

杜浩国, 孙志, 杜浩标, 张方浩, 汤筱麒, 卢永坤, 曹彦波, 邓树荣, 吕佳丽, 和仕芳, 2021. 震后基于无人机快速三维定位被困人员模型研究. 震灾防御技术, 16 (2): 404—413. doi: 10.11899/zzfy20210220

震后基于无人机快速三维定位被困人员模型研究¹

杜浩国¹⁾ 孙志²⁾ 杜浩标²⁾ 张方浩¹⁾ 汤筱麒¹⁾ 卢永坤¹⁾
曹彦波¹⁾ 邓树荣¹⁾ 吕佳丽¹⁾ 和仕芳¹⁾

1) 云南省地震局, 昆明 650224

2) 中国人民解放军 31663 部队, 昆明 650224

摘要 针对震后被倒塌建筑物或滑坡埋压的被困人员进行快速定位问题, 在阅读大量相关文献的基础上, 以无人机遥感、地理信息空间和三维质心定位技术为基础, 采用无线信号 RSSI 测距模型, 配合影像范围内基准影像数据辅助定位, 构建震后基于无人机快速三维定位被困人员模型。以红河县城区作为研究区, 对城区内特定人员进行三维定位, 结果表明该模型定位精度高, 对震后废墟被困人员营救具有重要意义。

关键词: 三维质心定位 无人机 遥感技术 RSSI 测距 地理信息空间技术

Research on the Model of UAV Fast 3D Positioning of Trapped People after Earthquake

Du Haoguo¹⁾, Sun Zhi²⁾, Du Haobiao²⁾, Zhang Fanghao¹⁾, Tang Xiaochi¹⁾, Lu Yongkun¹⁾, Cao Yanbo¹⁾,
Deng Shurong¹⁾, Lv Jiali¹⁾ and He Shifang¹⁾

1) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China

2) NO.31663 Unit of PLA, Kunming 650224, Yunnan, China

Abstract To locate the trapped people who are buried under the collapse of buildings or landslides after the earthquake, on the basis of reading a large number of relevant literatures and based on uav remote sensing, geographic information space and three-dimensional centroid positioning technology, the wireless signal RSSI ranging model is adopted to coordinate with the reference image data in the image range for auxiliary positioning, so as to construct a set of post-earthquake rapid 3D positioning model of trapped persons based on UAV. Taking Honghe County urban area as the research area, the 3D positioning of specific personnel in the urban area is carried out. The results show that the model has high positioning accuracy and is of great significance to rescue the trapped people after the earthquake.

Key words: 3D centroid positioning technology; UAV; Remote sensing technology; RSSI ranging; Geospatial technology

引言

我国地震活动具有频度高、强度大、震源浅、分布广的特点, 加之建筑物抗震性能差、人口密度大, 地震常造成巨大经济损失与人员伤亡。有关资料显示, 唐山地震发生后 0.5 h、1 d、2 d、3 d、4 d、5 d 被埋压人员救活率分别为 99.3%、81%、52.6%、36.8%、18.9%、7.4%, 时间再久救活率更低。未能快速准确判断

1 基金项目 云南省地震局青年基金项目 (2021K01); 云南省地震局“传帮带”项目 (CQ3—2021001)

[收稿日期] 2020-09-23

[作者简介] 杜浩国, 男, 生于 1991 年。工程师。主要从事地震应急救援、无人机灾情获取和地震灾害损失评估方面的研究。E-mail: 1364125834@qq.com

废墟中被困人员数量、位置及被埋压深度是错过黄金救援时间的关键因素（许建华等，2016），因此，对震后基于无人机快速三维定位被困人员模型的研究具有重要意义。

国内外众多学者对震后被困人员定位问题进行了研究，目前较先进的定位方法主要为光学定位、红外线定位、雷达定位、声波定位、无线信号定位和遥感卫星影像几何定位。胡宇航等（2018）对光学定位方法进行了研究，通过色彩对比提取降噪后震区人员视觉图像特征，并与震区原始图像特征进行对比，获取震区待搜救人员候选图像，但光学定位方法受光线强度、废墟遮挡、幸存者有效光信号微弱等因素限制，且对救援现场环境的要求较高；孙黎明（2012）对红外线定位方法进行了研究，通过探测器将温度信号转换为可测量的物理信号，再经信号处理系统，由显示器显示出红外热图像，从而帮助救援人员确定遇难者位置，但由于红外线对废墟穿透性较弱，导致定位误差较大，无法进行大范围被困人员定位，需近距离操作，无法保证搜救人员安全；孙公德等（2017）对雷达定位方法进行了研究，提出了应用分布式超宽带雷达探测地震被困人员的技术，主要研究了分布式超宽带雷达协同探测网络的构建、超宽带雷达生命迹象探测算法、分布式雷达节点探测数据融合方法，为多雷达干扰抑制、分布式雷达节点自定位、微弱生命迹象稳健探测、废墟穿透定位误差补偿等关键技术难题提供了设计方案，但由于被埋压人员无法移动，严重影响了雷达探测效果，且雷达探测设备部件多、质量大、不便携带；曹辉等（2007）对声波定位方法进行了研究，通过对被困人员发出的各种求救信号进行分析，确定适合现场搜救的有效信号，并提出适用于地震救助现场，基于振动直达波到达时差的 4 点时差定位搜索理论方法，但由于被埋压人员无法时刻发出信号，严重影响了声波探测效果，进行快速大范围探测难度较大；Wu 等（2013）对无线信号定位方法进行了研究，利用已有 WiFi 基础设施和手机射频信号研究移动人员运动状态，通过终端设备自动读取 RSSI 样本和传感器数据，从而省去了传统定位方法所需的现场采集参考点数据过程，但受 WiFi 信号范围限制，要求救援人员在废墟上作业，难以保证救援人员安全；潘雪琛等（2019）对遥感卫星影像几何定位方法进行了研究，基于遥感卫星影像，利用高精度影像数据和高程数据获取物方平面和高程坐标后，将其视为精度较低的控制点参与区域网平差，从而实现在不额外增加实测控制条件的情况下提高定位精度。

