

敬远兵.基于卫星导航的震后被困人员手机信号定位分析[J].地震工程学报,2019,41(4):1098-1104.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1098

JING Yuanbing, Mobile Phone Signal Location Analysis of Trapped People after Earthquake Based on Satellite Navigation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 1098-1104. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1098

基于卫星导航的震后被困人员手机信号定位分析

敬远兵

(内江师范学院, 四川 内江 641112)

摘要: 针对当前被困人员手机信号定位所采用的方法中手机信号定位距离存在局限性,且信号来源方向的确受信号传播损耗变化影响较大的问题,提出基于卫星导航的震后被困人员手机信号定位分析方法。从地震的突发性、破坏性、社会影响和防御难度四个方面分析地震的特点,设计便携式移动台,通过 GPS 单差模型提取手机残差信号,计算各移动台在指定区域中的手机信号平均残差,获取各个区域手机信号的均方根,将均方差代入所有地震事件的双差方程进行联立,求解手机信号强度,通过 AOA 测量方法实现了卫星导航定位手机信号的分析。通过模拟在地震废墟中测试手机接收信号强度指示值(RSSI)与手机信号发射强度,对采集的数据进行分析以验证该系统在大范围地震废墟中的搜寻能力。实验结果证明,提出该方法系统可以对大范围的手机进行搜寻定位,信号来源方向较为稳定。

关键词: 卫星导航; 定位; 手机信号

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-1098-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.1098

Mobile Phone Signal Location Analysis of Trapped People after Earthquake Based on Satellite Navigation

JING Yuanbing

(Neijiang Normal University, Neijiang 641112, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problems in the current method of mobile phone signal location, i.e., the limitation of location distance and the great influence of the change of signal propagation loss on the determination of signal source direction, a mobile phone signal location analysis method based on satellite navigation is proposed. From four aspects of the suddenness, destructiveness, social influence, and defensive difficulty of the earthquake, a portable mobile station is designed to extract the residual signal of the mobile phone through the GPS single difference model. Then, the average residual of mobile phone signals in the appointed area is calculated, and the root mean square of the mobile phone signals of each area is obtained. The mean square deviation is substituted into the two-difference equations of all seismic events, and the mobile phone signal intensity

收稿日期: 2018-11-13

基金项目: 四川省教育厅资助科研项目(18ZB0320);国家自然科学基金(41272366)

作者简介: 敬远兵(1977-),男,四川安岳人,高级工程师,研究方向:卫星导航定位应用与测绘工程。

E-mail: jingyuanbing@163.com.

is solved. The positioning of mobile phone signals based on satellite navigation is realized by the angle of arrival measurement method. The collected data were analyzed to verify the ability of the system for searching in large-scale earthquake ruins. The experimental results show that the proposed method can search and locate a large range of mobile phones, and the signal source direction is stable.

Keywords: satellite navigation; positioning; mobile phone signal

0 引言

城市中的人口以及建筑物密度都呈现较高状态,当发生破坏性地震时,相比于人口以及建筑物密度较小的地区,其产生的损失较大。这就要求在城市地震救灾中,对被困人员的搜查速度要得到最大程度的保证,即要在最短的时间内获取被困人员的位置,将损失控制到最小。地震发生后,灾害现场具有如下特点:灾害现场容易出现大量人员受伤或死亡;灾区环境复杂,具有不可预知性;灾害现场的定位工作受到其他无线定位因素的干扰;二次地震的发生也在较大程度上对被困人员以及搜救人员的人身安全造成威胁。综上所述,在人口、建筑密集地区发生破坏性地震后,在救援能力范围内,要以最快速度搜索被困人员位置信息,这对减少震后人员伤亡数量具有关键性作用^[1]。

被困人员生命搜寻定位方式可以分为基于人体生命特征定位和基于携带的信标定位 2 大类。周德山等^[2]提出基于相对走时计算的地面微地震监测 SET 定位算法。利用相对走时误差推导走时的计算公式校正射孔折射点,在折射点四周检测网格点的走时区域,最后利用数值模拟进行实验测试。王纪程等^[3]提出基于极快速模拟退火与网格逐次剖分的微地震定位算法。利用 DIRECT 程序探索策略,求解震源扫描目标函数区域的最优解,极快速模拟退火与网格逐次剖分的微地震定位。

