断为火灾, $DF[fire(t)] = 0$ 表示判断为非火灾, M 为火灾判定阈值。

进行阴燃判断的计算由下式表示:

$$DS[smolder(t)] = \begin{cases} 1 & smolder(t) > N \\ 0 & smolder(t) \leq N \end{cases} \quad (6)$$

式中: $DS[smolder(t)] = 1$ 表示判断为阴燃, $DS[smolder(t)] = 0$ 表示判断为非阴燃, N 为阴燃判定阈值。

为了实现 BP 网络训练的快速收敛,采用了附加动量的 BP 算法。附加动量法^[12] 可使网络在修正权值时,不仅考虑误差在梯度上的作用,而且考虑曲面上变化趋势的影响,其作用类似一个低通滤波,允许网络忽略网络上的微小变化特性,可以减少学习过程的振荡,改善收敛性,极大地缩短模型训练的时间。

6 实验

为了检验系统对火灾探测的有效性,本实验根据文物古建实际的环境,分别模拟了建筑外部的灌木林地火灾、建筑内部无阳光干扰条件下的火灾、建筑内部存在阳光干扰条件下的火灾,进行了国家标准火焰最远探测距离测试、模拟阴燃等实验。火灾和阴燃的综合判定函数的计算表达式如下:

$$SJ(t) = D[y(t)] \parallel DF[fire(t)] \parallel DS[smolder(t)] \quad (7)$$

式中: $D[y(t)]$ 为式(3)的计算结果; $DF[fire(t)]$ 为式(5)的计算结果; $DS[smolder(t)]$ 为式(6)的计算结果。

建筑外部灌木林地火灾的测试中,分别使用 32×32 cm 正庚烷的国家标准火源和煤油小火把进行了实验。图 9(a) 显示了测试的侧面全景, (b) 显示了透过小树林和灌木丛探测器视点正面所观察到的火焰大小, (c) 显示了透过灌木丛探测器视点正面所观察到小火把的火焰大小。

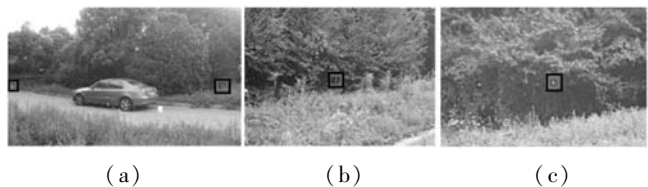


图9 建筑外部灌木林地火灾测试

图 10(a) 显示了建筑物内部无阳光干扰条件下探测器对正面 10 m 距离的打火机火光进行探测。(b) 显示建筑物内部阳光干扰条件下对小火把火光进行测试。

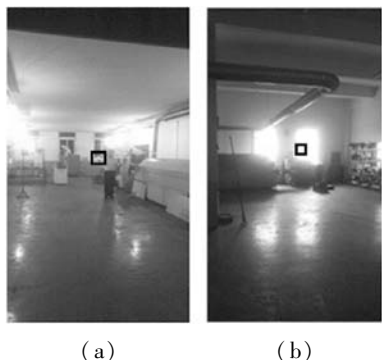


图 10 建筑物室内火灾测试

图 11 显示在高度 5 m 左右设置的探测器,对其正下方使用纸板和电热吹风机模拟木材阴燃的测试。在纸板逐渐出现炭化和阴燃的零星阴燃点现象时被探测器检测,系统报警。

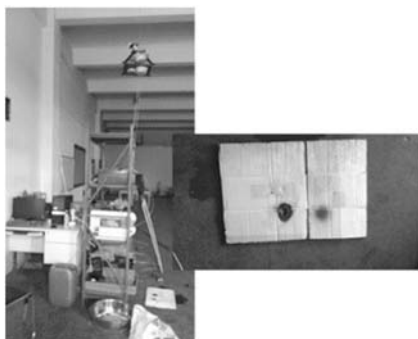


图 11 建筑物室内阴燃测试

另外,还用 32 × 32 cm 正庚烷的国家标准火源在室外无遮挡的夜晚条件下的最远探测距离测试。各种测试的结果数据如表 1 所示。

表 1 不同实验的测试结果表

国家标准 (GB15631-2008)		本系统实验	
测试条件	结果/m	测试条件	结果/m
32 × 32 cm 正庚烷, 室内国家标准火源无阻隔	一级:25 二级:17 三级:12	室内无阳光, 打火机火焰 (气门最大)	15
		室内无阳光, 打火机火焰 (气门最小)	9
		室内有阳光, 煤油小火把	25
		室外万年青 1 米厚度阻隔煤油小火把	10