基于上述方法局限性，本文采用无人机进行搜索定位（杜浩国等，2018），在很大程度上保证了救援人员生命安全，不仅能进行大范围搜索，还能提高搜索效率，三维定位模型对被困人员埋压深度进行精确定位，对提高震后被困人员存活率具有重要意义。

1 研究方法

1.1 技术路线

本方法技术路线为：采用无人机对搜索区域进行全覆盖搜索，利用无线信号 RSSI 模型测量无人机与被困人员之间的距离；根据所测距离对被困人员进行三维圆周定位；采用质心定位模型确定被困人员精确三维坐标信息；采用无人机遥感技术获取搜索区域高程与正射影像图，得到基于 ArcGIS 的地形+房屋三维矢量图（李永强等，2006；杜浩国等，2021）；通过实例验证模型精确性和高效性。震后基于无人机快速三维定位被困人员模型流程图如图 1 所示。

1.2 无线信号测距模型

本文主要根据接收 WiFi 信号的强度进行被困人员测距（徐秀杰等，2018），RSSI 测距技术利用无线电信号随距离增大而有规律衰减的原理测量节点间的距离，根据读取节点射频芯片寄存器的值，可得到发射节点（如手机）发射信号强度，接收点（终端）根据接收信号强度，计算信号传输损耗，利用理论或经验模型将信号传输损耗值转换为距离值。根据谢益溪（2008）的研究得到无线信号传播衰减模型如下：

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{\text{abm}} \quad (1)$$

其中： $P_r(d)$ 表示收发节点距离为 d 时的接收信号强度（dBm）； $P_r(d_0)$ 表示无线收发节点距离 $d_0=1$ m 时，接收点接收到的无线信号强度 RSSI 值，一般取值为 32.44； d_0 表示收发节点参考距离，通常取为 1 m； n 表示由环境决定的路径损耗指数，一般为 2~4，理想自由空间下取为 2，非理想自由空间下 >2 ； X_{abm} 表示均值为 μ 、方差为 δ 的高斯分布随机数，其标准差为 4~10。

根据谢益溪（2008）的研究，无线信号在自由空间中的路径损耗模型如下：

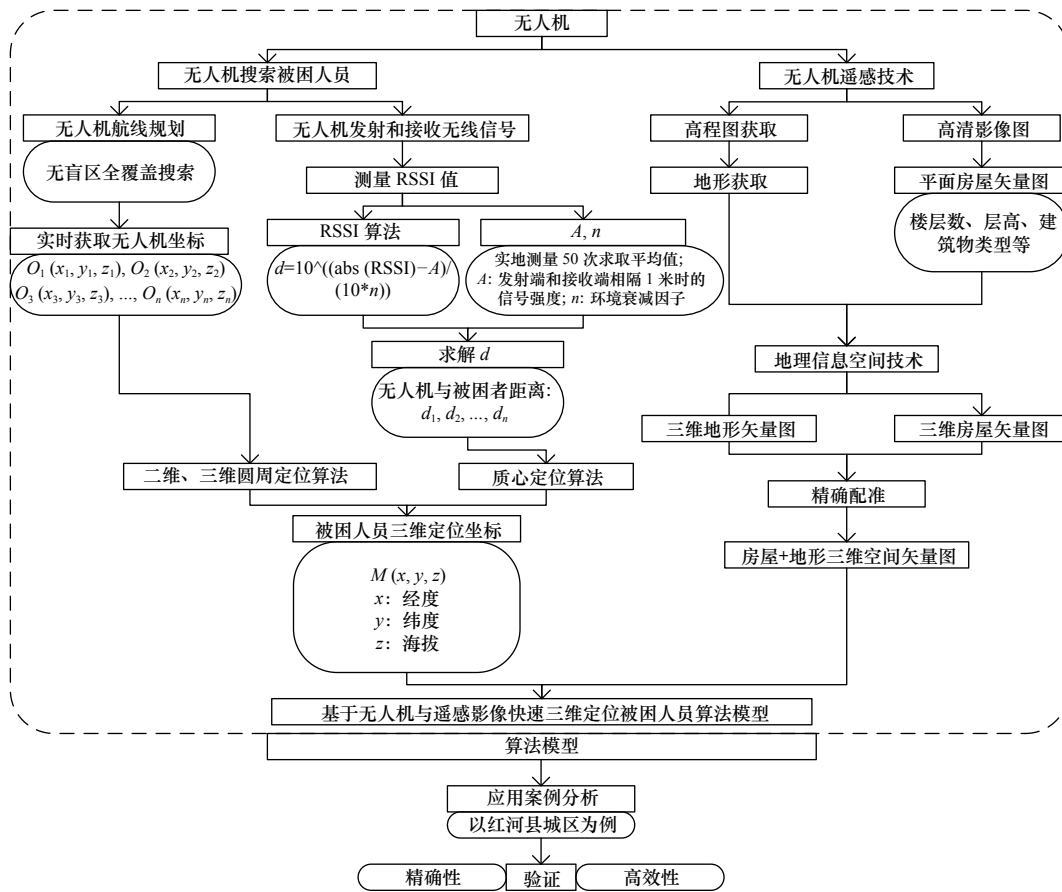


图 1 震后基于无人机快速三维定位被困人员模型流程图

Fig. 1 The flow chart of the model of the trapped people based on the uav fast 3D positioning after the earthquake

$$P_r(d) = 32.44 - 10 \times 2 \times \lg(d) + 10 \times 2 \times \lg(f) \tag{2}$$

