

一种声学炸点测量系统的设计及应用

张亚辉, 李锐, 李宏凯, 朱望飞, 张亮

(中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200)

摘要: 针对常规兵器试验测试领域全天候地面炸点测试问题, 设计并开发了一种由对讲机、数据采集卡构建的声学炸点测试系统; 系统采用遥控装置解决测量分站对讲机的发射控制问题, 中心站以多对讲机作为信号接收装置, 采用同步数据采集卡实时采集回传的声信号; 提出并实现了一种基于爆炸能量边沿识别的时延估计技术, 用于后期数据处理和炸点坐标计算; 试验结果表明该系统可以实现兵器试验爆炸点的声学定位, 系统开发周期短、可靠性高、适应性强, 具有一定实用性和推广价值。

关键词: 时延; 声定位; 爆炸点

Design and Application of an Acoustic Measuring System

Zhang Yahui, Li Rui, Li Hongkai, Zhu Wangfei, Zhang Liang

(Huayin Ordnance Test Center, Huayin 714200, China)

Abstract: An acoustic burst point test system is designed and developed by the radio and data acquisition card, for solving the problem of ground burst point test in the field of conventional weapon test. System use a remote control device to solve the radio emission control problem. Central station, by radios as signal receiving device, collects the real-time returned sound signal synchronously. A time delay estimation technique based on edge recognition of explosive energy is proposed, which is used for data processing and the calculation of the blast point coordinate. The experimental results show that the system can realize the acoustic location of burst point. The system with short development cycle, high reliability and adaption, has a certain practicality and popularization value.

Keywords: time delay; acoustics location; burst point

0 引言

声测定位技术是利用声学与电子装置接收声信号以确定声源位置的一种技术, 具有全天候、低成本等优点^[1-3]。声学炸点测量系统基于被动声测技术, 捕捉弹丸爆炸时产生的声信号, 采用时延估计方法由几何关系确定炸点的空间坐标。

兵器试验弹丸落弹范围常常是一个数百米宽近千米甚至超过千米长的矩形区域, 声学定位的阵列孔径太小不易提高精度, 所以经常选用大孔径布置测量分站的方法进行定位。测量分站一般包括控制器、采集器、传声器、时间同步模块和通信设备, 控制器常选择单片机、dsp 或小型工控设备, 时间同步模块一般选择 GPS 或 BD^[4-6]; 中心站包括通信设备和计算机。这种模式的系统设计方案可以有效完成地面炸点坐标的测试, 然而测量分站和中心站都有大量的硬件研制和软件开发工作, 应用中设备架设较为复杂, 不适用于密集开展的火炮射击试验。本文设计并开发了一种基于市场成熟产品改装的炸点测试的系统, 提出了基于爆炸能量边沿识别的时延估计方法, 已成功用于兵器试验炸点坐标测试。

1 测试原理及主要参数设计

1.1 测试原理

对于地面炸点目标, 一般而言, 通过 3 个声传感器即可定

位^[7-8]。在图 1 中, 设 A 点接收到爆炸声波的时刻为 t_1 , B 点接收到爆炸声波的时刻为 t_2 , C 点接收到爆炸声波的时刻为 t_3 , 炮弹爆炸的时刻是 t_0 , 3 个声测量分站的位置坐标是分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 。假设声波的传播速度是 c , 根据它们之间的关系可以建立如下方程。

$$\begin{cases} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 = c^2(t_1-t_0)^2 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 = c^2(t_2-t_0)^2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 = c^2(t_3-t_0)^2 \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 求解炮弹爆炸点坐标 (x, y) 的关键在于确定 (t_1-t_0) 、 (t_2-t_0) 、 (t_3-t_0) , 即爆炸点声信号传播至声传感器的时延。考虑到温度、风速对声波传播速度的影响, 需对风速 c 、公式 (1) 进行修正^[9-10]。

1.2 误差分析

根据公式 (1), 系统测试误差主要来源有以下 3 个方面:

1) 布站误差, 即声传感器位置坐标的测量和传感器空间分布引入的误差。采用专业的大地测量设备进行传感器位置坐标测量, 精度一般可达 0.2 m。

2) 时延估计精度, 即提取爆炸声波到达时刻的精度。以每路采集频率 10 kHz 计算, 测时精度 0.1 ms, 信号处理帧间偏差 10, 那么时延估计精度为 1 ms。

3) 声速误差, 即温度、风速测量误差引起的声速修正偏差。靶场常用气象测量设备的环境风速测试不确定度为 1 m/s, 风向测试的不确定度为 15°, 环境气温测试不确定度为 0.5 °C。