续表 1

国家标准 (GB15631-2008)		本系统实验	
测试条件	结果/m	测试条件	结果/m
32 × 32 cm 正庚烷, 室内国家标准火源无阻隔	一级:25 二级:17 三级:12	万年青灌木 + 小树林的 10 米厚度阻隔 32 × 32 cm 正庚烷。国家标准火源	25
		阴燃模拟测试 纸板 + 电热吹风	5
		无阳光干扰室外最远探测距离, 32 × 32 cm 正庚烷。国家标准火源	69

实验结果表明:在室内,室外的各种干扰条件下,本系统都取得了优于国家标准要求的结果。在国家标准要求的测试条件下,无漏报和误报,满足文物保护部门的使用要求。

7 系统应用情况

本方案系统在国家重点文物——某公园的勤政殿安装测试使用,取得了良好的效果。系统在勤政殿中布置多个火灾探测器,并在勤政殿后设置一个路由节点,在离勤政殿约 30 m 处的顶坡设置通信网关,采用 Wi-Fi 定向天线实现和约 500 m 距离处的监控中心之间的通信。系统设置现场的情况如图 12 所示。

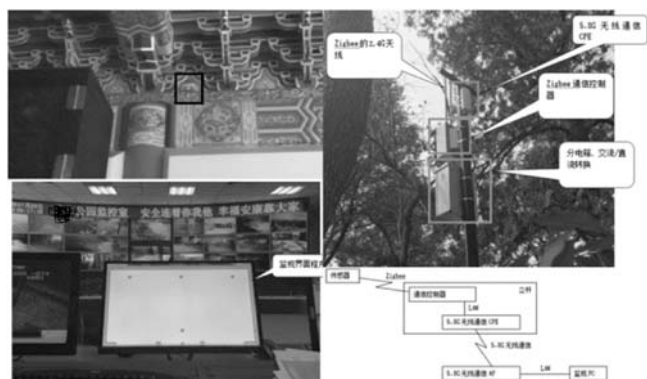


图 12 勤政殿无线火灾监测系统

8 结 语

本设计方案通过探测器、物联网网关和中心系统中采用多种算法的多级信号分析、低功耗电池设备和无线通信手段,为文物古建筑等传统火灾检测手段不适用的特殊场合提供了新型的火灾检测手段。并通过各种实验和实际项目应用对系统的有效性进行了验证,证明系统架构设计合理,监测规模和监测因子扩展性好。本系统为目前急需解决的文物古建筑火灾监测问题提供了有效的技术手段,具有应用推广的价值。

(下转第 134 页)