上述方法中手机信号定位距离存在局限性,且信号来源方向的确受信号传播损耗变化的影响较大,因而本文提出基于卫星导航的震后被困人员手机信号定位分析方法。通过实验测试,可以实现快速的受灾人员统计和手机定位的应急救援需求。

1 卫星导航定位手机信号分析

1.1 破坏性地震的特点

探析相关地震问题之前需要深入分析地震特征,才能对症下药。本文从破坏性地震的突发性、破坏性、社会影响和防御难度这四个方面出发,分析其基本特点:

(1) 突发性强

破坏性地震发生比较突然,并且地震的持续时间为几秒到几十秒钟,在短时间内会造成人员伤亡以及房屋倒塌,其带给人们的损失超过了其他自然灾害。

(2) 破坏性较大

破坏性地震发生可能会影响或者破坏一些国家以及地区,若发生在经济发达和人口众多的地区,则会造成巨大的经济损失以及大量人员伤亡^[4]。

(3) 社会影响

地震灾害具有经济损失大、人员伤亡严重以及突发性强的特点,且会出现一系列的社会反映,给一些地区或者国家的经济和社会活动带来巨大的冲击,引起了国际、政府和社会的高度重视。地震的破坏区域是有限的,但波及面比较广、范围也很大,较大程度地影响了人们的身心,还对社会造成巨大的影响。

(4) 防御难度

破坏性地震的发生与台风、干旱以及洪水等相比,其预测难度较大,而需要投入大量的资金来提高建筑物的抗震性能,在短时间内很难做到^[5]。必须通过各方面的配合和协调来减轻地震灾害,同时也需要做细致且艰苦的工作。地震灾害防御比其他灾害更加困难。

1.2 便携式移动台构架设计

城市地区在经历破坏性地震后,被困人员数量巨大,加上地震发生对电力以及通信线路的破坏。在此种恶劣的环境下,保证搜救设备具有最高效率,是保证被困人员在第一时间得到救助的关键性因素。在设备完好且效率得到保证的情况下,搜救人员才可利用相关设备搜救被困人员及保证自身的人身安全^[6]。在搜救过程中,起到关键性作用的是便携式移动台的功能是否完好。便携式移动台主要发挥以下两个功能:

(1) 以最快速度收集移动台搜索范围内的被困人员具体数量,让搜救人员在第一时间得知被困人员分布信息,合理分配救援物资;

(2) 在移动台搜寻范围内,获取被困人员精准位置,让救援人员根据位置分布,对被困人员展开救援。

便携式移动台主要由两部分组成,分别为通信信号分析处理、手机信号接受处理。通信信号处理主要依靠 SDR 计算机以及无线电通用外设备(USR-PR)完成,手机信号处理主要由功率放大器、低噪声放大器、双工器、天线组成。SDR 计算机保证 USRP 设备数据收集工作启动,采集数据由功率放大器进行信号放大处理,通过天线向外发射电磁波,释放的电磁波由低噪声放大器接收,并做信号增强处理,保证与被困人员通信设备较远距离的连接,双工器将发射信号与接受信号结合成一组接口,防止其他不相关电磁信号的干扰^[7]。



图1 便携式移动台

Fig.1 Portable mobile station

1.3 GPS 手机残差信号提取与路径误差降低

通过 GPS 获取的信息含有噪声影响,此种噪声具有类似白噪声以及一阶高斯马尔科夫噪声的特征,针对此种特征,采用时序相关分析方法对 GPS 手机残差信号进行提取处理^[8],通过提取信号残差序列中多路径信号特征,降低地震被困人员搜救信号传输路径误差。

GPS 手机残差信号噪声指去除多路径、大气延迟等因素后的纯粹信号噪声,对该噪声进行相关特性研究。零基线单差模型在提取该残差信号具有较为广泛的应用。零基线 GPS 单差模型信号提取步骤主要包括以下几个方面:

(1) 根据 Geometry-free 模型,对残差信号浮点解进行计算,获取协方差矩阵^[9];

