

肖东升, 廖立国. 震后典型建筑物倒塌场景下压埋人员快速定位方法[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 61–66, 106. [XIAO Dongsheng and LIAO Ligu. Fast Positioning Method of Buried Personnel in Typical Building Collapse Scene after an Earthquake[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 61–66, 106. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.04.011.]

# 震后典型建筑物倒塌场景下压埋人员快速定位方法<sup>\*</sup>

肖东升<sup>1,2,3</sup>, 廖立国<sup>1,2</sup>

(1. 西南石油大学 土木工程与测绘学院, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 测绘遥感地理信息防灾应急研究中心, 四川 成都 610500; 3. 成都高新减灾研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:** 现有的针对地震后压埋人员设备的定位方法主要是基于信号接收强度(Received Signal Strength Indication, RSSI), 其过程主要可以分为测距和定位两个阶段。测距阶段由于实际复杂压埋环境的限制没有匹配的无线信道模型可以直接应用。为了实现复杂震后环境压埋人员的快速搜救, 通过模拟三种典型建筑物倒塌压埋空间, 对获得的大量数据利用近高斯-小波分析方法实现信号的平滑输出, 建立不同场景下的最优无线信道模型, 将波动的参数细化到小区间, 在此基础上采用改进的三维加权质心定位算法得到压埋人员三维位置的最优估计。模拟实验结果表明, 该方法具有较高的定位精度, 5 m×5 m 范围内解算的压埋手机最大定位误差为 0.3 m, 平均误差为 0.23 m。10 m×10 m 范围内最大定位误差为 0.51 m, 平均误差为 0.31 m。

**关键词:** 地震灾害; 建筑物倒塌; 压埋环境; 无线信道模型; 近高斯-小波分析; 三维加权质心定位

**中图分类号:** X43; X915.5; TN928; P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2021)04–0061–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2021.04.000

破坏性地震会使得建筑物倒塌形成压埋环境, 造成大量人员伤亡。震后“黄金 72 小时”内精准定位压埋人员可以为应急救援提供强力保障<sup>[1]</sup>。但震后基站瘫痪导致通信链路中断, 救援时间短暂, 搜救力量不足, 通过搜寻被压埋人员手机实现间接定位是实现大范围快速救援的最优方案<sup>[2]</sup>。CHAOXU X 等<sup>[3]</sup>通过手机位置信号数据快速得到震后人员分布和数量情况, 并通过变化率、距离等参数确定地震的大概率影响范围, 为应急救援决策提供科学依据。MOON 等<sup>[4]</sup>提出基于无人机获取被压埋手机的 Wi-Fi 信号和气压计传感器数据的融合定位算法, 得到了被埋人员的三维位置, 但精度存在局限性。罗尚等<sup>[5]</sup>提出以信号穿出点作为压埋人员位置估计的无需已知压埋环境的快速定位算法, 在精度方面取得了一定的成效。洪利等<sup>[6]</sup>基于主动式手机探测方法提出面向生命探测的 Wi-Fi 定位方法, 平均误差为 2.29 m, 但是所选实验场景较为单一。陈雪纯等<sup>[7]</sup>在不同地震灾害场景下利用 Wi-Fi 信号发射器模拟手机信号, 通过简化的信号衰减模型得到较为精确的定位方案。

在废墟下手机信号通过诸多复杂且不可知的无线信道到达接收端, 不同类型的障碍物会对信

号造成不同程度的衰减, 最终接收端获取的信号强度和到达时延是时刻波动的<sup>[8]</sup>。有效的滤波方法可以一定程度上降低波动性影响, 包括均值滤波<sup>[9]</sup>、中值滤波<sup>[10]</sup>、高斯滤波<sup>[11]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[12]</sup>、小波分析<sup>[13–15]</sup>等。为了实现震后压埋人员的快速定位, 必须考虑信号的传播规律, 建立符合压埋场景的无线信道模型。常用的无线信道模型有自由空间传播模型<sup>[16]</sup>、CHAN 模型<sup>[17]</sup>、对数距离路径损耗模型<sup>[18]</sup>、衰减因子模型<sup>[19]</sup>、Keenan–Motley 模型<sup>[20]</sup>等。震后的特殊压埋环境构成了相对于一般室内定位场景更复杂的非视距(Non Line of Sight, NLOS)传播路径<sup>[21]</sup>, 使得传统的信号传播模型不适用于震后场景, 当下缺乏针对压埋人员设备定位的无线信道传输理论模型。

本文通过模拟震后三种典型建筑物倒塌压埋场景解算基于衰减因子模型的各参数最优区间, 利用 Wi-Fi 探针获取手机主动发出的包含 MAC 地址的 probe 包, 快速抓取信号强度值<sup>[22]</sup>。融合近高斯拟合方法和小波分析有效降低信号波动性, 解算得到压埋人员的三维估计坐标, 实现了一种适用于震后压埋人员大范围快速搜救的方法。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2021–03–18 修回日期: 2021–06–23