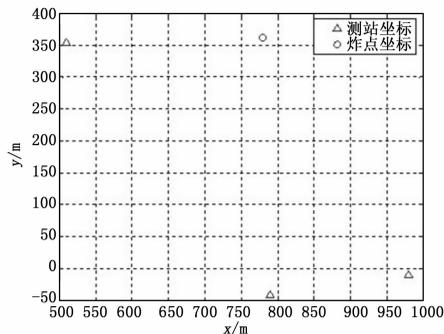
根据上述 3 条设置测试误差仿真参数。其中, 测量分站布站误差受站址选择的影响。当布站方式如图 1 所示时, 图中

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2015-12-22。

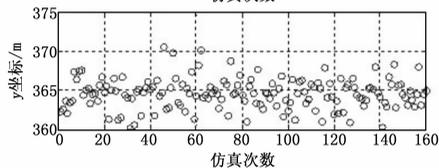
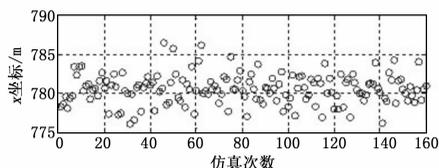
基金项目: 总装备部重点预研项目(2012SY32B004)。

作者简介: 张亚辉(1979-), 男, 陕西周至人, 工程师, 硕士, 主要从事外弹道及终点弹道测试技术方向的研究。

“△”代表测量分站,“○”代表落点坐标,经过 160 次仿真得到测试不确定度标准差 $\delta x \leq 2 \text{ m}$, $\delta y \leq 2 \text{ m}$ 。



(a) 布站方式及单次炸点坐标测试



(b) 炸点坐标测试误差仿真分析

图 1 设备布站及测试精度

1.3 系统主要硬件指标设计

硬件系统主要参数设计如下: 1) 测量分站 4~8 个; 2) 落弹区散布一般在 $1\ 500 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ 范围内, 测量分站在落弹区外圈, 数据采集处理中心距离落弹区稍远, 通信距离 3 km 可满足要求; 3) 为采集声波信号处理得到爆炸声波传播时延, 系统数据采集模块需选用同步采集卡; 4) 爆炸声波与背景相比属于高信噪比信号, 采集位数 16 位可满足要求; 5) 弹丸爆炸声主频在 $10 \sim 160 \text{ Hz}$ ^[11], 按照采样定律, 设计采集频率大于等于 4 kHz; 6) 为保证系统总体时延估计精度尽可能优于 1 ms, 分布式采集系统硬件、无线通信等产生的时延应小于 0.2 ms。

2 声系统硬件设计及同步性能分析

2.1 系统组成及硬件设计

该系统主要由前方测量分站和后方数据处理中心组成。每个前方测量分站由声学传感器、对讲机、遥控接收开关和蓄电池构成; 后方数据处理中心包括无线射频遥控开关、对讲机和微机, 图 2 是系统的基本构成。

系统采用对讲机搭建无线传输通道, 对传感器采集的声信号进行放大、回传和接收, 使用数据采集卡从接收对讲机中读取声波数据用于炸点坐标计算。采集卡选用研华 PCI-1706 同步数据采集卡, 采集通道数、位数和频率满足 1.3 中设计要求。

2.2 同步性能分析

按照测试原理, 声信号的采集必须是同步的, 同步精度优于 0.2 ms。设计系统采用对讲机采集并无线电信号传输模拟信号

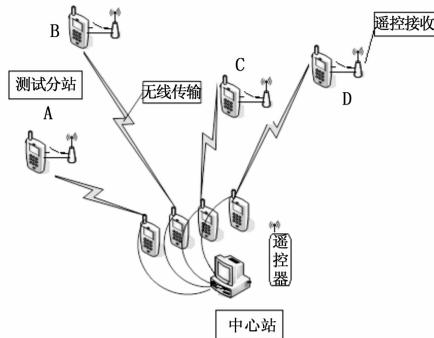


图 2 系统组成及结构

的方式是否能满足同步要求是整个系统设计的关键。分析认为, 对讲机内部对声信号的放大、调制和发射等电路采用同样的电路设计, 按照电的传播速度, 与 0.2 ms 的同步精度要求, 它们对于信号的延迟可以忽略。对讲机从 1~3 km 外通过无线电将信号传回中心站的延迟, 按照无线电传播速度, 延迟在 $3.33 \sim 10 \mu\text{s}$, 也远小于 0.2 ms 的同步精度要求。