其中： f 表示发送端信号发射频率公式。

无线信号传播环境并不是理想的自由空间，因此采用下式计算传播损耗：

$$P_r(d) = 32.44 + 10n \lg(d) + 10n \lg(f) \tag{3}$$

实际应用中可将衰减模型简化为式（4），为便于表达和计算，通常取 d_0 为 1 m，而得到式（5）。

$$P_{RSSI} = P_0 - 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \tag{4}$$

其中： $d_0=1\text{ m}$ ； P_{RSSI} 为接收点接收到的无线信号强度 RSSI 值； P_0 为信号传输 1 m 远处接收信号功率。

$$RSSI = A - 10n \lg(d) \tag{5}$$

其中： A 为无线收发节点相距 1 m 时接收点接收到的无线信号强度 RSSI 值； A 和 n 均为经验值，与使用的硬件节点、无线信号传播环境密切相关，理想状态下 RSSI 与距离的对应关系如图 2 所示。

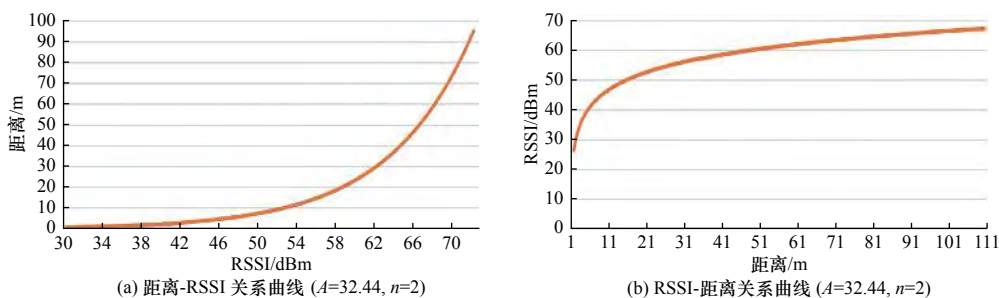


图 2 理想状态下 RSSI 与距离对应关系

Fig. 2 The correspondence between RSSI and distance value under ideal state

1.3 基于 DSM 建模

数字表面模型 (DSM) 指包含地表建筑物、桥梁和树木等高度的地面高程模型, 本文从无人机遥感影像 DSM 中提取建筑物高程信息, 通过 ArcGIS 转换为海拔数据, 并进行实时房屋+地形三维建模。

1.4 无人机三维圆周定位

三维圆周定位模型是指在三维空间中以无人机 (无线信号发射源) 为圆心, 以与信号接收点 (手机) 距离为半径做球体, 根据无人机飞行姿态变化, 得到不同圆心与半径的球体, 其中不同球体相交区域即为无线信号接收点在三维空间下的精确位置。图 3 所示为无人机三维圆周定位模型理想状态下对掩埋被困人员的定位, a 、 b 、 c 三点为无人机在三维空间中的搜寻途径点, d_1 、 d_2 、 d_3 为无人机与被困人员的直线距离可由式 (5) 计算得到, 交点 M 为无线信号接收点在三维空间下的精确位置。

1.5 质心定位

质心定位模型主要解决三维圆周定位中 3 个球体不相交于一点的情况, 使用模型定位被困人员 (手机) 时, 通常将多边形质心定位模型简化为快捷的三角质心定位模型, 以提高计算效率。通过计算三维空间中 3 个球体两两相交的切面圆圆心 $p_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $p_3(x_3, y_3, z_3)$, 可得到被困人员 (手机) 三维定位坐标 $M(x, y, z)$, 如图 4 所示, 进而得到多质心定位模型:

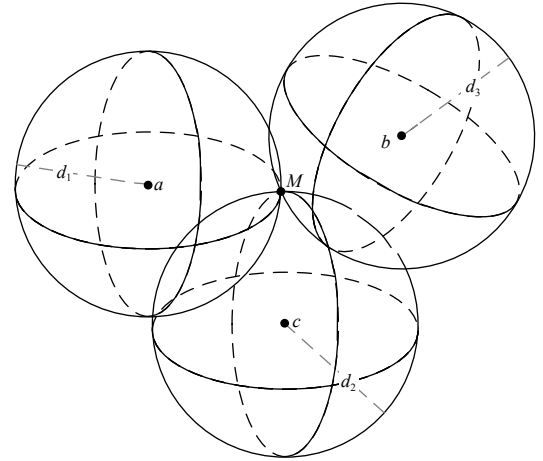


图 3 理想状态下无人机三维圆周定位模型

Fig. 3 The ideal positioning 3D model of UAV circumferential

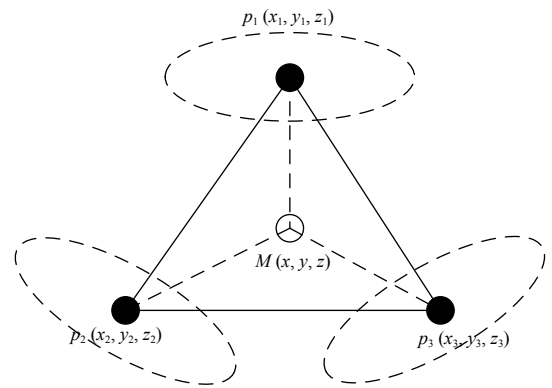


图 4 质心定位模型

Fig. 4 The positioning model of center of mass

$$\begin{cases} x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \\ y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \\ z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \end{cases} \quad (6)$$

其中: n 为定位切面圆圆心数量。

1.6 精度分析

本文采用下列公式对模型结果进行精度分析:

$$R[i]^2 = X[i]^2 + Y[i]^2 + Z[i]^2 \quad (7)$$

其中, $R[i]$ 表示坐标原点至被困人员的距离, $X[i]$ 、 $Y[i]$ 、 $Z[i]$ 分别表示定位模型定位到第 i 个被困人员的坐标位置。

$$R[j]^2 = X[j]^2 + Y[j]^2 + Z[j]^2 \quad (8)$$

其中, $R[j]$ 表示坐标原点至被困人员的距离, $X[j]$ 、 $Y[j]$ 、 $Z[j]$ 分别表示第 j 个被困人员的实际坐标位置。

$$P(i, j) = \frac{|R[i] - R[j]|}{R[j]} \times 100\% \quad (9)$$

其中, P 表示模型定位精度误差率。

2 数据来源与处理

2.1 研究区概况

由于红河县城人口密度高,房屋建筑结构类型复杂且抗震性能差,因此本文选取红河县城城区作为研究区(李金香等,2018)。红河县位于云南省南部,红河上游南岸,隶属红河哈尼族彝族自治州,是云南省地质灾害高易发区。境内河谷狭窄,地势中部高、南北低,山地面积大,是云南典型的高原山地县城之一。

2.2 构建基础模型

本文利用无人机自带的 GPS 定位及图像实时传输功能,实时建立房屋+地形三维空间矢量图,图 5(a)所示为无人机红河县城高清影像,面积约 4.2 km²。图 5(b)所示为基于地理信息空间技术的房屋框架矢量图,该图以红河县无人机航拍高清影像图为基础,采用地理信息空间技术对城区房屋进行精确矢量化(杜浩国等,2019)。图 5(c)所示为红河县城城区三维地形矢量图,由无人机高清影像计算得到,可与房屋矢量图进行高精度配准。图 5(d)所示为震后基于无人机快速三维定位被困人员基础模型,基于图 5(a)、5(b)、5(c)计算得到,该模型不仅提高了定位精度,还增强了可视化程度。

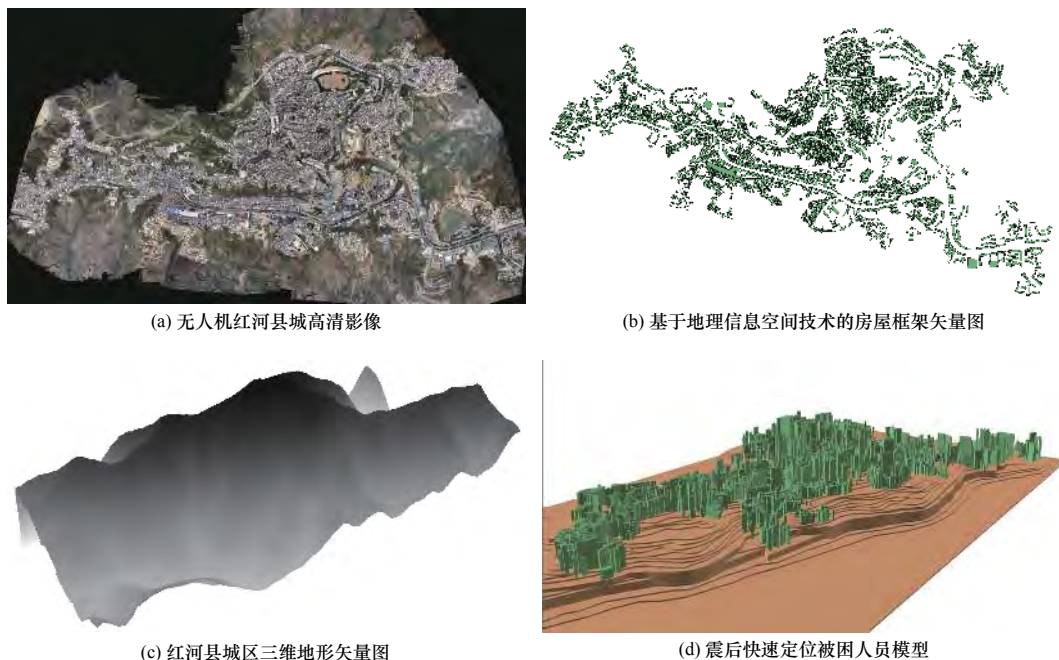


图 5 基础模型

Fig. 5 The fundamental model (a)、The vector diagram of house frame based on geographic information space technology (b)、The 3D vector topography of Honghe county (c)、The model of fast location of trapped people after earthquake (d)