(2) 采用 LAMBDA 方法对获取浮点解的整数最小二乘解;

(3) 将最小二乘解代入单差观测方程(1),提取残差信号。

$$\lambda \Delta \varphi = \Delta \rho + c \Delta t + \Delta N^S - \Delta N^T + \Delta e \quad (1)$$

式中: Δ 表示单差算子; Δ 表示双差算子; λ 表示载波波长; φ 表示载波相位; ρ 表示卫地距; t 表示接收机钟差; e 为量测噪声。

通过提取残差信号,可以确定便携式移动台发射的被困人员精确坐标,使得搜救位置便于快速确定^[10]。由于被困人员位置坐标求解过程较为复杂,因而式(1)的信号接收误差未知量 $\Delta \varphi$ 的确定显得十分关键。 $\Delta \varphi$ 可以表示为 n 个单差观测方程,使用最小二乘法对其进行求解,从而保证被困人员位置坐标得以确定。为了获取位置坐标的单差残差序列,将 SCOUT 脚本工具(SOPAC 服务)应用至最新版本计算测站中,得到被困人员位置坐标单差残差序列表达式为:

$$R_{ij} = t_{ij}^1 - t_{ij}^0 \quad (2)$$

式中: i 代表 i 个台站; j 代表 j 个事件; t_{ij}^1 代表台站测试获得的初至震相到与发生地震时刻的差值,也可以代表实际走时; t_{ij}^0 代表地震到台站的震中距离。地震的残差是指地震的实际走时与理论走时的差异,台站测得的初至震相到误差是偶然误差,手机信号的偏差主要是说明实际观测与理论走时不一致。该偏差包括射线路径中标准地球模型与实际地球结构之间的差异,通常情况下,手机信号是浅层不均匀性、定位误差的介质等因素引起的误差积累。

为了将手机信号在不同区域的特征反映出来,计算各移动台在指定区域中的平均残差^[11]。其计算公式为:

$$r_i = \sum_{j=1}^N R_{ij} / N \quad (3)$$

式中: N 表示记录到的地震事件数量。通过求取各个台站的平均值 X ,计算各个区域手机信号的均方根 S ,表达式如下:

$$S = [(r_i r_i) / n]^{1/2} \quad (4)$$

$$X = 1/n \sum_{i=1}^n r_i \quad (5)$$

式中: n 代表地震观测台的个数; S 包括路径误差和台基误差; X 包括路径误差^[12]。

1.4 卫星导航定位被困人员手机信号分析

GPS 系统采用 CDMA(码分多址)技术将在轨卫星分开^[13],每颗卫星使用相同的调制方法,在相同的载波频率上调制各自唯一的伪随机码和数据信息,使用星载卫星天线发射信号。轨道卫星分布如图 2 所示。

假设卫星导航记录的地震事件分别为 a 、 b ,双差 du^{ab} 可以表示为:

$$du^{ab} = u^a - u^b = (T'^a - T'^b)^{obs} - (T'^a - T'^b)^{cal} = (e^a - e^b)^{obs} - (e^a - e^b)^{cal} \quad (6)$$

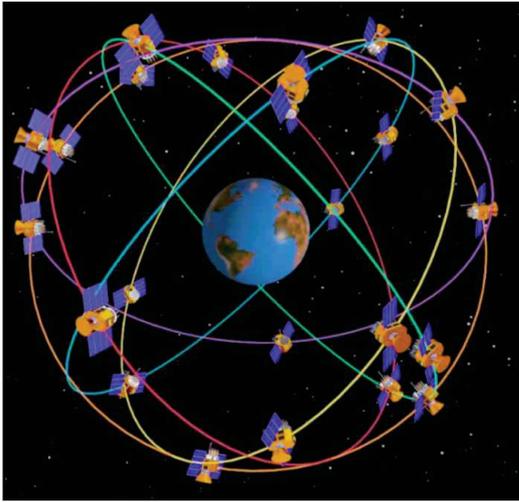


图 2 轨道卫星分布图

Fig.2 Orbital satellite distribution map

式中: T'^a 、 T'^b 分别表示地震 a 、 b 的震波到时, 对应的走时分别为 e^a 、 e^b ; $(e^a - e^b)^{obs}$ 、 $(e^a - e^b)^{cal}$ 分别表示地震走时观测值和理论值^[14-15]。将地震走时

