

[文章编号] 1671-9727(2007)03-0336-04

声波 振动生命搜索与定位系统的 定位方法研究

曹 辉¹ 王绪本¹ 简兴祥¹ 杨利容² 徐雯琪¹

(1. 成都理工大学信息工程学院, 成都 610059; 2. 四川省核工业地质调查院, 成都 610021)

[摘要] 地震后的救助现场情况错综复杂, 通过对受困人员发出的各种求救信号的分析, 确定适合现场搜救的有效信号, 而定位方法的研究是研制和开发声波/振动生命搜索与定位系统的基础。考虑现场救助的困难和时间要求, 提出了能量追踪的快速搜索方法。参考天然地震震源定位 Geiger 法, 提出了一种能够适用于地震救助现场, 基于振动直达波到达时差的定位方法——4 点时差定位的搜索理论方法, 为声波/振动生命搜索与定位系统的开发提供了理论基础。

[关键词] 地震救助; 声波; 振动; 生命搜索; 定位

[分类号] P315.9 **[文献标识码]** A

地震等自然灾害灾后最紧迫的任务是救人, 抢救压埋人员越及时, 救助存活率就越高; 所以, 研究受困人员可能发出的声波/振动等求救信号的特征, 找到一种有效的、能及时准确发现被压埋人员位置的定位方法, 是研制声波/振动生命搜索与定位系统的关键之一。

1 对震后求救信号的识别

1.1 受困者求救信号分析

大多数情况下, 救援人员无法直接听到被压埋幸存者的求救声, 但是幸存者可能会听到救援人员的声音, 发出的求救信号。

受困者求救呼喊的间隔大致 1~2 次/s, 频率为 300~3 400 Hz; 也会以 1~3 次/s 的频率敲击建筑物, 产生通过倒塌建筑物和泥土等废墟传递的低频振动波, 其频率一般为几赫兹至几百赫兹。若是敲击身边的金属管道, 则会产生几十至 3 000

Hz 振动波。而受困者的呼吸和心跳会产生有规律的振动, 其 200~500 m/h 的爬行也同样提供了振动波信号。这些受困者所发出的声音在空气中传播, 遇到废墟界面产生反射和折射, 形成在废墟中传播的振动波; 而各种废墟中的振动在传播方向上遇到空气界面时, 也同样推动空气产生微弱的声波。

但是, 震后救助现场情况复杂, 诸如余震、救助施工、人员移动和呼喊等各种干扰噪声存在, 对定位受困者的有用信号采集带来巨大困难。

1.2 识别有效的求救信号

为了压制噪声和达到快速搜救的目的, 我们通过对几种可能的振动源信号(如不同物质的敲击、金属管敲击、移动、呼喊等等)的模拟和测试, 确定通过废墟的空隙传到地面的声音有利于确定受困者的大致方向; 而通过废墟传递到表面的敲击, 能量集中, 便于识别, 对定位受困者的位置非

[收稿日期] 2006-10-09

[基金项目] 国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B05)

[作者简介] 曹辉(1974-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 地球探测与信息技术, E-mail: caohui@cdut.edu.cn。

常有用。但是对废墟中金属管的敲击却不适合对受困者的定位,因为金属管道错综复杂,如变形、弯折、断裂、分叉、不完全损坏。

尽管存在对救援有用的这些信号,但是地震救援工作是在高噪声环境中进行,而且噪声随机、多样、不规则,加之有效信号十分微弱,往往被掩埋在噪声中;所以,对信号噪声的压制和有效信号的提取、放大、多源信号的分离等至关重要。

根据生命搜索与定位系统的设计要求,针对不同的信号源特点和现场使用的需求,我们选择傅立叶变换和小波分析对信号进行噪声过滤;引入独立分量分析方法(ICA)对多振动源信号进行分离;利用相关函数对信号进行同源识别和获取到达时差。

2 搜索定位技术的研究

通过模拟救助现场和对求救信号的分析、识别试验,以及为了解决现场实时处理的困难,提出了“以振动测量为主,以声音测量为辅”的信号采集思路。即把4道振动传感器采集的信号通过耳机输出,监“听”废墟下的声振波,根据“听”到的能量大小来判定搜索方位;同时,在监视屏上“看”已经过滤或相关处理4道波形时间序列,通过振幅值的对比或到达时间的先后确定搜索方向,缩小搜索范围,进行快速搜索和定位。如果还不能确定受困者位置,则根据同源信号的最大振幅的量值或到达时差,采用时差定位计算方法来定位。