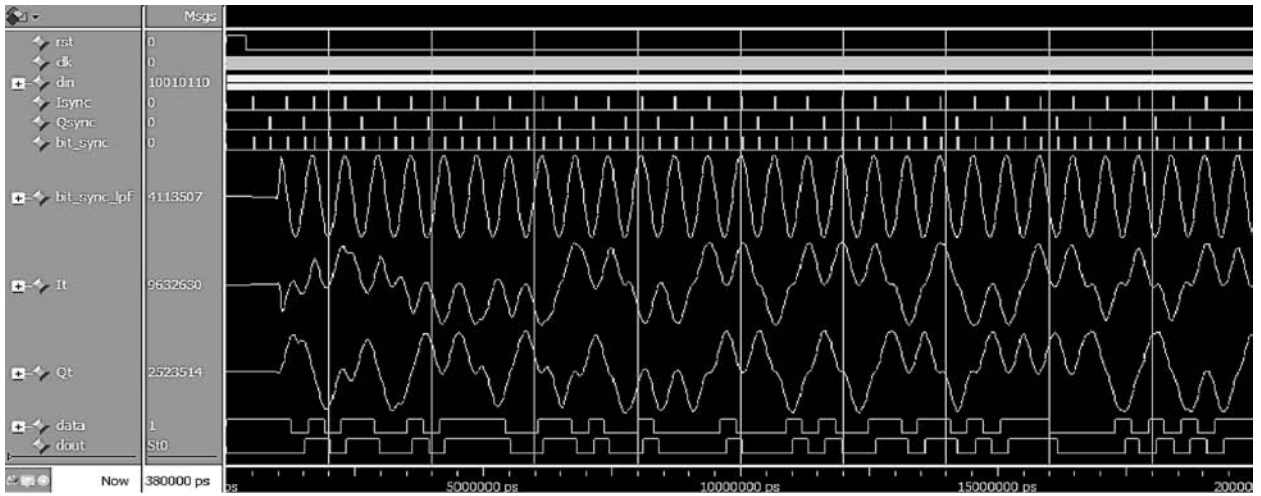


图8 MSK解调环路FPGA实现后的Modelsim仿真波形

4 结 语

本文在深入研究 MSK 调制解调原理的基础上,利用 Altera 公司 FPGA 芯片 EP4CE1517C8 和 AD 公司专用正交调制器 AD9777,设计和实现了全数字化的调制解调系统,Modelsim 仿真结果表明本文所述方法可以正确完成 MSK 信号数字化调制解调。同时,本文可为设计高速全数字化的 MSK 通信系统提供参考。

参 考 文 献

- [1] Proakis J G. Digital communication [M]. New York: McGraw-Hill Book Co, 1989:82-83.
- [2] 郭梯云,刘增基,王新梅,等. 数据传输(修订本)[M]. 北京:人民邮电出版社,1998:339-357.
- [3] 王士林. 现代数字调制技术[M]. 北京:人民邮电出版社,1987:451-478.
- [4] Analog Devices. AD9777 Data Sheet[EB/OL]. 2006. <http://www.analog.com/en/products/ad9777.html>.
- [5] 英特尔公司. Altera IP 核手册[EB/OL]. November 2013. <https://www.intel.cn/content/www/cn/zh/programmable/products/intellectual-property/ip/dsp/m-alt-ncocompiler.html>.
- [6] 唐良伟. MSK 数字调制解调及其实现技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2007:39-40.
- [7] 樊昌信,曹丽娜. 通信原理[M]. 北京:国防工业出版社,2012:235-236.
- [8] 荆黎明. 基于CORDIC算法的改进的平方环设计[J]. 电子设计工程,2016,24(17):93-95.
- [9] 吕鑫宇,姚远程,谭清怡,等. 基于直接提取载波技术的平方环设计[J]. 现代电子技术,2010(1):189-191.
- [10] 张幼明,贾建祥. MSK信号的差分数字解调方法[J]. 舰船电子工程,2008,28(11):82-84.
- [11] 孙仁琦,陈文萍. 一种新的MSK调制解调器的设计与实现[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),1991(1):1-7.
- [12] 杜勇,路建功,李元洲. 数字滤波器的MATLAB与FPGA实现[M]. 北京:电子工业出版社,2012:121-131.

- [13] 王世练,高凯,李纪,等. 抗窄带干扰宽带中频数字接收机的设计与实现[J]. 电路与系统,2004,9(2):138-141.

(上接第129页)

参 考 文 献

- [1] Mellqvist J. DOAS for flue gas monitoring—II. Deviations from the Beer-Lambert law for the UV/visible absorption spectra of NO, NO₂, SO₂ and NH₃[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 1996, 56(2): 209-224.
- [2] 张龙,陈雷,范有余,等. 中红外玻璃材料发展及前沿应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 288-296.
- [3] 陈建伟,赵静,李悦,等. 基于弛豫铁电单晶的热释电红外探测器研究[C]//光学技术研讨会暨交叉学科论坛论文集,2017.
- [4] 王小强,欧阳骏,黄宁淋,等. ZigBee无线传感器网络设计与实现[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [5] 王兆滨,马义德,孙文恒. MSP430单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2017.
- [6] 陈敬谦,王璐,梁明,等. 基于AT91RM9200微处理器的最小系统设计[J]. 信息化研究, 2007, 33(4): 71-73.
- [7] Hitchens R. Java Nio: Regular Expressions and High-Performance I/O[M]. America: O'Reilly Media, 2002.
- [8] 谭汉松,董翔宇,陈林书. 基于ACE反应式框架的服务器模型设计[J]. 科技广场, 2006(7): 54-56.
- [9] 詹杭龙,刘澜涛,康亮环,等. 一种基于Actor模型的弹性可伸缩的流处理框架[J]. 计算机研究与发展, 2017(5): 1086-1096.
- [10] Peligrad M, Sang H, Zhong Y, et al. Exact Moderate and Large Deviations for Linear Processes[J]. Statistica Sinica, 2014, 24(2): 957-969.
- [11] 高颖慧,王平. 信号处理的神经网络方法[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [12] Wang L L, Liu H B, Chen D Y, et al. Identification of Flow Regimes Based on Adaptive Learning and Additional Momentum BP Neural Network[C]//Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement. IEEE, 2016.