按照 $u^a = \frac{\partial e^a}{\partial m} \Delta m^a$ 展开可得:

$$du^{ab} = \frac{\partial e^a}{\partial m} \Delta m'^a - \frac{\partial e^b}{\partial m} \Delta m'^b \quad (7)$$

式中: $\Delta m'$ ($\Delta x'$, $\Delta y'$, $\Delta z'$, $\Delta \tau$) 代表手机信号参数扰动量。将卫星导航记录的所有地震事件的双差方程进行联立, 可以得到:

$$WGm' = SWd \quad (8)$$

式中: G 表示 $M \times 4N'$ 的偏微分矩阵, M 、 N' 分别表示观测数和地震事件数的矩阵; W 表示方程加权对角矩阵; d 表示双差矩阵。对式(9)求解可以获取到手机信号强度^[16-17]。在此基础上, 通过移动台网络接入点(AP) 与被困人员(MS) 之间的距离判断被困人员的位置。通过 AOA 测量方法进行判定, 假设被困人员手机信号属于未知节点, 坐标为 $C(x, y)$, 移动台信号属于已知节点 i , 坐标为 $C(x_i, y_i)$, 两个节点之间的方向角以及仰角为 φ_i 和 α_i 。根据节点间的地理位置关系, 确定未知节点位置坐标 $C(x, y)$ 。结合手机信号强度来完成对卫星导航定位手机信号的分析:

$$C(x, y) = \frac{(WGm' + du^{ab})\Delta m'}{\varphi_i(T_{j'i} - T_{ki'})\alpha_i C(x_i, y_i)} \quad (9)$$

利用式(9) 可最终得到卫星定位手机信号, 确定被困人员位置, 完成搜救工作。

2 工程实例模拟分析

为验证本文方法对于被困人员手机信号搜寻的

性能是否满足相关规范的要求, 采取下述三个方面对方法的定位能力进行验证。卫星导航旨在一定空间范围内的手机信号进行快速的搜索与定位。主要包括卫星导航的电磁波信号传播范围、基于卫星导航的快速定位能力、手机信号来源方向与信号传播损耗变化的关系。

2.1 基于卫星导航的便携式移动台定位能力验证实验

在便携式移动台的卫星导航范围内, 对移动台四周方向的手机损耗数据进行获取, 通过 Okumura-Hata 模型计算移动台与被困者手机之间的距离关系。本实验的便携式移动台采用全向天线, 使得手机的微弱信号也可以包括在移动台网络的搜索范围之内。便携式移动台电磁波信号传播范围确定过程如下:

(1) 在解放路中段隔离带处放置便携式移动台, 配备全向天线, 通过支架将天线架起, 高度保持在距离地面 7 m 处;

(2) 对移动台周边被使用的 GSM 频段进行搜索;

(3) 将获取的 GSM 频段与周围无线电波进行对比分析, 选取冲突量最小的频段, 在保证发射功率最大的情况下启动便携式移动台, 形成便携式移动台网络;

(4) 在隔离带范围内, 分别在不同位置放置手机, 模拟地震过程中被困人员, 将手机加入便携式移动网络平台中, 通过激光测距仪测试手机在便携式移动台可接受范围内的最远距离, 明确手机放置的最远距离, 也就是搜救范围的最大半径。得到便携式移动台最大范围如图 3 所示。



图 3 传播范围示意图

Fig.3 Schematic diagram of the propagation range

对图 3 进行如下分析:

(1) 通过上述操作步骤, 在便携式移动台的向东 300 m 处是手机的最远进入点, 证明传播范围为

一个半径为 300 m 的类似圆形,在手机与移动台之间没有障碍物或者遮挡物的存在。由于移动台采用全向天线,确定电磁波传播范围是一个半径为 300 m 的圆形。

(2) 在实际地震发生后的环境中,由于建筑物掉落物以及各种障碍物的阻挡,电磁波传播范围会在一定程度上缩小。

(3) 在试验区域内,相比于地震废墟下被困人员的手机信号,实验所用手机信号强度较高,但对于灾后无信号情况的模拟程度不足。在排除其他基站信号的干扰以及高层建筑干扰的影响下,要对全向天线搜索范围进一步做扩大处理。