2.1 能量追踪搜索

在均匀介质中,声波能量传播呈指数衰减规律,即

$$E_r = kE_s e^{-r} R$$

式中: E_r 为接收点的能量; E_s 为振动源激发能量; R 为接收点到振动源距离; k 为比例常数; r 为声吸收系数。 r 与频率的平方成正比,即频率越高吸收越强烈。同源信号频率一样,则

$$E_r \propto 1/R$$

所以,根据接收到的信号能量的大小,能够快速确定振动源的方向。如图1,使用3个振动传感器A、B和C采集信号。假设 $E_B > E_A > E_C$,由 E_A 、 E_B 和 E_C 的大小及线性比例关系可以确定点M的位置, \vec{CM} 的方向就是振源的方向。随着A、B、C位置的不断移动,振动源的方向也随着不断

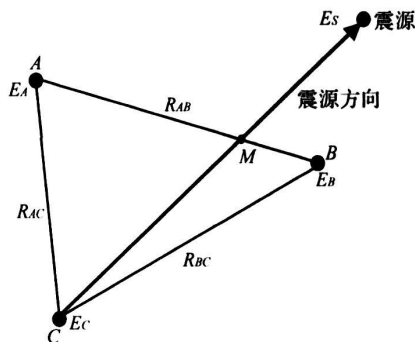


图1 能量快速搜索法示意图

Fig.1 Quick search method based on energy

修改,最终逐渐逼近振动源。

2.2 基于时差的定位方法

在实际地震资料观测工作中,直达波的到达时间难以准确获得,通常利用各个传感器接收的各道信号的时差进行定位计算更具有合理性和可行性。为此,参照天然地震的震源定位原理,利用信号到达3个或4个振动传感器的时差,我们提出了基于时差的定位方法。

2.2.1 获得信号到达振动传感器的时差

利用同源信号在时域的相关特性,求取相关函数。相关函数的最大值处即为两个信号的最相似处,也即它们的时差值。

图2是4个振动传感器采集求救信号后,经过小波去噪、ICA多源信号分离和求取相关函数后,得到求救信号到达4个传感器之间的时差。

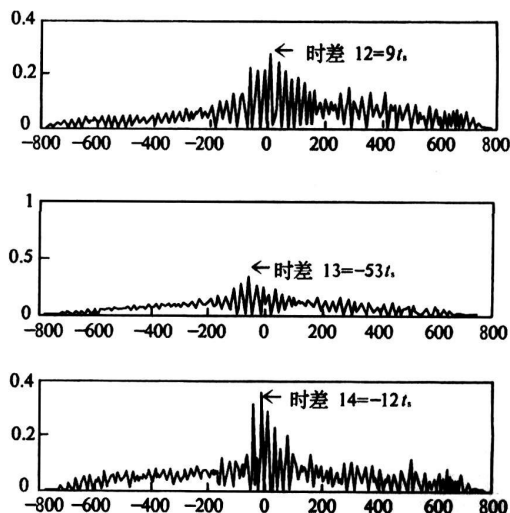


图2 相关信号的到时时差图

Fig.2 Time difference by correlation-function

2.2.2 基于时差的 4 点定位方法

在地震废墟的表面放置 4 个检波器 A, B, C 和 D, 如图 3。设振动传感器检测到敲击波的到时分别为 t_A, t_B, t_C 和 t_D , 已知传感器的坐标分别为 $A(x_A, y_A, z_A), B(x_B, y_B, z_B), C(x_C, y_C, z_C)$ 和 $D(x_D, y_D, z_D)$; 待求的敲击者的坐标为 $P(x, y, z)$ 。

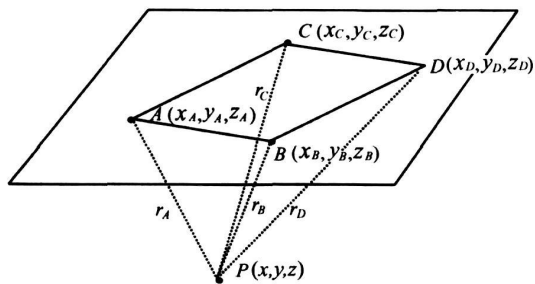


图 3 基于时差的 4 点定位原理图

Fig.3 The four-point time difference of arrival (TDOA) position method

由图 3 的几何关系可知:

$$\begin{cases} r_A - r_B = (t_A - t_B)v \\ r_B - r_C = (t_B - t_C)v \\ r_C - r_D = (t_C - t_D)v \end{cases}$$

即:

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_A)^2 + (y-y_A)^2 + (z-z_A)^2} - \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 + (z-z_B)^2} = \Delta t_{AB}v \\ \sqrt{(x-x_B)^2 + (y-y_B)^2 + (z-z_B)^2} - \sqrt{(x-x_C)^2 + (y-y_C)^2 + (z-z_C)^2} = \Delta t_{BC}v \\ \sqrt{(x-x_C)^2 + (y-y_C)^2 + (z-z_C)^2} - \sqrt{(x-x_D)^2 + (y-y_D)^2 + (z-z_D)^2} = \Delta t_{CD}v \end{cases}$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta t_{AB} = t_A - t_B \\ \Delta t_{BC} = t_B - t_C \\ \Delta t_{CD} = t_C - t_D \end{cases}$$

v 为振动波在废墟中的传播速度, 可以通过救助现场试验获取。求解 (x, y, z) , 即可以确定受困人员的位置^[7]。

当然, 也可以把传感器数量增加到 5 个, 这样在现场时不用单独测量传播速度 v 就可以确定 P 点位置。或者继续增加传感器数量提高定位精

度, 但是这些做法使得仪器制造成本、定位耗时和现场布置时间增加, 与实际要求不相符合。

2.2.3 定位方程组的几何意义

为简化问题, 这里只考虑平面情况, 即:

$$z = z_A = z_B = z_C = z_D = 0$$

设 x 轴与 AB 线重合, 原点在 AB 段的中心, 则方程化为:

$$\sqrt{(x + AB/2)^2 + y^2} - \sqrt{(x - AB/2)^2 + y^2} = \Delta t_{AB}v$$

可再转化成标准双曲线方程:

$$\frac{x^2}{(\Delta t_{AB}v/2)^2} - \frac{y^2}{(AB/2)^2 - (\Delta t_{AB}v/2)^2} = 1$$

其中观测点 A 和 B 就是双曲线的两个焦点, AB 长度为焦距 $(2c)$, 其实轴 $2a = \Delta t \cdot v$, 虚轴 $2b$ 。

$$b^2 = \left(\frac{AB}{2}\right)^2 - \left(\frac{\Delta t v}{2}\right)^2$$

所以, 每个方程就是 1 个双曲面, 如果时间观测没有误差, 3 个双曲面应该相交于一点, 该点就是敲击的位置。

3 结论

本文在对地震救助现场可能出现的声波/振动信号分析的基础上, 结合了数字信号处理的方法, 解决了在震后救助要求实时、快速地获取地下受困者较准确位置的搜索定位方法, 为声波/振动生命搜索与定位系统的研制提供了理论基础。由于地震救助现场声波/振动信号的传播是一个非常复杂的过程, 很难用一个准确的数学物理模型进行定义, 所以在今后的实际应用中, 还需要进一步加强基础理论研究和开展其他有效的搜索定位方式的研究。

[参 考 文 献]

[1] 孔平, 任利生. 地震应急救助技术与装备概况[M]. 北京: 地震出版社, 2001.
 [2] 郭自强. 固体中的波[M]. 北京: 地震出版社, 1982.
 [3] MORSE P M, INGARD K U. Theoretical Acoustics, International Series in Pure and Applied Physics[M]. New York: McGraw Hill, 1968: 603-604.
 [4] 朱介寿. 地震学中的计算方法[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
 [5] BATH M. Introduction to Seismology[M]. Boston, Stuttgart: Birkhauser Verlag Basel, 1979.
 [6] 王绪本, 郭勇, 曹辉, 等. 城市灾害生命救助中的声波

- 与振动数理模型试验研究[C]//中国地球物理学会
年刊.北京:地震出版社,2002:508.
- [7] 简兴祥,王绪本,周熙襄,等.一种基于时差的地震救助生命定位方法[J].物探化探计算技术,2003,25(4):354—357.
- [8] 田玥,陈晓非.地震定位研究综述[J].地球物理学进展,2002,17(1):147—155.
- [9] PORTER K, JOHNSON G S, ZADEH M M, *et al.* Seismic Vulnerability of Equipment in Critical Facilities: Life-safety and Operational Consequences, Technical Report NCEER-93-0022 [M]. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, p380.

Research on the position technology of the acoustic/seismic life detection and position system

CAO Hui¹, WANG Xu-ben¹, JIAN Xing-xiang¹, YANG Li-rong², XU Wen-qi¹

1. College of Information Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Nuclear Geology Institute, Chengdu 610021, China

Abstract: On the earthquake rescue site, there are many kinds of signals come from the victims. The research on the victim location system based on the acoustic and seismic wave detection plays an important part in the earthquake emergent life salvation. After a careful analysis, by choosing the most effective signals and by referring to the classical location method attributed to Geiger, the authors established the four-point time difference of arrival (TDOA) search and position method. This method can locate the position of the survivors in an earthquake and provides the theory foundation for the development and application of the acoustic/seismic life detector.

Key words: earthquake rescue; acoustic; seismic; life detection; position technology