

# 基于无线传感网络的爆炸场振动监测系统

朱耀杰<sup>1</sup>, 张晓明<sup>1</sup>, 闫佳晖<sup>2</sup>, 耿煜琛<sup>1</sup>

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2. 北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076)

**摘要:** 爆炸场振动测试中节点分布范围广、数量多, 对各测试节点的状态监控及全局管理难以有效实现, 传统测试方案中节点部署后难以快速更改状态; 针对上述问题, 依据模块化、标准化和稳定性原则, 设计了一种基于无线技术的振动监测系统; 给出了爆炸场振动监测系统的基本功能单元, 包括数据采集设备、无线组网设备; 数据采集设备具有高精度采集、数据存储、高精度同步、定位定姿等功能; 利用无线网桥技术构建了覆盖广域范围的无线网络, 支持 IEEE802.11 n/ac 协议, 实现了对远程分布式测试节点的集中管理、状态监控、数据传输, 也可对指定测试节点的工作模式进行快速设置, 以满足测试需求; 测试节点的振动测量范围为 0~10 g, 室外 1 公里数据传输; 通过模拟测试试验验证了系统的有效性, 各项功能满足工程需要。

**关键词:** WSN; 无线网桥; 振动监测; 分布式测试; STM32

## Design of Explosion Field Vibration Monitoring System Based on Wireless Sensor Network

ZHU Yaojie<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>1</sup>, YAN Jiahui<sup>2</sup>, GENG Yuchen<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry Education,

North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In the explosion field vibration test, the nodes are distributed in a wide range and large number. It is difficult to effectively realize the status monitoring and global management of each test node. In the traditional test scheme, it is difficult to quickly change the status of the nodes after deployment. In response to the above problems, a vibration monitoring system based on wireless technology was designed based on the principles of modularity, standardization and stability. The basic functional units of the explosion field vibration monitoring system are given, including data acquisition equipment and wireless networking equipment. The data acquisition equipment has the functions of high-precision acquisition, data storage, high-precision synchronization, positioning and attitude determination; it uses wireless bridge technology to construct a wireless network covering a wide area, supports the IEEE802.11 n/ac protocol, and realizes remote centralized management, status monitoring, and data transmission of test nodes can also quickly set the working mode of designated test nodes to meet test requirements. The vibration measurement range of the test node is 0~10 g, and the outdoor data transmission is 1 km. The effectiveness of the system is verified through simulation tests, and various functions meet the needs of the project.

**Keywords:** WSN; wireless bridge; vibration monitoring; distributed test; STM32

## 0 引言

在靶场试验中, 弹药爆炸过程中的振动参数能够为弹药毁伤威力评估及炸点定位提供重要的设计依据与数据支撑<sup>[1-3]</sup>。利用爆炸产生的振动波进行爆炸点定位, 为武器装备的研制和部队训练发挥关键性作用。由于爆炸试验存在不可重复性、投入大、危险系数高等问题, 因此对爆炸瞬态振动参数的高效采集测试具有十分重要的意义。当前, 常用引线电测法和存储测试法进行爆炸场多参数测试<sup>[4-6]</sup>。存储测试法是将微型化测试装置置于爆炸现场, 记录结束

后回收测试设备读取信号<sup>[7]</sup>。该方法无法实时监测采集设备状态, 各装置间无法进行同步采集, 测试信号的零点时间无法统一, 在广域测试环境下试验结束后无法第一时间获取数据, 需要操作人员回收来读取数据, 试验效率较低。引线电测法是在测点处布置传感器, 通过电缆将信号接入采集系统, 现场布线不灵活、易引入噪声等问题限制该方法的广泛应用。

在大当量的武器试验中, 测试区域覆盖面积大、安全距离远给整个采集系统的数据传输、质量控制以及管理等

收稿日期: 2021-03-19; 修回日期: 2021-05-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873247)。

作者简介: 朱耀杰(1993-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事测试技术与无线通信等方向的研究。

张晓明(1976-), 男, 山西运城人, 博士生导师, 教授, 主要从事动态测试及组合导航等方向的研究。

引用格式: 朱耀杰, 张晓明, 闫佳晖, 等. 基于无线传感网络的爆炸场振动监测系统[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(11): 8-11.