(4) 在扩大后的搜索区域内,在固定位置放置 3 台便携式移动台,进行手机数据的采集。在一次采集后,移动便携式移动台的位置,采集同一手机的信号数据信息,减少数据采集误差。

2.2 基于卫星导航的快速定位能力验证实验

为了验证卫星导航定位的速度快慢,将便携式移动台的全向天线对准某一特定方向,保证搜索功率,进行手机信号搜索。由于天线具有方向性,在发射信号稳定的情况下,天线的方向在一定程度上决定了手机信号的传输损耗,方向不确定的情况下,传输信号距离亦不确定,在此分析传输信号距离与信号来源方向之间的关系,以此降低手机信号的传输损耗。二者关系确定结果如下:

(1) 通过旋转扇区天线的方式,完成激光测距仪的测距工作,对移动台周边 360°进行手机信号搜索。

(2) 结合扇区天线方向图,提高天线高度对手机进入范围的大小影响较小,可通过进一步增强发射电磁波强度的方法扩大手机进入范围大小。

(3) 在其他基站信号干扰以及建筑干扰的影响排除的情况下,进一步延长扇形天线搜索范围。

(4) 便携式移动台系统可以一次性搜索超过 3 km²范围内的手机。

2.3 手机信号来源方向获取实验

在便携式移动台系统中,利用定向天线实验测试了最优查找功能,但在定向天线角度变化和信号传输消耗程度方面没有得到验证,该程度方面是指数据输出起始方向。

实验内容:

(1) 设计便携式移动台系统,设置八木天线,确定方向变化;

(2) 开启便携式移动台通讯网络模式;

(3) 结合手机共享便携式移动台系统;

(4) 建立语音通话平台,记录手机 RSSI,并对手机信号传输数据进行提取;

(5) 将手机放置在一个地方,平均 10 分钟改变一次八木天线方向;

(6) 记录好方向变化数据。

实验结果:便携式移动站接收手机信号的变化值如图 4 所示。根据八木天线方向的变化,RSSI 的波动变化较大,但其均值并没有变化;根据图 5 手机信号传输变化可知,手机传输信号变化发生了较大波动,且变化较为平均;根据图 6 传输消耗程度可知,天线与手机位置变化的传输程度较差。