因此, 同步性能实验主要考察除无线电传播速度之外其他因素引起的延迟。实验方法: 将 3 个测量分站传声器放在同一个位置, 中心站放在通信范围之内, 在测量分站附近发出声信号, 计算各分站声信号到达中心站微机的时间差。实验中, 采用该数据采集卡最高采集频率(每通道 250 kHz, 即每个采集点对应 $4 \mu\text{s}$)。图 3 是采集到的脉冲声波时域图。

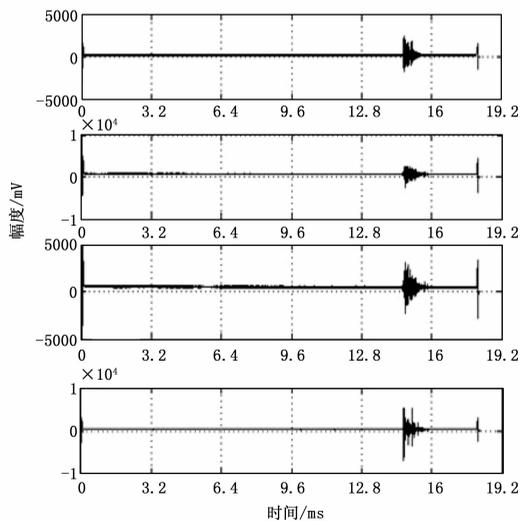


图 3 脉冲声波时域图

实验重复 10 次, 经分析计算, 声波信号到达时间差最大值 $24 \mu\text{s}$, 平均值 $16 \mu\text{s}$ 。加上无线电传输延迟, 系统总的同步偏差远小于 0.2 ms, 满足设计要求。

3 数据处理中心软件设计

3.1 软件功能及流程设计

数据处理终端为一台便携式计算机, 运行的软件主要包括系统管理和数据处理两部分功能。其中系统管理功能主要实现前方测量分站的录音和数据传输控制、同步数据采集卡开始和停止采集控制、数据存储等; 数据处理功能主要实现爆炸声信

号处理、爆炸点坐标计算、数据可视化显示等。软件流程如图 4 所示。

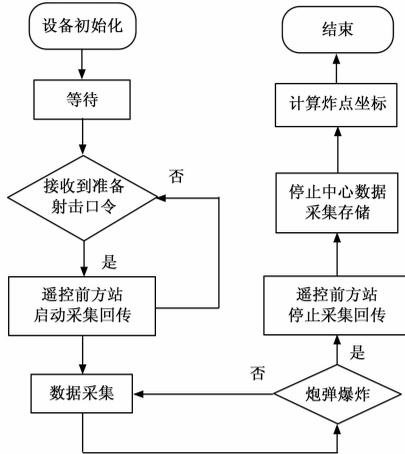


图 4 软件流程

3.2 信号处理算法设计

1) 带通滤波。在进行信号辨识和时延估计之前,需要对采集到的原始波形信号进行预处理。这是因为一般情况下,爆炸声波的能量集中在一个特定的频段内,滤除含有效信息较少的高低频分量可排除不必要的干扰。考虑到采集设备中自身引入的低频电流干扰,选用带通滤波器对采集的声音进行预处理。本文采用的滤波器通带频率为 80~2 500 Hz。

2) 特征点前向检索。已知采样频率 F_m , 根据已有经验可预知爆炸声波的时间持续期 T , 则爆炸能量主要存在于接收到爆炸声后的 T 时间长度内。采用长度为 L 、幅值为 1 的矩形窗作卷积运算, 即前向累加, 获取能量累积信息。

$$L = T * F_m \tag{2}$$

$$Y(i) = \sigma X(i)$$

其中: L 为爆炸能量持续的帧数; $X(i)$ 为低通滤波后的信号; $Y(i)$ 为前向累积后的能量值。

由于该窗长尽可能保留了有效的爆炸信息, 同时平滑掉持续期相对较短、并且能量较低的干扰项, 使特征点所在的区域以主峰的形式表现出来。

3) 时延计算。以各通道处理后信号峰值的 1/3~2/3 为阈值处理信号, 第一个达到该阈值的信号出现时刻作为该通道, 对应测量分站, 爆炸波的到达时刻。注意, 该时刻是一个相对时刻, 经过各通道波达时刻相减可得到爆炸声波到达各测量分站的时间差。另外, 在获取波达时刻时没有取信号峰值作, 而是取峰值 1/3~2/3 为阈值是经验总结结果, 试验证明这样做的精度优于取峰值。

4 试验结果及讨论

为了验证本文设计及研制系统的性能, 采用炮竹爆炸实验、某型炮弹炮口和弹丸爆炸点坐标测试试验验证。试验时采用本文设计研制的系统, 软件处理过程中采用人工处理与本文信号处理方法对比形式, 信号处理软件由 Matlab 语言编写, 在主频为 2.4 GHz、内存为 3 GB 的计算机上进行计算。