带来了新的问题。另一方面, 由于外场试验的特殊性, 采集测试系统一次性布设完成后, 应具备满足多次试验需求的能力, 从而减少人员的重复作业, 提高试验的效率。基于此, 本文在存储测试系统基础上, 结合无线网桥技术<sup>[8]</sup>, 研制出基于无线传感器网络的爆炸场振动监测系统, 实现了对测试节点远程管理、参数配置、状态监测和数据的无线传输, 同时实现了多节点间的时间同步。

## 1 系统总体框架

基于 WSN 的爆炸振动监测系统通过传感测试节点间的相互协作实现对监控区域中目标信息的感知、采集和处理, 并将处理后的信息传送给控制中心, 系统总体结构框图如图 1 所示, 包括分布式传感测试节点、无线网桥和控制中心。基于无线通信技术的分布式测试系统可通过无线网络对分散在测试区域内所有测试节点进行管理和控制, 实现分散操作、协同工作和集中控制。分布式测试节点按照仿真优化布局方案<sup>[9]</sup>布署在测试区域完成对爆炸场振动信号的获取与传输, 测试节点自身可通过 GNSS 定位模块和电子罗盘确定自身空间和姿态信息。控制中心通过点对多点的无线拓扑方式实现对多个测试节点的远距离管理、控制和监测, 包括测试准备阶段的各节点工作参数配置; 等待爆炸阶段的工作各节点工作状态监控和复位等; 以及爆炸完成后的测试数据传输。

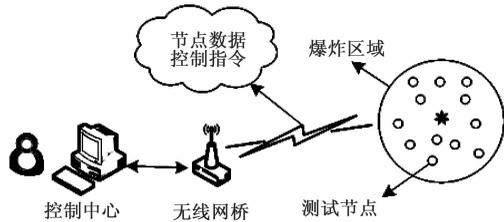


图 1 系统总体结构框图

## 2 无线传感测试节点设计

在地下爆炸振动信号的采集测试中, 测试区域覆盖范围较大, 地震波传播距离远, 信号微弱, 需具备较强的续航能力。为高效实时完成对广域环中的振动信号采集, 对测试节点的采集精度、数据传输和存储能力等提出了较高的要求<sup>[10]</sup>。结合实际测试需求, 测试节点设计参数如表 1 所示。

表 1 设计参数

振动测量范围	0~10 g
无线通讯距离	1 km
采样率	50 kHz
存储容量	64 GB

由于爆炸振动波在土壤介质中的传播是多方向的, 因此传感测试节点必须具备能够同时采集三轴振动信号的能力, 同时测试节点具备测姿定位等敏感单元。无线传感节点遵循模块化的设计思路, 不同模块功能不同, 各模块独立运行完成各自工作任务同时可根据工作流程进行互相协