基金项目: 国家自然科学基金(51774250); 四川省科技计划项目(2019JDR0112); 西南石油大学测绘遥感地信与防灾应急青年科技创新团队(2019CXTD07); 四川省科技创新苗子工程项目(20200046)

第一作者简介: 肖东升(1974–), 男, 汉族, 四川绵阳人, 博士, 教授, 主要从事地震压埋人员定位与防灾减灾技术研究。

E-mail: xiaodsxd@163.com

# 1 震后压埋环境下无线信道模型参数拟合

震后人员压埋环境的形成与建筑物倒塌机理有关,是指震前建筑内的使用空间受到地震影响对建筑构件造成破坏后倒塌或者与某些结构坚固的家具等所形成的可存活空间<sup>[23]</sup>。

地震应急救援过程复杂、持续时间长,搜救效率直接关系到压埋人员存活率。震后建筑物倒塌按其破坏程度可以分为局部垮塌、整体倾斜、整体垮塌<sup>[24]</sup>。这种分类体现了地震过程中垮塌的时序性关系,即先产生局部结构破坏使得建筑整体偏移,超出结构承受力导致整体垮塌。对于建筑物倒塌形成局部生存空间的类型,陈维峰等<sup>[25]</sup>将倒塌空间分为倾斜支撑型、悬臂型、“V”型和夹层型。李亦纲等<sup>[26]</sup>将建筑物倒塌空间类型分为“V”型、悬臂型、倾斜支撑型、夹层型和复合型。本文依据刘晶晶等<sup>[24]</sup>将建筑物的倒塌分为倾斜型、塌落型以及复合型三种(表1)。

在进行压埋人员手机定位时,倾斜支撑型和“V”型由于倒塌后的结构以及障碍物结构材料都很接近,因此只选择倾斜支撑型进行模拟实验。对于悬臂型倒塌及复合型,由于结构稳定性弱,故本文暂不考虑这两种类型。倾斜型、倾斜支撑型以及夹层型的压埋手机信号传播路径示意图如图1所示。

在震后压埋环境中,人员被压埋或者因为门

窗、楼梯变形等因素导致被困,信号传播会受到复杂障碍物的阻挡。而且各场景障碍物的分布情况不具有规律性,不能直接获得精确地数值来反映对信号的屏蔽程度。通过模拟典型的地震建筑物倒塌类型及障碍物主要材料获取大量实测数据得到信号传播障碍物效应数据库,分析各类型主要障碍物对信号的衰减程度,建立与之匹配的无线信号传播模型以适应实际的震后救援情况。

## 1.1 无线信号传播特性

信号穿出压埋环境到达接收端,经过了一系列直射、反射、散射和绕射等传播过程,导致信号出现大尺度衰落和小尺度衰落<sup>[27]</sup>。

大尺度衰落主要由路径损耗和阴影衰落构成。震后废墟环境下,信号传播的损耗除了空气中传播损耗以外,还包括穿透废墟障碍物的损耗。即:

$$PL = A_{\text{废墟}} + A_{\text{空气}} \quad (1)$$

废墟中信号传播需要穿透多层障碍物,其损耗理论上可表示为:

$$A_{\text{废墟}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i \quad (2)$$

式中:  $\alpha_i$  表示第  $i$  层障碍物的衰减系数,  $h_i$  表示障碍物厚度。

信号在自由空间的损耗与手机和 Wi-Fi 探针的距离有关,其数学表达式为:

$$A_{\text{空气}} = -10 \lg \left[ \frac{(c/f)^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (3)$$

式中:  $c$  为光速,  $f$  为信号频率。

表1 不同类型压埋环境的形成机理、稳定性及人员存活率

压埋环境类型	形成机理		稳定性	存活率
倾斜型	建筑物承重墙受力过载使得整体向某个方向倾斜一定的角度。		强	高
塌落型	倾斜支撑型	一侧承重墙受到强烈外力出现倒塌或层间楼板直接断裂最终形成的近似三角形的稳定倾斜支撑结构。	较强	较高
	“V”型	强力荷载作用下建筑物内部楼板超出变形范围后断裂、塌落与两侧支撑墙体形成的存活空间。	较强	较高
	夹层型	建筑物承重墙和重要支柱过载导致上层构件向下塌落并与某些坚固的家具或者部分墙体所形成的空间。	较强	低
	悬臂型	建筑物的某侧墙体倒塌，与另一侧墙体连接的层间楼板自由悬空所形成的空间。	弱	较低
复合型	建筑物同时出现倾斜及塌落。		弱	较高