2.3 参数设置

由于红河县城城区面积较大,本研究采用固定翼无人机进行搜索作业(邓飞等,2017),其中飞行面积约 4.2 km²(不考虑无线信号覆盖范围),搜索路径约 54.4 km。由于城区内建筑物最高海拔 989 m,最低海拔 813 m,为避免无人机执行任务时与建筑物发生碰撞,将无人机飞行海拔设定为最高 1 100 m,最低 900 m,无人机搜寻路径如图 6 所示。根据实地调查统计与高分辨率遥感影像建筑物分级提取得到城区内钢筋混凝土房屋共 475 栋,占房屋总数的 6.431%,其余类型房屋共 6 895 栋,占房屋总数的 93.569%,因此参数 n 和 A 均以 50 栋钢筋混凝土房屋以外或钢筋结构较少房屋的实测均值为准,即 $n=3$, $A=40$,得到 RSSI 与距离、距离与 RSSI 对应关系, RSSI 均取绝对值,如图 7 所示。

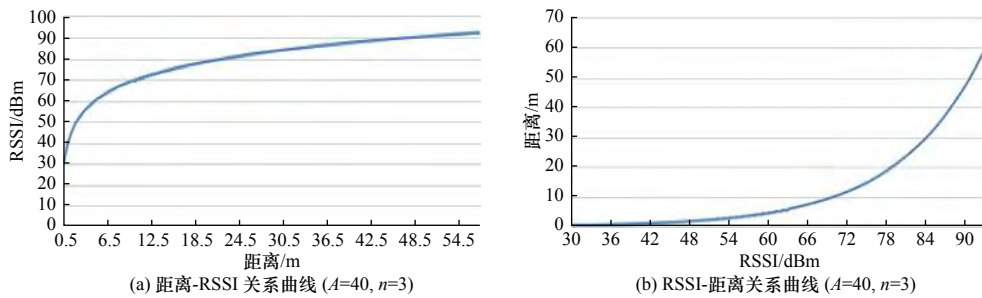
2.4 模型硬件配置

采用无人机进行快速搜索,利用其在一定搜索区域内可快速获取被困人员信息网络的特点,计算得到搜索区域手机数量、信号强度和 MAC 地址等信息。根据 RSSI 测距、圆周定位与质心定位,实现搜索区域手机快速三维定位,并在信息终端(计算机)以三维图形的方式进行显示。模型主要分为搜索系统和显示系统,



图 6 无人机搜寻路径

Fig. 6 The search path of UAV



(a) 距离-RSSI 关系曲线 ($A=40, n=3$)

(b) RSSI-距离关系曲线 ($A=40, n=3$)

图 7 本研究 RSSI 与距离对应关系

Fig. 7 The correspondence between RSSI and distance value in this study

其中搜索系统主要由无人机、无线路由中继器、WiFi 模块、机载电源等设备组成，显示系统主要包括以 ArcGIS 为基础的房屋+地形三维信息。

被困人员定位思路为：无人机信号搜索系统通过自带的 wifi 热点中继设备获取手机信号强度 RSSI，并通过无人机遥控终端设备进行信息传输，将数据传送到用于信息控制与处理的计算机，同时通过无人机获取研究区遥感信息，进行实时三维建模，对被困人员位置进行三维图形化显示。

3 结果分析

为验证基于无人机快速三维定位被困人员模型的准确性和可行性，在红河县城不同区域布设 30 台智能手机，每台手机经过设置后可在无人机飞过的短时间内进行快速连接并进行高效的信息传输，表 1 所示为模型搜索结果，共有 26 台手机被定位，剩余 4 台手机无定位消息，可显示被定位手机三维坐标（经度、纬度、海拔）、连接起始时间、无线信号接收强度、信号质量、信息传输速度。此次无人机飞行搜索时间共 2 h 5 min，共 2 个飞行架次，搜索面积约 5 km²（考虑无线信号覆盖范围）。图 8 所示为三维定位可视化模型结果，模型中将 $O(102.401\ 443, 23.376\ 687, 830)$ 设为坐标原点，经度设为 x 轴，纬度设为 y 轴，海拔设为 z 轴，从图 8 中可直观清晰地看出 26 台手机的三维定位位置。

表 2 所示为模型定位被困人员位置与实际位置对比结果，其中平均误差率为 4.97%，漏检率为 13.3%，最大误差为 11.59%，最小误差为 0.000 71%。这是由于手机信号强度在建筑物中受不稳定因素的干扰，波动较大，且人工测量实际坐标时也会产生误差，但误差范围较小，证明本文提出的定位模型可在有障碍阻挡环

