

连发弹丸爆炸声信号时延估计技术研究

冯松, 张亚辉, 王明启, 陆永安, 游江, 章喜

(中国人民解放军 63875 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 文章根据声测连发地面炸点技术研究课题的需求, 分析了复杂背景下连发弹丸爆炸声信号的特点, 研究了一套适用于靶场实际测量环境的多目标信号时延估计技术, 主要步骤为信号预处理、目标识别和时延提取; 计算机模拟仿真表明, 算法的时延估计精度可达到 1.2 毫秒, 并可正确分离间隔大于半个信号主脉宽 (约 10 毫秒) 的粘连信号; 利用课题组自行研制的原理样机采集了实弹射击的声信号, 试验处理结果验证了算法的可靠性与正确性, 且时延估计误差与数值仿真一致, 较好地解决了连发地面炸点目标声学定位中的时延估计问题。

关键词: 时延; 声定位; 连发; 爆炸点

Research on Time Delay Estimation Technology of Continuous Projectile Explosion Acoustic Signal

Feng Song, Zhang Yahui, Wang Mingqi, Lu Yongan, You Jiang, Zhang Xi

(63875 Troops of the Chinese People's Liberation Army, Huayin 714200, China)

Abstract: Based on the requirements of the research topic of using sound signals to measure continuous ground fired point technology, the paper analyzes the characteristics of continuous projectile burst acoustic signals in complex background, and studies a multi-target signal delay estimation technique suitable for the actual measurement environment of the shooting range. The main steps are signal preprocessing, target recognition and time delay extraction. The computer simulation shows that the delay estimation accuracy of the algorithm can reach 1.2 milliseconds, and the adhesion signals with interval greater than main pulse width (about 10 milliseconds) can be correctly separated. The acoustic signals of the live projectile were collected by using the prototype developed by the research team, the test results verify the reliability and correctness of the algorithm, and the delay estimation error is consistent with the numerical simulation, which better solves the continuous ground-fired target time delay estimation problem in acoustic localization.

Keywords: time delay; acoustic location; continuous; explosion point

0 引言

连发地面炸点坐标测试是靶场的一项测试难题, 典型的弹药试验如连发火箭弹和速射迫击炮等。在常规兵器试验中, 弹丸的作用距离以及落点定位亦是检验武器弹药性能的一项重要指标, 而连发地面炸点目标多呈现散布大、爆炸后相互易遮挡的特点, 且在常规试验的夜间科目中, 只能观测到大片火光以及清晰的爆炸声, 常用的光学测试设备捕获率难以满足弹丸落点坐标的测试需求。传统做法是依靠测试后人工复测弹坑, 该法耗时长、效率低、不能区分落弹顺序^[1-2]。鉴于弹药武器在地面爆炸时产生的能量会以声波的形式向四面八方传播出去, 产生特有的声信号, 因此, 本文提出了一种基于被动声定位原理的连发地面炸点目标测量方法。

声测定位技术是利用声学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。声测连发地面炸点的原理如下: 首先在爆炸区域不同位置布置声传感器, 捕捉并记录弹丸爆炸时刻所产生的声信号; 然后利用信号处理技术估计各传感器接收到爆炸声波的波达时刻; 最后通过数据处理算法, 计算出连发地面炸点目标的靶场坐标^[3-5]。其中, 信号处理方法与数据处理方法是关键, 且信号处理结果会直接影响目标的捕获率和坐标计算精度^[6-9]。鉴于此, 本文针对信号处理问题, 首先分析了连发弹丸爆炸声信号的特点, 然后介绍了提出的时延估计方法的基本原理, 最后分别通过计算机仿真与实弹射击试验验证了该算法的正确性和有效性。

1 信号分析

弹丸爆炸是能量在短时间小空间内迅速膨胀释放的过程。在使用声传感器进行测量时, 信号的时域、频域分布都具有显著的特征, 声传感器的作用是声学探测系统的“耳朵”, 是整个试验测试设备中最为重要的一个器件, 其特有的技术指标以及性能的好坏都会直接影响爆炸声源信号的录取质量^[10-11]。在试验过程中, 连发弹丸的爆炸声信号可等价于单个目标信号的线性叠加, 所以, 曾成功应用