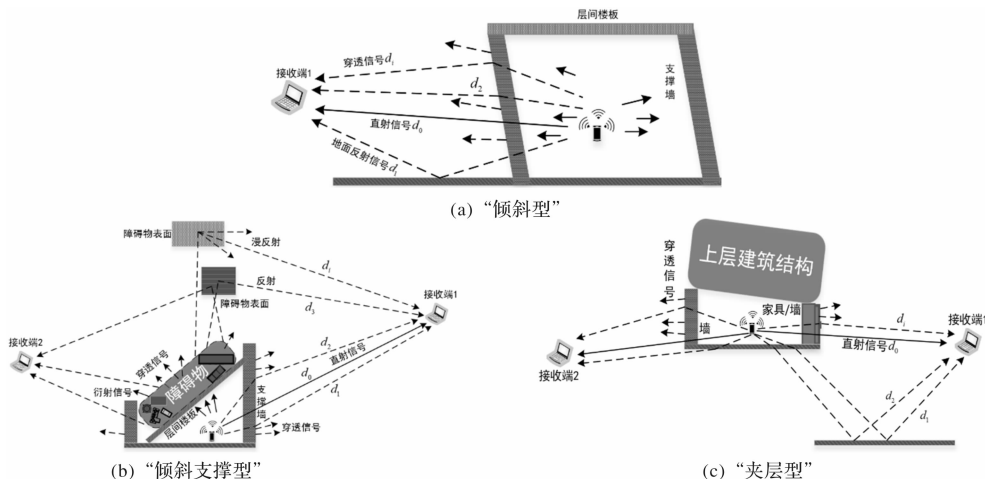


图1 压埋环境信号传播过程

小尺度衰落主要包括多路径效应和多普勒效应<sup>[28-29]</sup>。震后环境中, 定位过程压埋人员手机与 Wi-Fi 探针之间可以忽略多普勒效应的影响。用户接收端的直射信号路径长度为  $d_0$ , 第  $i$  路信号的路径长度为  $d_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , 两者之间的波程差  $\Delta_i = d_i - d_0$ , 可以得到两信号间的相位延迟:

$$\theta_i = \Delta_i \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

考虑到非直射信号经过反射等过程还会被吸收部分能量, 用损耗系数  $\alpha_i$  表示损失的能量。接收端接收经过路径  $i$  到达的信号可以表示为:

$$s_q = \alpha_i U_\Omega \cos(2\pi f_c t + \theta_i) \quad (5)$$

式中:  $U_\Omega$  为载波电压,  $f_c$  为载波频率。

但是在压埋环境中, 信号实际是经过不同路径、以不同程度的损耗、不同的相位和时延到达接收端。叠加后的信号为:

$$S = \left(1 + 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos \theta_i + \sum_{i=1}^n \alpha_i^2\right)^{1/2} \times A \times \cos \left(2\pi f_c t + \arctan \left( \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \sin \theta_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cos \theta_i + 1} \right)\right) \quad (6)$$

## 1.2 信号滤波处理

### 1.2.1 高斯滤波

高斯滤波使用高斯函数筛选出原始数据中高概率区域的 RSSI 值, 将其算数平均值作为滤波结果输出<sup>[30]</sup>。从而达到剔除某些小概率 RSSI 值的目的。高斯滤波的概率密度函数为:

$$F(RSSI) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(RSSI-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为原始数据均值,  $\sigma$  为标准差。由式(8)得到区间  $(\mu - \sigma \leq RSSI_i \leq \mu + \sigma)$  RSSI 的发生概率:

$$P(\mu - \sigma \leq RSSI_i \leq \mu + \sigma) = F(\mu + \sigma) - F(\mu - \sigma) = 0.682 \quad (8)$$

上述区间内的 RSSI 值即为高斯滤波后的输出结果, 有效的剔除了某些小概率数据。但是高斯滤波存在冗余计算量大, 耗时长等缺点, 没有解决数据波动问题。

### 1.2.2 近高斯-小波分析

近高斯拟合方法采用了高斯滤波的思想, 简化了拟合函数过程, 在完成对数据的初步过滤时可以快速筛选并剔除小概率数据。主要原理是以原始数据标准差为参考基准, 设定原始数据与其均值的残差作为判断依据快速筛选出大于基准的数据。计算公式为:

$$|RSSI_i - \mu| \leq \sigma \quad (9)$$

但是近高斯拟合方法也不能消除信号的波动性。由于采集的 RSSI 属于非平稳离散信号, 如果采用傅里叶变换进行频谱分析存在局限性。而小波变换用有限长且可衰减的小波基, 对信号进行

分解、去噪、重构, 通过尺度和平移量两个变量实现信号的时频分析, 可以很好的降低信号的波动性影响。

离散小波变换及重构表达式如下:

$$\begin{cases} DWT_{a,b} = \langle f(t), \psi_{m,n}(t) \rangle, m, n \in Z; \\ f(t) = \sum_{m,n} DWT_{m,n} \psi_{m,n}(t), DWT_{m,n} \\ = \int_R f(t) \psi_{m,n}(t) dt. \end{cases} \quad (10)$$