4.1 炮竹模拟实验

炮竹模拟实验结果如表 1 所示。在数据处理中, 信号处理

采用人工判别爆炸时间点与本文算法相比对的方式, 考察系统设计指标以及本文算法的有效性。

表 1 炮竹模拟实验结果

| 爆炸点坐标 | 爆炸点提取(帧) | | | |
|-------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 本文算法/人工 | | | |
| | 30252/30251 | 36852/36852 | 91354/91352 | 100424/100424 |
| | 30460/30460 | 36870/36869 | 91368/91364 | 100431/100430 |
| | 30858/30857 | 37334/37334 | 91834/91834 | 100939/100938 |
| 本文算法 | (-0.66, 4.02) | (2.94, 11.27) | (3.04, 11.44) | (3.73, 9.86) |
| 人工 | (-0.71, 3.72) | (2.94, 11.13) | (3.12, 11.31) | (3.68, 10.16) |
| 实际值 | (0, 3.87) | (3.09, 10.97) | (3.09, 10.97) | (3.09, 10.97) |

由于炮竹在近地面爆炸, 测量分站传感器高度在 1.2~1.6 m, 在实验中只进行了二维坐标定位, 其中传感器高度和爆炸点之间的高度差也是造成误差的一个重要原因。

4.2 炮口定位

在某火炮炮位测试定位试验中, 测试结果与炮位理论值(也是实际值)的偏差具有规律性, 结果如图 5。

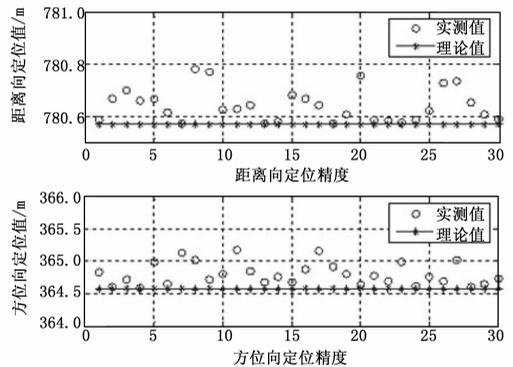


图 5 炮口定位精度比较

图中可见, 距离向测试结果优于方位向, 这与测量分站的布设位置有关。测试时, 3 个测量分站沿距离向布设, 且在距离上覆盖落弹区, 因此在距离向上具有较好的辨识度。此外, 测试结果存在一系统误差, 分析认为与声速的取值有关。

4.3 实弹试验

通过某型榴弹射击试验对本文设计的炸点测量系统进行验证。本次试验应用 8 个测量分站, 气象条件: 无风, 温度 18.5 °C; 测量分站布站点对落弹区呈包围结构, 坐标计算采用抗差最小二乘法进行处理; 中心站每通道采集频率 6 500 fps, 采集位数 16 Bit, 采集幅度 ±10 V。图 6 为某发干扰较大的爆炸声波, 声波原始信号中含有两处较明显干扰, 且爆炸声和干扰都已达到采集峰值, 有消顶现象, 如图 (a); 经过带通滤波后含爆炸声波和主要干扰声波的一段处理结果如图 (b); 经过能量前向累计处理的结果如图 (c)。通过本文介绍的信号处理算法, 干扰的幅值被抑制, 目标幅值凸显。