收稿日期: 2019-07-02; 修回日期: 2019-09-16。

基金项目: 中国人民解放军重点预研项目(1700010133)。

作者简介: 冯松(1981-), 男, 硕士, 陕西铜川人, 工程师, 主要从事外弹道及终点弹道测试技术方向的研究。

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

于单目标信号的时频分析方法同样适用于多目标信号的时频分析^[12]。通过课题组前期对大量爆炸声信号的分析总结, 可提取出目标信号的四个时频特征参数: ①信号持续时间。爆炸声波信号时域表现为短时多脉冲, 主脉冲的上升时间约为 10 毫秒, 信号持续时间约为 100 毫秒。②信号频谱分布。爆炸波是弹丸在爆炸时冲击空气分子所产生的波动, 每一种型号的弹药武器发射声波和爆炸声波均有其固有的频率特点^[13]。③衰减阻尼。信号能量在释放传递的过程中, 持续震荡衰减, 因此采集的信号包络呈现出单边下降的规律。④能量量级。相同类型弹丸爆炸产生的声波能量基本一致, 考虑到声音传输的路径差异, 同一传感器接收到不同目标的信号能量应该处于同一量级。

目标信号的四个时频参数是后续信号处理的基础和依据, 如图 1 所示。可根据信号脉冲宽度和频谱分布对信号进行预处理, 剔除干扰, 放大信号。可根据信号的脉冲宽度、频谱、衰减阻尼设计 Laplace 小波^[14-15], 并构造信号特征函数库, 用模板匹配的方法对信号进行识别。另外, 还可以根据信号持续时间和能量特征对信号是否存在粘连进行区别性判断。

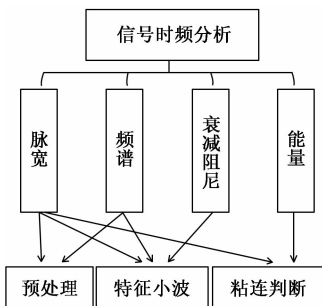


图 1 信号时频分析与信号处理的联系

2 算法

课题组对单目标的声信号处理技术曾进行了系统深入的研究, 提出的时延估计算法分为信号预处理、目标识别、时延提取三个步骤。多目标声信号处理与单目标声信号处理步骤基本相同。但多目标信号处理难度更大, 具体表现为以下两点: ①难以准确地判断各个目标信号存在的时间段。②当时域相邻目标信号出现粘连状况时, 需要对该组信号进行局部分解。

因此, 在前期单目标信号处理的研究基础上, 针对多目标信号特点, 开发了多目标声源信号处理软件, 算法的基本原理如图 2 所示。算法的实现同样分为信号预处理、目标识别和时延提取三个部分。在目标识别的过程中, 在原有特征小波模板匹配的基础上, 引入了“分水岭算法”, 从而对目标进行准确的识别与定位。同时, 该过程增加了对信号是否具有粘连特性的判断, 一旦发现该组信号存在粘连, 则根据特征小波模板以及信号的脉宽、能量等特性, 分解粘连脉冲。文章第二部分中的 2.1~2.3 节将会分别对信号预处理、目标识别和时延提取这三个部分的处理过程

进行详细介绍。

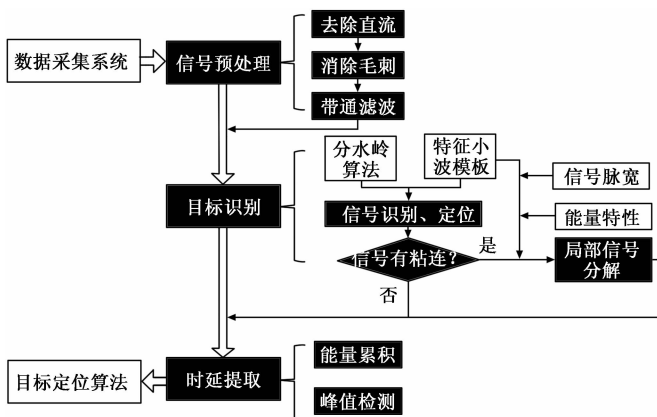


图 2 连发声信号时延估计流程

2.1 信号预处理

鉴于在靶场试验时, 现场环境复杂且多变, 数据采集系统采集到的信号常会参杂多种非目标的声信号, 如虫鸣声、设备车辆及油机的轰鸣声、风声等环境噪声以及无线传输的信道噪声、数模转换的采样噪声等, 这些噪声在很大程度上会直接影响目标声源的定位精度, 为保证声源信号定位的精确性, 首要任务就是在信号识别和时延提取过程之前对原始波形信号进行预处理。弹丸爆炸产生的声信号与周围噪声信号相比, 通常表现为突发性和短暂性, 而周围的干扰噪声信号一般幅值和频率变化较小, 且通常在固定时间内呈周期性变化, 根据这一特性采用带通滤波器将此类与爆炸声不同的内嵌噪声去除。除此之外, 原始信号还存在较大的直流漂移、尖锐毛刺等现象。所以为了准确地还原目标声信号, 对该类声源信号依次进行了去除直流、消除毛刺等操作。图 3 为实测某型弹四连发爆炸声信号的预处理结果示意图。