综合考虑正交性、对称性、消失矩和正则性等因素, 本文选用离散正交小波  $dbN$ , 小波函数的消失矩阶数  $N = 4$ , 分解层数为 6 层的小波变换。分解表达式如下:

$$S = cA_6 + cD_6 + cD_5 + cD_4 + cD_3 + cD_2 + cD_1 \quad (11)$$

式中:  $cA_6$  表示信号分解后的近似部分, 即低频成分,  $cD_1$ 、 $cD_2$ 、 $cD_3$ 、 $cD_4$ 、 $cD_5$ 、 $cD_6$  表示分解后的细节部分, 即高频成分。利用阈值法去除细节部分超过设定值的数据进行去噪, 实现信号的平滑输出。

### 1.3 不同类型压埋环境的无线信道模型

目前基于 Wi-Fi 信号的 RSSI 定位测距阶段大多直接利用室内传播模型中的对数-距离路径损耗模型<sup>[5,7]</sup>, 模型参数由室内环境经验值直接确定。其数学表达式为:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10N \lg(d/d_0) + X_\sigma \quad (12)$$

式中:  $PL(d)$  表示发射端与接收端间距为  $d$  时的路径损耗;  $PL(d_0)$  表示距离为  $d_0$  时的路径损耗, 一般取  $d_0 = 1$  m;  $N$  表示路径损耗因子;  $X_\sigma$  表示标准偏差为  $\sigma$  的零均值高斯分布随机变量, 通常忽略不计。

虽然在实际解算距离时利用路径损耗因子概括了多路径效应、信号干扰等因素造成的影响, 但是忽略了障碍物的阻挡因子, 即没有考虑信号穿过墙、钢筋混凝土和门窗等所造成的损耗。路径损耗因子会随环境的不同而不断波动, 所以对数路径损耗模型一般仅适用于复杂度较低的室内场景。本文选择以衰减因子模型作为无线信道模型的基础, 相较于对数路径损耗模型能更好的反映压埋环境的信号传播规律。其数学表达式为:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \lg(d/d_0) + \alpha d + \beta \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  表示信道的衰减常数,  $\beta$  表示多层障碍物衰减附加值。

由于地震导致的建筑物倒塌会呈现一定的规律性, 本文提出建立复杂废墟下“倾斜型”“倾斜支撑型”“夹层型”三种典型压埋环境的无线信道模型, 将由环境改变而动态变化的模型参数细化到一定的范围内, 解决无线信道模型适应性弱、定位精度较低等问题, 提高环境适应性。获取模型参数的具体步骤如下。

步骤 1: 震后废墟信号传播的无线信道难以预

测,即使等距离不同方向的点也会因损耗的差异导致信号出现波动。尤其是参数  $A$  的精度直接影响建立模型的精度。分别在距离以压埋点  $O$  为圆心,  $l_1 = 1 \text{ m}$  为半径的四点  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$  布设 Wi-Fi 探针采集压埋手机的信号强度值,综合考虑压埋场景模拟及信号地面反射的影响,设置接收端与发射端与地面的高差为  $0.3 \text{ m}$ 。由于信号失真及噪声信号的干扰,每次采集 100 组数据,参数  $A$  的值取四点处理后信号强度的平均值(图 2)。

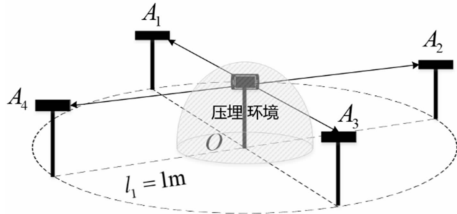


图2 压埋环境下参考距离路径损耗解算

步骤 2: 之后在任意方向依次取  $l_i = 2, 3, \dots, 10 \text{ m}$ , 每次同样采集 100 组数据。对采集的数据分别进行滤波处理,各点  $RSSI$  的估值为数据滤波后的均值。

步骤 3: 此时无线信道模型的表达式为:

$$RSSI_i - A = -10n \lg(d_i) + \alpha d_i + \beta. \quad (14)$$

代入参考距离路径损耗  $A$  及  $RSSI_i$ ,  $i = 2, 3, \dots, n$ , 利用 MATLAB 进行参数拟合,得到  $n$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  的估值区间,完成各压埋环境无线信道模型的建立。

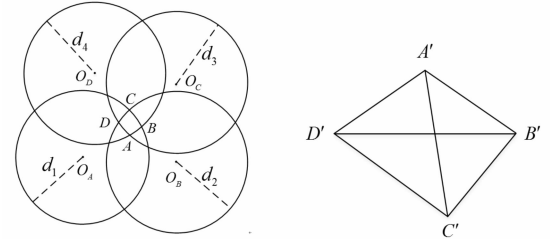
## 2 改进的三维加权质心定位算法

质心定位算法是通过计算待测点周围一定数量的锚节点所构成的多边形质心作为待测点坐标估值。在震后应急救援时,除了需要快速确定被压埋人员的平面坐标以外,相对压埋深度也是救援的重要参考依据。当由二维空间扩展到三维空间,锚节点数量和估算距离误差增加了算法复杂度、降低了稳定性,表现为坐标误差过大甚至难以定位。传统的三维加权质心定位算法以距离倒数作为加权因子,假设待测点与锚节点的估算距离为  $d_1, d_2, \dots, d_n$ , 解算得到的坐标估值为:

$$(x, y, z) = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}}, \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i}} \right). \quad (15)$$