作。模块化的设计思路降低系统设计调试的复杂程度, 保证爆炸场振动监测系统的高效性。

无线传感节点主要包括数据采集存储模块、传感模块和无线通信模块。节点结构框图如图 2 所示。本节中将具体阐述各模块的功能作用。

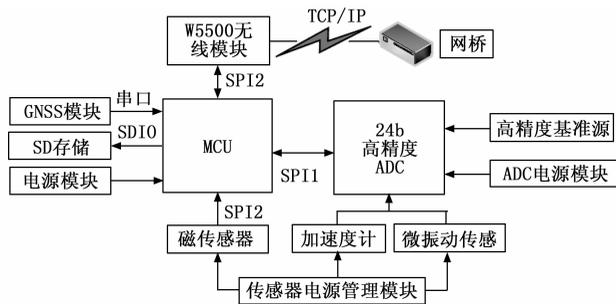


图 2 无线传感测试节点结构框图

### 2.1 数据采集模块

数据采集模块是测试节点的核心组件。其搭载基于 ARM Cortex™-M4 内核的 STM32F405 处理器, 主时钟频率最高可达 168 MHz, 运算速度快, 能够实现与外部设备的高速通讯。为保证对振动信号的高精度采集, 采集仪集成了 24 位 8 通道的 AD7771 高精度模数转换芯片, 转换精度可达  $0.39 \mu\text{V}$ <sup>[11]</sup>, 采用 SPI 接口进行芯片配置和数据传输, 为提高 ADC 采集时的运算效率, 利用 DMA (Direct Memory Access, 直接存储区访问) 的方式, 实现高效多通道、高采样率的 AD 采集, 采样速率可达 50 kHz。在完成对数据的处理后, 主控将数据存储于 SD 卡中, 本系统采用 SDIO 接口协议, SD 卡容量可根据实际存储容量选定, 在固件程序中移植了 FATFS 文件系统, 便于在 PC 端对 SD 卡存储文件进行操作。数据采集仪利用 GNSS 模块 1PPS 同步秒脉冲, 使各分布式测试节点可在统一时间基准下工作, 同步精度达到 17 ns, 实际性能分析与测试表明该同步误差小于 100 ns; 同时还可通过 RTK 技术完成对各测试节点位置坐标的高精度定位。

### 2.2 传感模块

传感模块作为测试节点的功能前端, 其重要性不言而喻。为提高传感器的环境适应能力, 基于小型化的设计理念, 传感器外形尺寸仅为 30 mm \* 30 mm \* 30 mm。3 个高精度单轴微振动传感器以及三轴加速度计, 用于爆炸振动波的精确采集。由于振动波具有矢量性, 3 个微振动传感器在壳体内部垂直安装构成矢量传感器。同时内部安装三轴磁传感器 RM3100, 与加速度计组合构成电子罗盘以便获取测试节点在爆炸场布设后的姿态信息。为了避免模组外壳对磁传感器感知地球磁场的影响, 模组结构选用硬铝材质加工。本着低功耗的设计理念, 传感模组中的电源板智能供电模式, 在需要测试节点待机时, 可切断传感模组中的电源供应。

### 2.3 无线通讯模块

无线通讯模块负责完成测试节点与控制中心间的控制

指令下达与数据传输,无线通讯模块是构建可靠的无线传感网络的关键。为了满足在远距离环境下的高效数据传输,选用了美国 LigoWave 公司高带宽无线网桥,该网桥支持 IEEE802.11 n/ac 协议、MIMO2×2 传输模式、内置高增益双极化天线,其抗干扰能力强,即使有较强的干扰仍能保障稳定的接入<sup>[12]</sup>。因无线网桥需连接以太网口进行才能数据读写,选用 W5500 以太网模块实现单片机的以太网接入功能,从而实现无线网桥与数据采集仪的关联。W5500 支持高速标准 4 线 SPI 接口与主机进行通信,通过 RJ-45 接口与无线网桥连接。无线测试节点实物如图 3 所示。

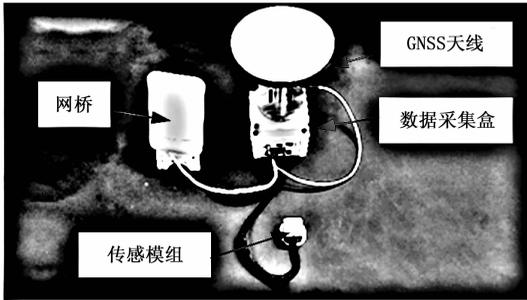


图 3 无线测试节点实物

### 3 无线通信网络构建

无线通信网络主要是在控制中心与分布式测试节点之间架起通讯桥梁,完成指令转发和数据回传等功能,由各测试节点、无线网桥和控制中心(计算机)组成。在该无线测试网络中采用星型拓扑结构<sup>[13]</sup>,即点对多点,一个中心无线网桥与多个无线传感器测试节点通信的组网方式,无线网络拓扑结构如图 4 所示。无线网络中的各测试节点连接到中心网桥后,由无线网桥进行指令广播和网络配置。测试节点加入无线网络时会被分配唯一固定 IP 地址。无线网桥设备工作在 5.8 GHz 频段,无需申请频段,便于部署,中心无线网桥和控制中心通过网线(RJ-45)连接,安装于测试现场安全区域。此外,无线电磁波信号传输过程极易受现场环境干扰,引起信号的衰减和多径效应,因此需根据爆炸试验场地的地形合理规划无线通信设备的布设位置以及高度,一般来说设备收发天线的高度要求满足障碍物不超过菲尼尔区<sup>[14]</sup>的 40%。