2.2 目标识别

多目标与单目标信号处理的区别只存在于目标识别的过程, 对这部分内容主要增加了两个功能: (一) 对目标信号进行时域分割, 目的在于准确定位各个爆炸声信号存在的时间窗口。假若出现不同目标的时间窗口重叠, 即声源信号存在信号粘连, 则需要将局部信号进行分解处理, 以保证后续时延提取过程的精度。具体处理流程如下。

第一步: 利用信号时频分析时构造的特征小波函数, 对预处理后的爆炸声信号进行全局匹配, 得到匹配系数的分布曲线。匹配系数的大小直接反应了该时间点出现目标信号的概率。图 4 为某次匹配系数的分布曲线示意图。

第二步: 利用分水岭算法, 从高至低依次选用不同阈值对匹配函数进行时域分割。综合利用信号的持续宽度、能量量级、匹配系数三种信息, 对划分的连通域进行筛选。一旦发现某个阈值分割得到的有效连通域数目大于或等于目标数, 则停止分割。保留有效连通域数目最多的分割结果。图 5 是某次时域分割的示意图。

第三步: 判断是否存在信号粘连。若相邻连通域的时

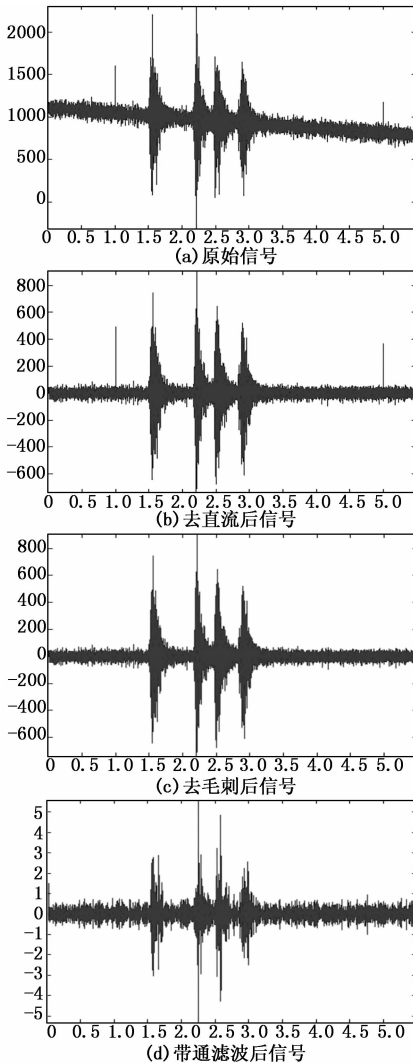


图 3 某型弹 4 连发爆炸声信号的预处理效果

间间隔小于信号持续时间（一般设为 100 毫秒），或者经过筛选的有效连通域数小于目标数，则说明有信号粘连，此时执行第四步，否则直接跳转到第五步。

第四步：利用声源目标的能量特性以及信号宽度，必要时借助人辅助判断，锁定粘连信号的时间段，同样利用第一步中应用的特征小波基构造的目标模板，将粘连的局部信号进行分解。图 6 为对粘连信号的分解效果示意图。

第五步：进一步利用信号持续宽度、能量量级、匹配系数三种信息筛选连通域，直到连通域数等于目标数。最后在各连通域内，重新进行特征函数的匹配过程，并以各局部匹配系数峰值位置作为对应目标信号的起点。

目标识别的第二步与第五步都对信号分割的连通域进行筛选，这个过程正是对疑似目标的判断识别过程，其中需要综合利用信号的持续宽度、能量量级、匹配系数三种信息。假设采集的信号为 $S(i)$ ， $0 \leq i \leq N$ ，利用特征小波模板匹配信号，得到的系数分布为 $k(i)$ ， $0 \leq i \leq N$ ，信号理论持续时间为 W ，能量量级为 E 。对匹配系数 $k(i)$ 进行分割后得到 L 个连通域，其中第 m 个连通域记为 $A_m(p,$