上述算法可以在一定程度上降低误差影响,但是如果锚节点处于同一水平面时只适用于二维坐标计算,不能实现真正意义上的三维定位<sup>[31]</sup>。选择距离最近的四个估算距离  $d_i$  为半径,以锚节点  $(x_i, y_i, z_i)$  为球心作球。每两个空间球体对存在相交、相离、外切、内切、内含 5 种空间几何关

系<sup>[30-31]</sup>。以空间球体对两两相交为例,假设任意三个球分别相交于点  $A(x'_1, y'_1, z'_1)$ ,  $B(x'_2, y'_2, z'_2)$ ,  $C(x'_3, y'_3, z'_3)$ ,  $D(x'_4, y'_4, z'_4)$ , 俯视图及所构成的空间多面体如图 3 所示。



(a) 四个空间球体相交俯视图 (b) 四个空间球体相交形成的多面体

图3 空间球相交模型

$\triangle ABC$ ,  $\triangle ABD$ ,  $\triangle ACD$ ,  $\triangle BCD$  的质心坐标为  $(x_{m1}, y_{m1}, z_{m1})$ ,  $(x_{m2}, y_{m2}, z_{m2})$ ,  $(x_{m3}, y_{m3}, z_{m3})$ ,  $(x_{m4}, y_{m4}, z_{m4})$ , 则有:

$$\begin{cases} (x_{m1}, y_{m1}, z_{m1}) \\ = \left( \frac{(x'_1 + x'_2 + x'_3)}{3}, \frac{(y'_1 + y'_2 + y'_3)}{3}, \frac{(z'_1 + z'_2 + z'_3)}{3} \right); \\ (x_{m2}, y_{m2}, z_{m2}) \\ = \left( \frac{(x'_1 + x'_2 + x'_4)}{3}, \frac{(y'_1 + y'_2 + y'_4)}{3}, \frac{(z'_1 + z'_2 + z'_4)}{3} \right); \\ (x_{m3}, y_{m3}, z_{m3}) \\ = \left( \frac{(x'_1 + x'_3 + x'_4)}{3}, \frac{(y'_1 + y'_3 + y'_4)}{3}, \frac{(z'_1 + z'_3 + z'_4)}{3} \right); \\ (x_{m4}, y_{m4}, z_{m4}) \\ = \left( \frac{(x'_2 + x'_3 + x'_4)}{3}, \frac{(y'_2 + y'_3 + y'_4)}{3}, \frac{(z'_2 + z'_3 + z'_4)}{3} \right). \end{cases} \quad (16)$$

将加权因子改进为各估算距离的倒数和,同时对各估算距离添加幂次修正系数  $m$ 、 $n$ 、 $p$ 、 $q$  以避免修正过度。改进后的三维加权因子为:

$$\begin{cases} \max(d_1, d_2, d_3, d_4) \geq 1m, \delta = 1; \\ \max(d_1, d_2, d_3, d_4) < 1m, \delta = -1. \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} k_1 = (1/d_1^m + 1/d_2^n + 1/d_3^p); \\ k_2 = (1/d_1^m + 1/d_2^n + 1/d_4^q); \\ k_3 = (1/d_1^m + 1/d_3^p + 1/d_4^q); \\ k_4 = (1/d_2^n + 1/d_3^p + 1/d_4^q). \end{cases} \quad (18)$$

当参数  $\delta$  的取值确定以后,将其值赋给  $d_i$  中最短距离所对应的幂修正系数,其余系数的取值等于对应距离与最短距离的比值,可以有效降低最远距离对待测点坐标计算的影响。

最后可以得到待测点坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{x_{m1}k_1 + x_{m2}k_2 + x_{m3}k_3 + x_{m4}k_4}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}; \\ y = \frac{y_{m1}k_1 + y_{m2}k_2 + y_{m3}k_3 + y_{m4}k_4}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}; \\ z = \frac{z_{m1}k_1 + z_{m2}k_2 + z_{m3}k_3 + z_{m4}k_4}{k_1 + k_2 + k_3 + k_4}. \end{cases} \quad (19)$$

### 3 实验与分析

#### 3.1 无线信道模型最优参数估计

由 Wi-Fi 探针获取压埋手机发出的信号波动比较强烈,获取最优参数估计的前提是要采用合适的滤波方法实现信号平滑输出。以“倾斜型”1 m 时采集的 RSSI 数据为例,分别采用高斯滤波、小波分析及近高斯-小波分析进行滤波处理。