表 1 模型结果
Table 1 The results of model algorithm

序号	MAC地址	物理层协议	RSSI	信号质量	平均信号质量	频率	通道	信息数	最大速度/ Mbps	带宽/ MHz	第一次 检测	最后一次 检测	是否连接	经度°	纬度°	海拔/m
1	68-A0-3E-D8-39-68	802.11g/n/ac	-70.6357	65	63	2.462	11	16	390	20	09:23:09	09:23:15	否	102.418763	23.373135	989.23
2	98-E7-F5-88-9A-53	802.11g/n	-79.6666	58	57	2.462	11	13	450	20	09:26:14	09:26:30	是	102.421803	23.375657	978.75
3	B8-94-36-1C-17-B6	802.11g/n	-83.6453	51	49	2.437	6	13	144	20	09:29:40	09:30:01	否	102.424242	23.373963	971.17
4	B8-94-36-49-97-38	802.11g/n	-88.2236	49	47	2.462	11	13	144	20	09:33:08	09:33:21	否	102.403974	23.372365	966.57
5	E6-8F-F4-93-F0-80	802.11g/n	-88.8517	49	48	2.462	11	16	144	20	09:36:25	09:36:31	否	102.405390	23.373218	952.45
6	96-E5-DE-7C-56-C6	802.11g/n	-86.8687	47	45	2.462	11	15	144	20	09:39:35	09:39:45	否	102.406310	23.371309	959.84
7	88-11-96-3A-C3-8A	802.11g/n	-82.6973	39	38	2.437	6	12	72	20	09:42:43	09:42:59	否	102.408521	23.370730	957.34
8	AE-26-9B-CA-D1-96	802.11g/n	-83.1799	41	40	2.437	6	17	144	20	09:45:21	09:45:35	否	102.409911	23.372194	963.18
9	78-44-FD-C4-AC-C7	802.11g/n	-78.0151	60	58	2.462	11	19	300	40	09:48:31	09:48:45	否	102.412029	23.372019	973.19
10	14-3C-C3-6E-35-CE	802.11g/n/ac	-70.6356	65	64	2.462	11	16	390	20	09:51:16	09:51:42	否	102.414051	23.370901	972.57
11	80-8A-8B-FD-6A-9F	802.11g/n/ac	-70.0237	63	62	2.417	2	16	780	20	09:54:20	09:54:33	否	102.417008	23.372129	981.41
12	82-89-17-C4-A2-47	802.11g/n	-79.3526	57	56	2.437	6	12	300	40	09:57:27	09:57:46	否	102.418084	23.372371	989.17
13	C6-8B-BD-37-4C-7B	802.11g/n	-81.1323	40	38	2.437	6	16	144	20	10:00:02	10:00:10	否	102.418932	23.371930	989.87
14	20-54-FA-58-35-DA	802.11g/n	-85.5554	48	46	2.412	1	15	72	20	10:03:09	10:03:15	否	102.417509	23.371243	979.23
15	88-F8-72-98-3F-A1	802.11g/n/ac	-90.0235	34	33	2.437	6	15	390	20	10:06:45	10:06:58	否	102.416266	23.371261	976.01
16	60-83-34-92-AC-F5	802.11g/n	-88.2236	38	37	2.437	6	16	300	40	10:09:19	10:09:28	否	102.411133	23.370793	966.73
17	88-11-96-3A-C3-8A	802.11g/n	-84.9493	40	39	2.437	6	12	72	20	10:12:27	10:12:35	否	102.409092	23.369330	953.21
18	EC-8C-9A-BD-D1-4C	802.11g/n	-88.8516	49	47	2.412	1	16	300	40	10:17:15	10:17:37	否	102.412496	23.368698	959.53
19	24-31-54-3B-C3-D1	802.11g/n	-85.3565	40	39	2.437	6	13	300	40	10:19:09	10:19:27	否	102.423898	23.368756	968.45
20	60-83-34-AE-51-DC	802.11g/n	-84.5289	40	39	2.412	1	17	300	40	10:57:03	10:57:33	否	102.413991	23.367852	957.33
21	80-8A-8B-FD-6A-9B	802.11g/n/ac	-86.8683	38	37	2.412	1	16	780	20	11:00:07	11:00:35	否	102.416923	23.367627	967.76
22	20-DA-22-3B-0E-60	802.11g/n/ac	-89.1547	36	35	2.437	6	16	390	20	11:03:30	11:03:44	否	102.419275	23.366158	969.59
23	D6-CB-D1-9D-A7-A6	802.11g/n	-88.8617	36	34	2.462	11	16	144	20	11:06:59	11:07:11	否	102.422893	23.366153	963.65
24	46-BD-E9-8A-A8-4C	802.11g/n	-91.3542	35	32	2.437	6	14	144	20	11:10:05	11:10:23	否	102.419093	23.365337	956.22
25	F2-79-60-E9-B0-E9	802.11g/n	-70.6357	64	63	2.437	6	17	144	20	11:13:53	11:14:11	否	102.424897	23.365382	957.51
26	FC-AB-90-24-E0-D3	802.11g/n/ac	-79.6666	53	51	2.462	11	16	390	20	11:16:33	11:17:23	否	102.426891	23.365028	948.37