表 2 为试验中一组弹丸炸点定位结果, 以大地测量设备测得的炸点坐标为真值进行比对。

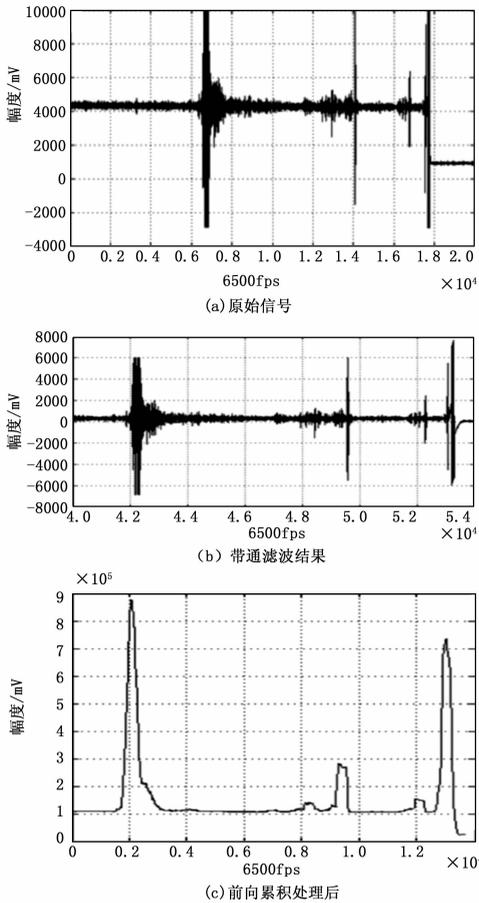


图 6 弹丸炸点声信号处理

试验表明, 采用包围结构布站、增加测量分站数量、采用抗差最小二乘处理数据可以获得较高的测量精度。另外, 因为风速风向测量的不确定度, 所以即使修正风对声波传播的影响, 也没有无风条件下测量精度高。

5 结论

本文设计实现了一套实用的炸点测量系统, 系统硬件部分基于市场成熟产品改造完成; 中心站软件基于数据采集卡软件进行开发, 通过嵌入带通滤波、能量前向累积、时延计算等数据处理模块获得爆炸声波到达时间差数据, 求解出炸点坐标。炮竹模拟实验和实弹射击试验结果表明, 该系统可以实现爆炸点的声学定位。系统开发周期短、可靠性高、适应性强, 具有一定实用性和推广价值。

表 2 某型榴弹炸点测量结果对比

| 炸点坐标 | | x/m | y/m |
|-------|-----|----------|---------|
| 第一发 | 真值 | 18286.20 | 341.51 |
| | 测试值 | 18287.12 | 341.93 |
| 第二发 | 真值 | 18311.41 | 219.32 |
| | 测试值 | 18312.35 | 219.76 |
| 第三发 | 真值 | 18152.50 | 239.33 |
| | 测试值 | 18153.61 | 240.24 |
| 第四发 | 真值 | 18428.42 | 255.61 |
| | 测试值 | 18429.38 | 255.89 |
| 第五发 | 真值 | 18367.61 | 258.90 |
| | 测试值 | 18368.82 | 258.17 |
| 第六发 | 真值 | 18495.41 | 219.91 |
| | 测试值 | 18494.51 | 220.32 |
| 标准差/m | | 距离:0.80 | 方向:0.55 |

参考文献:

- [1] 陈东明, 常桂然, 朱志良. 基于声学法弹着点精确定位方法研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27 (3): 566-570.
- [2] 董明荣, 许学忠, 张 彤, 等. 空中炸点三基阵声学定位技术研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (3): 343-349.
- [3] 叶建森. 基于声延时测量技术的弹落点定位系统的设计与实现 [D]. 太原: 中北大学, 2007.
- [4] 肖 峰, 李惠昌. 声, 武器与测量 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [5] Li X F, Liu H. Sound source localization for HRI using FOC-based time difference feature and spatial grid matching [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43 (4): 1199-1212.
- [6] 毕延文. 基于时差法的飞行器声被动定位技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [7] 王志峰, 冯 杰, 高 鹏, 等. 基于无线声阵列的目标定位系统设计 [J]. 电声技术, 2015, 3: 44-47.
- [8] 刘玉鹏. 爆炸炸点传感器特测系统的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [9] 王 飞, 贾维敏. 常规弹头爆炸产生声波机理研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2001 (6): 471-473.
- [10] Wu B F, Wang K C. Robust endpoint detection algorithm based on the adaptive band-partitioning spectral entropy in adverse environments [J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2005, 13 (5): 762-775.
- [11] 陆燕芳, 何 巧, 罗小松, 等. 火炮声探测技术研究报告 [J]. 电声技术, 1993, 3: 2-6.

(上接第 119 页)

- [3] Gesbert D, Shafi M, Smith P, et al. From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-time Coded Wireless Systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. Special Issue on MIMO systems, guest edited by the authors, 2004, 21 (3): 281-302.
- [4] 白 鹭, 揭 摄. 面向 TD-LTE 的城域传送网承载策略研究 [J]. 电信工程技术与标准化, 2013 (11): 21-37.

- [5] 林继民, 吴 怡, 林 萧. 基于 Linux 嵌入式系统开发平台的构建及应用 [J]. 现代电子技术, 2010 (18): 2-5.
- [6] 翁建年, 张 浩, 彭道刚, 等. 基于嵌入式 ARM 的 Modbus/TCP 协议的研究与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2009 (10): 35-42.
- [7] 王书根, 王振松, 刘晓云. Modbus 协议的 RS485 总线通讯机的设计及应用 [J]. 自动化与仪表, 2011 (5): 2-4.
- [8] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.