从图 4 可以发现,高斯滤波可以在一定程度上减弱小概率突变数据的影响,但并不能解决数据的波动性问题;小波分析虽然降低了数据的波动,但仍受到部分奇异值的影响减弱了输出信号的平滑性;近高斯-小波分析在高斯滤波和小波分析的基础上综合两者的优点,有效的剔除掉奇异值,使得滤波后数据的平滑程度最优。对于不同的复杂典型压埋场景,近高斯-小波分析都能较好的反映真实信号,减弱多路径效应。三种滤波方法拟合所得模型的距离绝对误差和均方根误差如图 5 和表 2 所示。

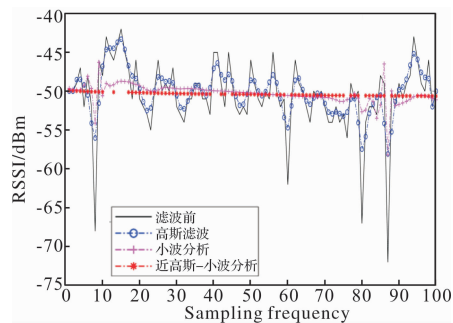


图4 “倾斜型”1 m 处 RSSI 滤波结果

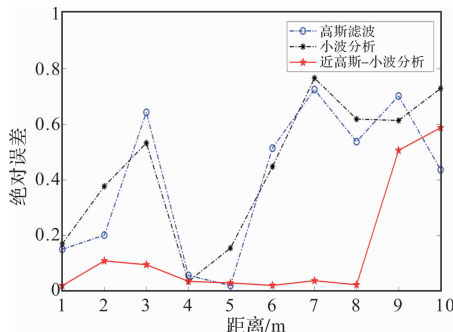


图5 “倾斜型”模型距离绝对误差

表2 “倾斜型”的三种滤波方法均方根误差

高斯滤波	小波分析	近高斯-小波分析
0.945	1.120	0.388

因此,本文采用近高斯-小波分析对数据进行滤波处理,三种压埋环境的无线信道模型拟合参数估值如表 3 所示。

表3 三种典型压埋环境无线信道模型参数

压埋类型	$A$	$n$	$\alpha$	$\beta$
倾斜型	-50.22	(1.93, 2.56)	(-0.34, 0.32)	(-0.91, 0.51)
倾斜支撑型	-56.59	(2.03, 3.39)	(-0.38, 1.06)	(-1.35, 1.74)
夹层型	-63.01	(0.39, 1.62)	(-1.81, -0.52)	(-0.23, 2.54)

#### 3.2 定位实验

参考汶川 8.0 级地震后北川老县城典型压埋环境,在此基础上本文“倾斜型”“倾斜支撑型”“夹层型”3 种典型复杂压埋场景信号传播的主要障碍物及模拟结构组成如表 4 所示。

表4 不同类型压埋环境的主要障碍物及模拟结构组成

压埋环境类型	主要障碍物	模拟结构组成
“倾斜型”	支撑墙	15 cm 砖墙
“倾斜支撑型”	支撑墙、层间楼板	15 cm 砖墙、 15 cm 混凝土
“夹层型”	钢筋混凝土	45 cm 钢筋混凝土

实验的信号发射端为搭载双频 Wi-Fi 的华为荣耀 9(已取下 SIM 卡),接收端为中科爱智智能 Wi-Fi 探针 TZ-001,配合专业的安卓软件进行数据采集。实验地点为西南石油大学明志楼 1 楼围成的 20 m×20 m 区域。压埋手机位置坐标为(3, 3, 0.3)和(5, 5, 0.3),定位方案设计如图 6 所示。

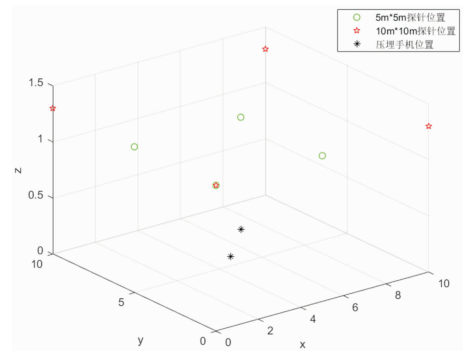


图6 定位实验

为了验证建立的无线信道模型的可靠性,分别在三种压埋环境下每次采集 50 组数据,利用建立的最优模型完成距离解算,并与对数距离路径损耗模型( $n=3$ ,  $A$  为本文已测得的参考路径损耗)计算所得的距离进行对比。

场景 1 对数距离模型的测距中误差为 2.07 m,本文模型测距中误差为 0.10 m;场景 2 对数距离模型的测距中误差为 1.72 m,本文模型测距中误差为 0.13 m;场景 3 对数距离模型的测距中误差为 2.94 m,本文模型测距中误差为 0.23 m。因而本文建立的无线信道模型能较好的反映不同压埋环境的信号传播规律(图 7)。