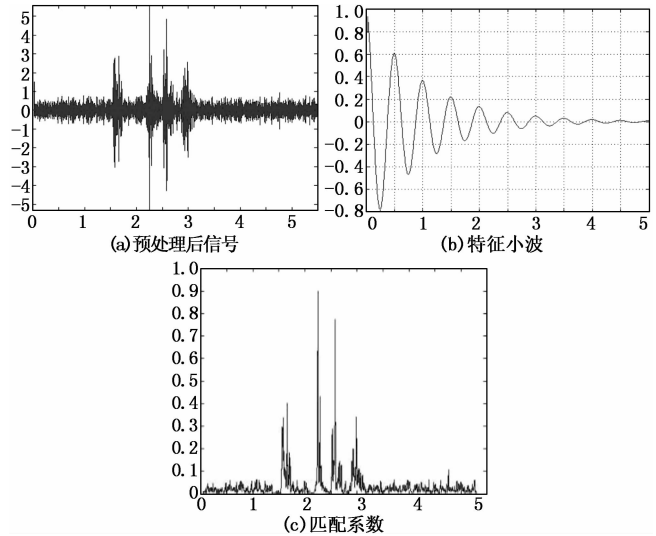


图 4 特征小波匹配结果

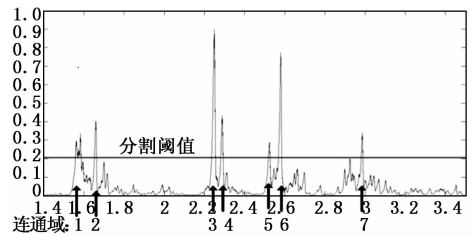


图 5 基于分水岭算法的信号分割示意图

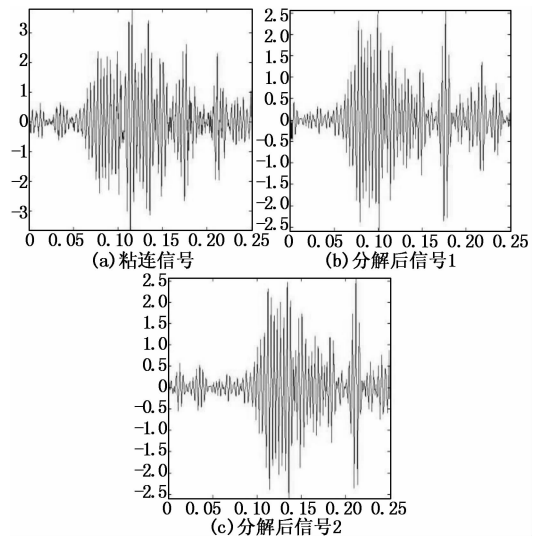


图 6 信号分解示意图

$q)$ ， $1 \leq m \leq L$ ， p, q 分别为连通域的起点和终点，该连通域的目标综合相似系数 $f(m)$ 根据 (1) 式计算：

$$f(m) = k_m \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot |q - p - W|}{W}\right) \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot |E_m - E|}{E}\right) \quad (1)$$

其中： k_m 、 E_m 分别表示第 m 个连通域的模板匹配系数与信号能量，分别按照 (2) 式和 (3) 式计算。

$$k_m = \max\{k(p), k(p+1), \dots, k(q)\} \quad (2)$$

$$E_m = \sum_{i=p}^q S_i^2 \quad (3)$$

在目标识别的过程中,正是以连通域的目标综合相似系数 $f(m)$ 为依据进行筛选的。

2.3 时延提取

时延提取算法是目前声源定位技术应用最为广泛的一种方法^[11]。由于单个爆炸脉冲信号的持续时间较长,一般约为100毫秒,且上升沿不够陡峭,系统要求时延提取精度为毫秒量级,所以不能直接将电压信号的峰值作为爆炸声波到达传感器的时刻。根据目标信号持续时间的先验信息,可构造与目标宽度大致相等的矩形窗,将此窗函数与原信号的平方作卷积运算即对信号的能量进行局部累积。假设原信号为 $S(n)$,窗长为 L ,能量累积后的函数 $E(n)$ 的计算过程如式(4)。

$$E(n) = \sum_{i=0}^{L-1} S^2(n+i) \quad (4)$$

显然,累积后的结果尽可能保留了有效的爆炸信息,同时平滑掉持续时间相对较短、能量较低的干扰信号,使声信号起始点位置以主峰的形式表现出来。然后根据识别部分对信号存在时间段的定位,搜索局部最大值,将最大值出现的时刻作为对应爆炸信号的时延。图7为时延提取过程示意图。