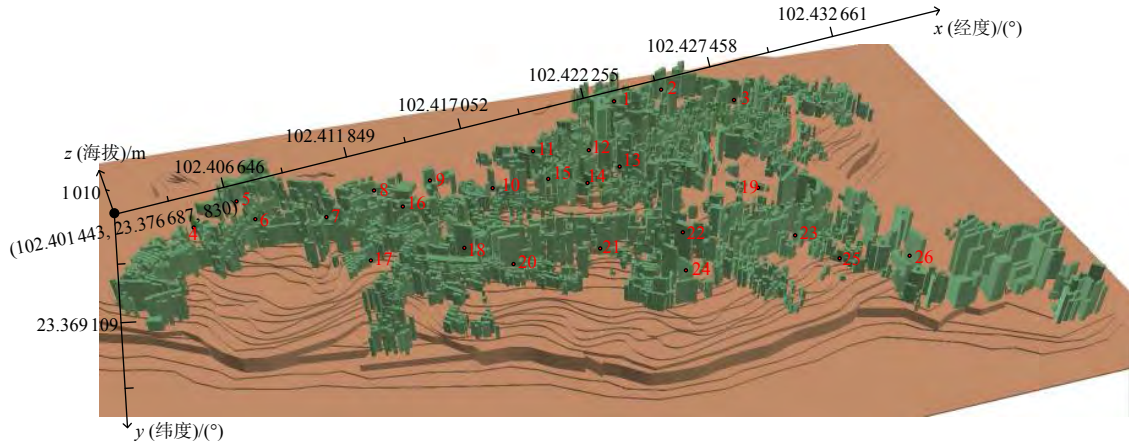


图 8 三维定位可视化模型结果

Fig. 8 The model results of 3D localization visualization

表 2 模型定位被困人员位置与实际位置对比结果

Table 2 Comparison results of position of trapped people located by model and real position

序号	无人机定位模型结果				实际坐标位置				误差率 $P[i_j]/\%$
	经度 $X[i]$	纬度 $Y[i]$	海拔 $Z[i]$	$R[i]$	经度 $X[j]$	纬度 $Y[j]$	海拔 $Z[j]$	$R[j]$	
1	102.418763	23.373135	989.23	994.7923901	102.418441	23.373315	989.18	994.7426407	0.50000
2	102.421803	23.375657	978.75	984.3719874	102.421325	23.375567	977.94	983.5665654	8.18000
3	102.424242	23.373963	971.17	976.8358288	102.424489	23.373317	972.15	977.8101607	9.96000
4	102.403974	23.372365	966.57	972.2604621	102.403999	23.372234	967.16	972.8470105	6.02000
5	102.405390	23.373218	952.45	958.2244903	102.405418	23.373256	953.00	958.7711816	5.70000
6	102.406310	23.371309	959.84	965.5703475	102.407621	23.371267	959.84	965.5704855	0.00100
7	102.408521	23.370730	957.34	963.0854437	102.408168	23.370213	956.98	962.727542	3.71000
8	102.409911	23.372194	963.18	968.8909958	102.409925	23.372314	964.21	969.9149354	10.55000
9	102.412029	23.372019	973.19	978.8428122	102.412834	23.372526	973.54	979.1908880	3.55000
10	102.414051	23.370901	972.57	978.2265800	102.414712	23.370974	973.03	978.6839922	4.67000
11	102.417008	23.372129	981.41	987.0162552	102.417332	23.372826	980.89	986.4992605	5.24000
12	102.418084	23.372371	989.17	994.7326377	102.418471	23.372490	988.99	994.5536871	1.79000
13	102.418932	23.371930	989.87	995.4288029	102.418597	23.371661	989.14	994.7028416	7.29000
14	102.417509	23.371243	979.23	984.8486960	102.417615	23.371329	979.78	985.3955730	5.54000
15	102.416266	23.371261	976.01	981.6469974	102.416398	23.371891	976.31	981.9453040	3.03000
16	102.411133	23.370793	966.73	972.4202420	102.411361	23.370335	966.55	972.2413085	1.84000
17	102.409092	23.369330	953.21	958.9802145	102.409441	23.369287	954.33	960.0935194	11.59000
18	102.412496	23.368698	959.53	965.2627809	102.412183	23.368859	958.97	964.7060794	5.77000
19	102.423898	23.368756	968.45	974.1314881	102.423374	23.368153	968.45	974.1314186	0.00071
20	102.413991	23.367852	957.33	963.0760152	102.413509	23.367290	957.78	963.5232667	4.64000
21	102.416923	23.367627	967.76	973.4447543	102.416226	23.367312	967.23	972.9177702	5.41000
22	102.419275	23.366158	969.59	975.2642992	102.419777	23.366435	969.88	975.5526718	2.95000
23	102.422893	23.366153	963.65	969.3594527	102.422337	23.366123	964.12	969.8266264	4.81000
24	102.419093	23.365337	956.22	961.9731275	102.419999	23.365376	955.77	961.5259174	4.65000
25	102.424897	23.365382	957.51	963.2560411	102.424413	23.365891	957.12	962.8683293	4.02000
26	102.426891	23.365028	948.37	954.1712894	102.426731	23.365581	949.13	954.9266686	7.91000
27	—	—	—	—	102.418431	23.372410	958.96	930640.0862	100.00000
28	—	—	—	—	102.418521	23.371634	979.18	969829.2591	100.00000
29	—	—	—	—	102.417634	23.371334	969.73	951411.8639	100.00000
30	—	—	—	—	102.416367	23.371877	976.32	964236.0993	100.00000
平均误差率/%									4.97000

境下实现手机定位。与传统的人工搜索和架设固定仪器探测相比,本文采用的无人机定位技术可与被困人员手机保持最近距离探测,即无人机在搜索过程中会在一定时间内与被困人员手机保持最近距离信息传输,在搜索效率与精度方面具有优势。

4 结论

针对震后被倒塌建筑物或滑坡埋压的被困人员进行快速定位问题,本文提出了震后基于无人机快速三维定位被困人员模型,与以往人工定位方法相比,本研究提出的模型优势主要体现在无须组织大量人工进行被困人员搜索,保证了搜索人员人身安全,提高了搜索效率与精确度。利用无人机遥感影像提取技术与三维定位技术,构建了地形+房屋三维定位模型,具有三维直观的可视化效果。但本次模型研究仅利用了遥感影像高程差及短距离无线信号传输,后期研究将结合多遥感数据、无线信号增强模型及无人机超低空飞行技术,实现数据优势互补,避免无人机快速飞行搜索时发生遗漏被困人员的情况。