通过改进的三维加权质心定位算法得到压埋手机的测量坐标(表 5)。



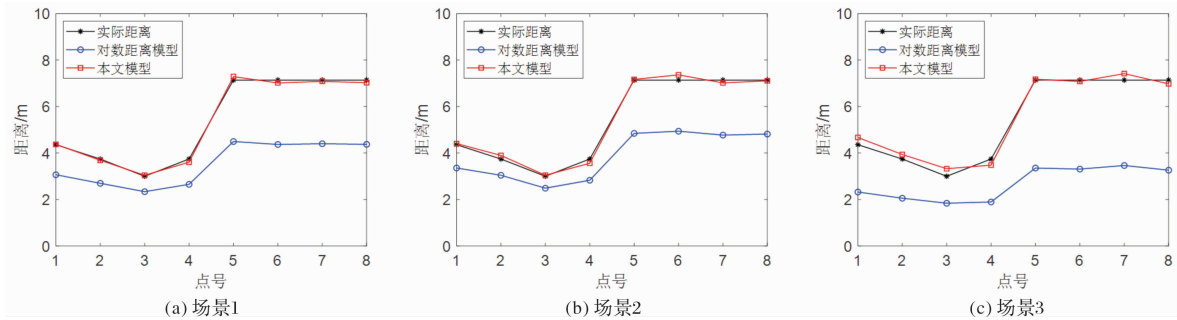


图7 不同压埋场景两种模型距离反演结果

表5 压埋手机的三维坐标实测数据

	5 m × 5 m		10 m × 10 m	
	测量坐标	定位误差/m	测量坐标	定位误差/m
倾斜型	(2.993, 3.025, 0.499)	0.20	(5.077, 5.070, 0.799)	0.51
倾斜支撑型	(2.886, 3.135, 0.263)	0.18	(4.961, 5.145, 0.272)	0.15
夹层型	(2.855, 3.211, 0.153)	0.30	(4.877, 4.949, 0.536)	0.27

4 结束语

震后建筑物的倒塌机理呈现一定的规律性，本文根据三种稳定性和人员存活率较高的典型压埋存活空间并结合主要障碍物类型，对获取的信号进行近高斯-小波分析处理，建立适合不同类型压埋场景的无线信道模型，有效降低测距误差。在实验的三种压埋场景中，采用改进的三维加权质心定位算法，在 5 m × 5 m 范围内解算得到的压埋手机的最大定位误差为 0.3 m，平均误差为 0.23 m，10 m × 10 m 范围内最大定位误差为 0.51 m，平均误差为 0.31 m，均具有较高的定位精度，可以为震后应急救援提供辅助决策，提高压埋人员的搜救效率。

参考文献：

[1] 肖东升, 钟祖峰. 基于人类动力学的地震压埋人员先验在室率研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 54-59.

[2] TANG S, SHU X, SHEN S, et al. Study of personnel positioning in large area based on pseudo base station[J]. Procedia Engineering, 2014, 71: 481-485.

[3] CHAOXU X, GAOZHONG N, XIWEI F, et al. Research on the application of mobile phone location signal data in earthquake emergency work: A case study of Jiuzhaigou earthquake[J]. PloS ONE, 2019, 14(4): e0215361. doi: 10.1371/journal.pone.0215361.

[4] MOON H, KIM C, LEE W. A UAV based 3-D positioning framework for detecting locations of buried persons in collapsed disaster area[J]. Isprs International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2016, 41(B8): 121-124.

[5] 罗尚, 肖东升. 一种面向震后压埋人员的 RSSI 快速定位算法[J]. 测绘科学, 2020, 45(6): 142-149.

[6] 洪利, 武有文, 李亚南, 等. 面向生命探测的 WiFi 定位系统研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 22-29.

[7] 陈雪纯, 张入千, 王立新. 基于 Wi-Fi 信号强度衰减模型的地震埋压人员定位方法研究[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 10-16.

[8] 柴伦尚. 基于灾害现场定位搜救技术的无线信道研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[9] PAN J J, TANG Y Y, PAN B C. The algorithm of fast mean filtering[C]// International Conference on Wavelet Analysis & Pattern Recognition. IEEE, 2007.

[10] BURIAN A, KUOSMANEN P. Tuning the smoothness of the recursive median filter[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(7): 1631-1639.

[11] 李惠芬, 蒋向前, 李柱. 高斯滤波稳健性能的研究与改进[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 633-637.

[12] 陈国良, 张言哲, 汪云甲, 等. Wi-Fi-PDR 室内组合定位的无迹卡尔曼滤波算法[J]. 测绘学报, 2015, 44(12): 1314-1321.

[13] PRAVEEN KUMAR, EFI FOULFOULA - GEORGIU, et al. Wavelet analysis for geophysical applications[J]. Reviews of Geophysics, 1997, 35(4): 385-412.

[14] 朱梦豪, 卢小平, 路泽忠, 等. 融合小波变换与神经网络的 RSSI 室内测距算法[J]. 测绘通报, 2020(1): 50-54.