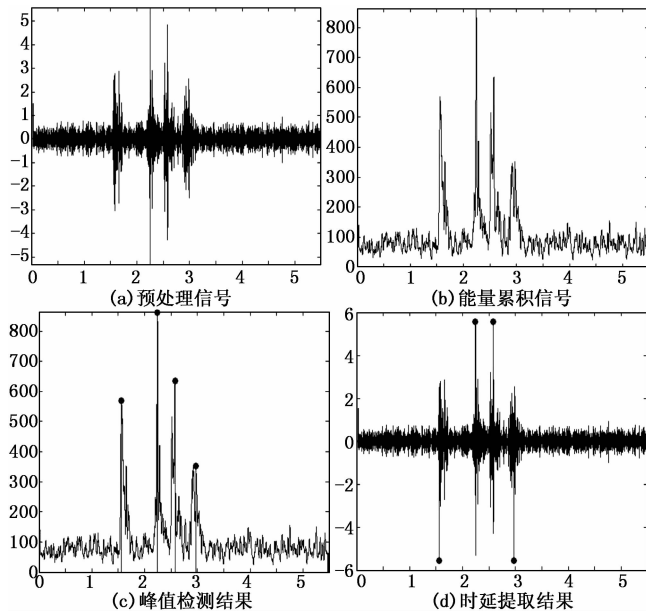


图7 时延提取的过程

2.4 操作软件

根据2.1节~2.3节阐述的多目标信号处理算法,课题组对此开发了专门的操作软件,时延估计操作软件界面如图8所示。

3 实验与影响因素分析

3.1 模拟仿真

为了检验所开发算法的时延识别能力和估计精度,课

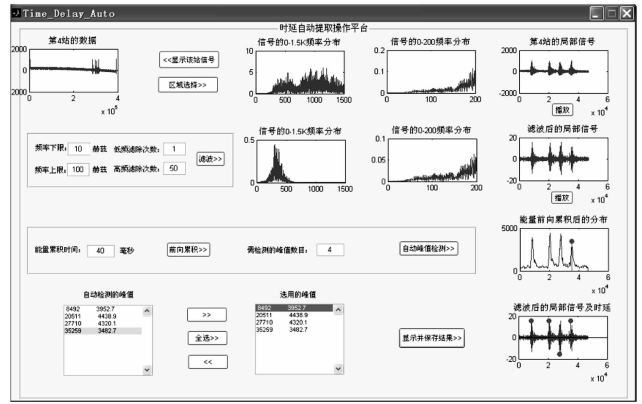


图8 时延估计操作软件界面

题组对多次射击过程进行了数值仿真。参考某型火箭弹试验的实际参数,假设40连发弹丸的预定落点为(0,0),射频为2发/秒,落点的距离与方向散布误差服从独立的均值为0的正态分布,标准差分别为300米、1000米,爆炸声波信号 $S(t)$ 从实测信号中截取,持续时间取100毫秒,采样频率为20千赫兹,信号幅度随着距离 d 的衰减公式为:

$$S(t,d) = S(t,0) \cdot \exp\left(-\frac{d}{1000}\right) \quad (5)$$

令声音传播速度为340米/秒,风速为0。四个传感器的坐标为: A_1 (500 m, 1500 m), A_2 (500 m, -1500 m), A_3 (-500 m, -1500 m), A_4 (-500 m, 1500 m)。课题组共仿真了1000次射击,每次均用文中算法对各传感器的仿真信号进行处理,将估计的时延与理论时延进行认真比较,仿真结果表明时延估计的均方根误差为1.2毫秒。图9显示了一次仿真中, A_1 传感器接收到的波形以及所提取的部分时延。

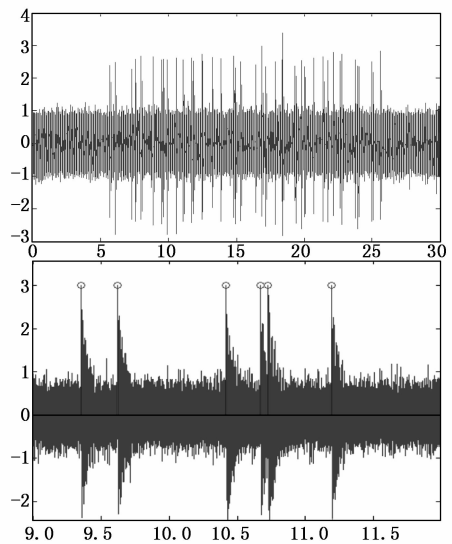


图9 A_1 传感器接收到的波形以及局部信号提取的时延

3.2 射击试验

为了更好地验证所开发算法的正确性以及有效性,课题
(下转第158页)