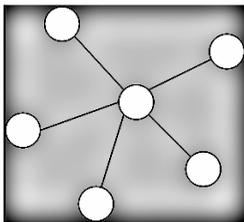


图 4 无线网络拓扑结构

传感测试节点和控制中心之间采用客户端/服务器(Client/Server)的网络模型,采用 UDP 协议的 Socket 通信机制<sup>[15-17]</sup>,控制中心通过网络广播和向指定 IP 设备发送消息两种方式进行数据通信。无线网络通信时由控制中心发起请

求,测试节点监控接收到的指令,并且对指令进行解析,完成对应指令的工作任务。为防止控制中心连续重复发送相同指令导致测试节点执行错误,设计指令有效性识别功能。根据相应通信机制为传感器测试节点和控制中心分配相应的 IP 地址,为便于统一管理,传感测试节点 IP 使用 192.168.2.1XX,XX 为 01~99 以内的任意整数,代表了部署的传感测试节点编号;控制中心 IP 为 192.168.2.150。

## 4 测控软件设计

测控软件包括测试节点下位机程序和 PC 上运行的控制中心上位机软件,二者相互协作,完成终端测试节点和控制中心间的消息通信。

### 4.1 测试节点控制程序设计

测试节点控制程序主要功能是消息处理,即可以完成数据采集、数据存储、无线接入等功能,同时还能够对控制台下发的指令进行接收、解析。测试节点程序包含读和写功能指令,读指令用于查询测试节点当前执行任务,写指令用于命令测试节点执行控制台下发指令任务。指令控制测试节点进行定位数据采集、定姿数据采集、振动数据采集、数据回传等任务。采用不同短指令标记不同任务;指令共三字节,帧头占两个字节,指令占一个字节。指令发送完成后,测试节点唤醒,响应接收,根据指令开始执行任务。测试节点控制程序流程图如图 5 所示。

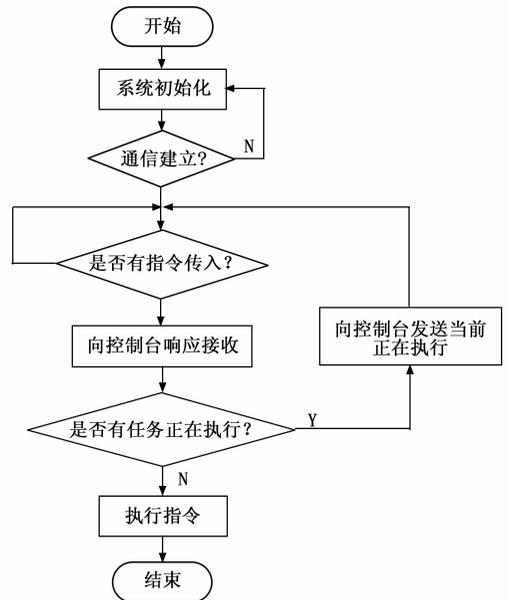


图 5 测试节点控制程序流程图

### 4.2 控制台程序设计

控制台上位机程序实现测试系统与用户间的人机交互,在 Windows 系统 Visual Studio 开发环境下基于 C# 设计,能够完成参数配置、设备自检、状态扫描检测、采集模式设置、指令下发、数据回传等功能;同时各测试节点执行接收指令后,可向控制台以时间戳的形式反馈当前节点状态信息,实验人员可实时监控到各测试节点的工作状态,若存在异常可及时标记并对状态重新设定,提高系统的可靠性。

## 5 实验结果与分析

为验证设计的振动监测系统能否达到设计要求和预期效果,进行了爆炸地震波模拟测试试验。测试节点按照图 6 布局方案布设,试验选用 5 kg 的重锤从某一高度落下夯击地面来模拟地下爆炸产生的地震波。使用集成的测试节点对夯击产生的振动波采集,进而验证所设计系统的无线传输、信号采集等功能。图 7 为模拟测试试验现场图。