[15] DAUBECHIES I. Ten Lectures on Wavelets[J]. Computers in Physics, 1998, 6(3): 1671-1671.

[16] SHAW J A. Radiometry and the Friis transmission equation[J]. American Journal of Physics, 2013, 81(1): 33-37.

[17] 鲁文强. 室内无线指纹的多模型匹配方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.

[18] 王欣怡, 潘树国, 蔚保国, 等. 北斗伪卫星信号的室内多径传播特性[J]. 测绘通报, 2019(6): 1-4, 10.

[19] 李桢, 黄劲松. 基于 RSSI 抗差滤波的 WiFi 定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 361-366.

[20] LIMA A G M, MENEZES L F. Motley-Keenan model adjusted to the thickness of the wall[C]//SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, 2005. IEEE, 2005: 180-182.

[21] CHAN Y T, TSUI W Y, SO H C, et al. Time-of-arrival based localization under NLOS conditions[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(1): 17-24.

[22] 李凯雷, 赵海武, 王国中, 等. 基于 WiFi 探针的人流量异常自动预警系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(17): 138-141.

[23] 王多智, 孙柏涛, 戴君武, 等. 底部框架砖房地震倒塌调查与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(2): 184-190.

[24] 刘晶晶, 宁宝坤, 吕瑞瑞, 等. 震后典型建筑物倒塌分类及救援特点分析[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(1): 220-229.

[25] 陈维锋, 王云基, 顾建华, 等. 地震灾害搜索救援理论与方法[M]. 北京: 地震出版社, 2008.

[26] 李亦纲, 张媛, 李志伟. 地震现场倒塌建筑物的搜救策略研究[J]. 震灾防御技术, 2010, 5(4): 477-483.

[27] 武有文, 洪利, 姚振静, 等. 地震废墟环境下 Wi-Fi 无线信号传播模型参数测量[J]. 震灾防御技术, 2017, 12(1): 210-219.

hensive risk index is constructed to assess and regionalize the risk of low temperature rain and snow freezing disasters in Guangxi. The results show that: (1) The influence of low temperature rain and snow freezing in Guangxi is mainly in the northeast and east of Guangxi, and the sub low risk area and low risk area are located mainly in the southwest and south coast of Western Guangxi. The disaster risk mainly comes from low temperature. (2) The grade of danger area is decreasing from northeast to southwest, which is more obvious in low latitude than in high latitude. At the same time, with the increase of latitude, the grade of danger area increases. At the same latitude, with the longitude of the East, the risk zone level increases. (3) High risk area accounted for 4.1% of the total area; sub high risk area accounted for 15.6% of the total area; medium risk area accounted for 23.0% of the total area; sub low risk area and low risk area accounted for 26.7% and 30.6% of the total area respectively.

**Key words:** low temperature rain and snow freezing disaster; risk; assessment; regionalization; Guangxi

(上接第 66 页)

- [28] DARDARI D, CONTI A, FERNER U, et al. Ranging With Ultrawide Bandwidth Signals in Multipath Environments[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(2): 404–426.
- [29] 毛虎, 杨建波, 邱宏坤. 多径效应对信号接收及方向测量的影响[J]. 电讯技术, 2010, 50(10): 63–68.

- [30] 金曼曼, 童敏明, 王飞. 改进的三维加权质心定位算法[J]. 工矿自动化, 2017, 43(2): 44–48.
- [31] 王中元, 程少博, 刘春燕, 等. 空间球交会的三维加权质心室内定位算法[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(5): 944–950.

## Fast Positioning Method of Buried Personnel in Typical Building Collapse Scene after an Earthquake

XIAO Dongsheng<sup>1,2,3</sup> and LIAO Ligu<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Surveying, Mapping and Remote Sensing Geographic Information Disaster Prevention and Emergency Research Center, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

3. Institute of Care-Life, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The existing positioning method for buried personnel and equipment after an earthquake is mainly based on the Received Signal Strength Indication (RSSI), and the process can be divided into two stages: ranging and positioning. In the ranging stage, due to the limitations of the actual complex buried environment, there is no matching wireless channel model that can be directly applied. In order to realize the rapid search and rescue of buried personnel in complex post-earthquake environments we simulate the collapse and buried space of three typical buildings, and use near Gaussian-wavelet analysis method to achieve smooth output of signals on the large amount of data obtained, and establish the best results in different scenarios. The optimal wireless channel model refines the fluctuating parameters between the cells. On this basis, an improved three-dimensional weighted centroid positioning algorithm is used to obtain the best estimate of the three-dimensional position of the buried personnel. The simulation experiment results show that the method has high positioning accuracy. The maximum positioning error of the buried mobile phone calculated in the range of 5 m × 5 m is 0.3 m, and the average error is 0.23 m. The maximum positioning error within 10 m × 10 m is 0.51 m, and the average error is 0.31 m.

**Key words:** earthquake disaster; building collapse; buried environment; wireless channel model; near Gauss-wavelet analysis; three-dimensional weighted centroid positioning