参考文献

- 曹辉,王绪本,简兴祥等,2007. 声波/振动生命搜索与定位系统的定位方法研究. 成都理工大学学报(自然科学版), **34**(3): 336—339.
- Cao H., Wang X. B., Jian X. X., et al, 2007. Research on the position technology of the acoustic/seismic life detection and position system. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, **34**(3): 336—339. (in Chinese)
- 邓飞, 窦爱霞, 袁小祥, 2017. 轻小型无人机在房屋建筑结构类型调查中的应用. *震灾防御技术*, **12**(4): 786—796.
- Deng F., Dou A. X., Yuan X. X., 2017. Application of light-small unmanned aerial vehicle in investigating structural types of buildings. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **12**(4): 786—796. (in Chinese)
- 杜浩国, 张方浩, 邓树荣等, 2018. 震后极灾区无人机最优航拍区域选择. *地震研究*, **41**(2): 209—215.
- Du H. G., Zhang F. H., Deng S. R., et al, 2018. Selection of UAV optimal aerial areas in the extremely-affected region after an earthquake event. *Journal of Seismological Research*, **41**(2): 209—215. (in Chinese)
- 杜浩国, 陈亮, 林旭川等, 2019. 云南红河县城区房屋地震灾害三维仿真模拟方法. *地震研究*, **42**(2): 218—229.
- Du H. G., Chen L., Lin X. C., et al, 2019. 3D simulation method of housing earthquake disaster in Honghe Country, Yunnan. *Journal of Seismological Research*, **42**(2): 218—229. (in Chinese)
- 杜浩国, 林旭川, 张方浩等, 2021. 基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究. *自然灾害学报*, **30**(2): 89—101.
- Du H. G., Lin X. C., Zhang F. H., et al, 2021. Study on emergency shelter location model based on ant colony optimization algorithm. *Journal of Natural Disasters*, **30**(2): 89—101. (in Chinese)
- 胡宇航, 张峰, 2018. 基于视觉图像的震区人员搜救方法研究. *地震工程学报*, **40**(6): 1356—1361.
- Hu Y. H., Zhang F., 2018. Research on personnel search-and-rescue method in earthquake area based on visual imagery. *China Earthquake Engineering Journal*, **40**(6): 1356—1361. (in Chinese)
- 李金香, 温和平, 张治广等, 2018. 三维影像技术在承灾体基础数据调查中的应用——以吐鲁番市主城区为例. *震灾防御技术*, **13**(2): 424—438.
- Li J. X., Wen H. P., Zhang Z. G., et al, 2018. Application of 3D imaging technique in basic data investigation of disaster bearing body—a case of Turpan City, Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **13**(2): 424—438. (in Chinese)
- 李永强, 龚强, 王景来, 2006. 基于 GIS 的数字等震线模型. *地震研究*, **29**(4): 401—406.
- Li Y. Q., Gong Q., Wang J. L., 2006. Digital Iseisms model based on GIS. *Journal of Seismological Research*, **29**(4): 401—406. (in Chinese)
- 潘雪琛, 姜挺, 余岸竹等, 2019. 基准影像数据辅助遥感影像几何定位. *遥感学报*, **23**(4): 673—684.
- Pan X. C., Jiang T., Yu A. Z., et al, 2019. Geo-positioning of remote sensing images with reference image. *Journal of Remote Sensing*, **23**(4): 673—684. (in Chinese)
- 孙公德, 郭勇, 沈建等, 2017. 分布式超宽带雷达地震被困人员协同探测技术. *震灾防御技术*, **12**(4): 966—977.
- Sun G. D., Guo Y., Shen J., et al, 2017. Collaborative detection technology for detecting trapped personnel by distributed UWB radar earthquake. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, **12**(4): 966—977. (in Chinese)

- 孙黎明, 2012. 基于红外成像的生命探测仪设计与研究. 秦皇岛: 燕山大学.
- Sun L. M., 2012. Design and research of life detection based on infrared imaging. Qinhuangdao: Yanshan University. (in Chinese)
- 谢益溪, 2008. 无线电波传播—原理与应用. 北京: 人民邮电出版社.
- 许建华, 李伟华, 杜晓霞等, 2016. 人员伤亡规模不同的特别重大地震灾害专业救援对比分析. [震灾防御技术](#), **11** (4): 781—790.
- Xu J. H., Li W. H., Du X. X., et al, 2016. Comparative analysis of professional rescues for catastrophic earthquakes with different death levels. [Technology for Earthquake Disaster Prevention](#), **11**(4): 781—790. (in Chinese)
- 徐秀杰, 贾荣光, 杨玉永等, 2018. 系留式无人机中继通信系统在地震应急现场的应用试验研究. [震灾防御技术](#), **13** (3): 718—726.
- Xu X. J., Jia R. G., Yang Y. Y., et al, 2018. Technical application of the tethered UAV relay system in earthquake emergency site. [Technology for Earthquake Disaster Prevention](#), **13**(3): 718—726. (in Chinese)
- Wu C. S., Yang Z., Liu Y. H., et al, 2013. WILL: wireless indoor localization without site survey. [IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems](#), **24**(4): 839—848.