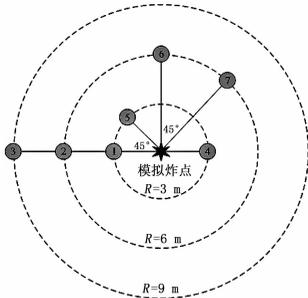


图 6 测试节点布置图



图 7 模拟测试试验现场

测试节点布设完成后,各节点上电启动,节点初始化完成等待任务指令的到来。在距离模拟炸点 100 m 处部署控制台,进行指令的下发等操作。经过 5 次夯击试验,测试节点回传数据,经过数据预处理,得到了各测试节点采集的振动信号,图 8 给出了 2# 节点测试数据结果,可以看出随着重锤下落高度的增高,振动信号的幅值也越来越大。模拟测试试验表明,系统整体功能运行良好,达到了预期效果,验证了系统的可靠性及有效性。

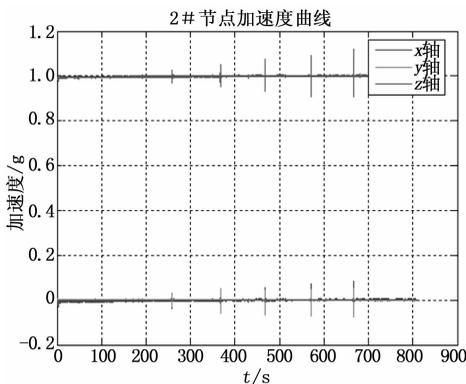


图 8 测试节点加速度曲线图

## 6 结束语

本文将无线通讯技术和传感测试技术相结合,开发设

计了爆炸场振动监测系统。模块化测试节点不仅能够采集振动数据,而且还可实现对自身空间和姿态信息的感知,同时能够及时响应控制台的指令。PPS 秒脉冲的应用在一定程度上提高了多测试节点间的同步精度。搭建的无线传感网络,性能可靠,组网方便,实现了远距离下对测试节点的管理与状态监控。系统功能设计满足实际工程需求,具有较高的应用价值。该系统为爆炸场的振动监测提供了有效可靠的手段,也可为各类武器弹药的试验与爆炸点定位提供可靠的数据支撑。

### 参考文献:

- [1] 梁国栋. 钻地弹攻击地下目标的效能评估 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [2] 高根伟, 李锦明, 胡常青. 近地炸点定位技术研究 [J]. 南京: 科学技术与工程, 2015, 15 (30): 155-159.
- [3] 马朝军. 基于地震波的弹丸落点定位方法研究 [D]. 南京理工大学, 2012.
- [4] 马铁华, 祖静. 冲击波超压存储测试技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (4): 134-136.
- [5] 张哲, 李宝珠, 王存宝, 等. 基于无线数据传输的冲击波超压测试系统的研究 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28 (6): 7-9.
- [6] KLASEBOER E, HUNG K C, WANG C, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Dynamics of An Underwater Explosion Bubble Near A Resilient /Rigid Structure [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005, 537: 387-413.
- [7] 郭士旭, 陈晋央, 周会娟, 等. 无线量测系统在大当量静爆测试中的应用 [J]. 中国测试, 2016, 42 (10): 132-137.
- [8] 王健, 裴东兴, 王薇. XXX 爆炸威力场远距离多参数数据采集系统 [J]. 传感技术学报, 2013, 26 (4): 516-517.
- [9] 闫佳晖, 张晓明. 地下爆炸炸点定位方法及布局精度分析 [J]. 中国测试, 2019, 45 (12): 1-6.
- [10] 刘冬明. 无线传感器网络三轴高速振动监测节点的设计 [D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [11] 李海. 微弱信号检测与数据采集技术研究 [J]. 电子测试, 2018 (19): 23-24.
- [12] 杨宇航. 圆极化天线和集成天线关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [13] 马继红, 杜念冬, 白跃彬, 等. 无线认知网络中拓扑控制方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 2011-2014.
- [14] 刘乃安. 无线局域网 WLAN 原理、技术与应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版, 2004: 79.
- [15] YUAN D W, SALIL S. Kanhere, Matthias Hollick. Instrumenting Wireless Sensor Networks - A survey on the metrics that matter [J]. Pervasive and Mobile Computing, 2017, 37: 45-62.
- [16] 夏永乐, 张志杰, 刘子健, 等. WLAN 技术在静爆威力测试中的应用 [J]. 传感技术学报, 2015, 28 (3): 449-454.
- [17] DELEE J G, CHARNLEY J. Radiological demarcation of cemented sockets in total hip replacement [J]. Clinical orthopaedics and related research, 1976, 121: 20-32.