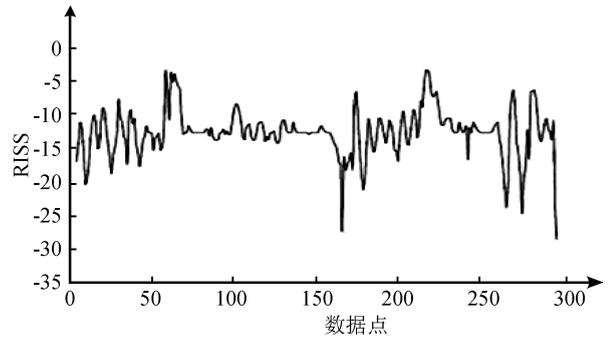


图 4 RSSI 变化图

Fig.4 RSSI change chart

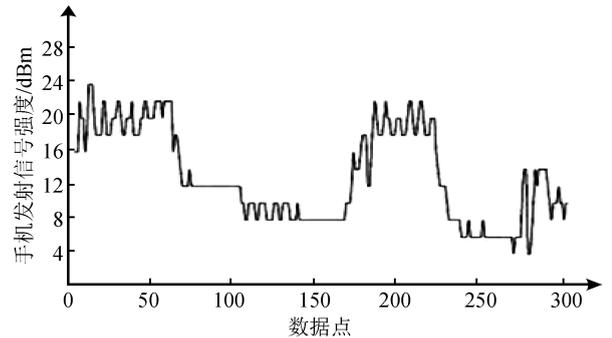


图 5 手机信号发射强度变化图

Fig.5 Emission intensity change diagram of mobile phone signal

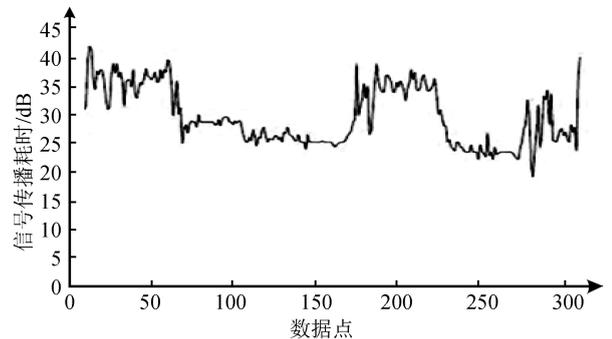


图 6 传播损耗变化图

Fig.6 Propagation loss change diagram

(1) 在对天线方向进行转换时,若 RSSI 发生较大程度的改变,但其均值却基本保持不变,那么无法根据 RSSI 的数值变化来判断手机信号方向。

(2) 在实验分析过程中,手机信号发射强度值无较大改变。路径方向以及信号传播效率等外在因素均会对 RSSI 信号发射强度产生间接影响,当外在因素发生改变时,信号发射功率能够通过调节直接影响信号发射强度。因此,随着信号传播效率的降低,手机能够减小信号发射强度,进而降低手机能耗。

(3) 便携式移动站中的 RSSI 与天线角度、传播距离之间不存在一定的关联性,仅依靠 RSSI 无法完成对信号的定位,需要通过对手机发射信号强度的综合控制实现定位。

(4) 传播损耗这一参数具有明显的变化特征,可以很好地体现天线方向的转变,因此在实验分析中,可以利用传播损耗这一参数定位得到手机信号方向。

(5) 八木天线具有很强的方向性,在视距范围内对手机信号定位分析较为受用,不适合大范围内的信号定位。

综上所述,基于卫星导航的被困人员手机信号定位分析方法可以在设备所包含最大范围内,快速定位被困人员位置信息,通过定向天线角度变化与信号传播损耗变化的关系,使得手机信号来源方向获取得到保证。

3 结论

卫星导航定位手机信号分析是地震领域中的重要研究话题,被困人员手机信号定位被人们重视起来,卫星导航定位手机信号的分析结果十分重要。本文提出基于卫星导航的震后被困人员手机信号定位分析方法。通过实验分析,在地震废墟地形中测试手机接收信号强度指示值(RSSI)与手机信号发射强度,判断方法手机信号定位能力。实验结果证明,本文提出方法该系统可以对大范围的手机进行搜寻定位,信号来源方向较为稳定。本文所提出方法还能够为地震领域在未来的研究中提供一定的参考意见。

参考文献(References)

[1] 唐诗洋,疏学明,申世飞,等.基于伪基站的地震废墟人员搜寻

定位技术[J].清华大学学报:自然科学版,2016(12):1278-1283.

TANG Shiyang, SHU Xueming, SHEN Shifei, et al. Earthquake Ruin Personnel Search And Location Technology Based on Pseudo Base Station[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2016(12): 1278-1283.

[2] 周德山,韩文功,李振春,等.基于相对走时计算的地面微地震监测 SET 定位算法[J].地球物理学进展,2016,31(6):2495-2500.

ZHOU Deshan, HAN Wengong, LI Zhenchun, et al. Source Location Method for Surface Microseismic Monitoring Based on Relative Traveltime Calculation[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2495-2500.

[3] 王纪程,陈祖斌,江海宇,等.基于极快速模拟退火与网格逐次剖分的微地震定位算法[J].科学技术与工程,2017,17(33):248-252.

WANG Jicheng, CHEN Zubin, JIANG Haiyu, et al. Based on Successive very Fast Simulated Annealing and the Grid Subdivision of Micro Seismic Localization Algorithm Research[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 248-252.

[4] 薛艳,刘杰,宋治平,等.汶川地震前地震活动特征的普遍性及其机理探讨[J].地球物理学报,2018,61(5):1891-1906.

XUE Yan, LIU Jie, SONG Zhiping, et al. On the Universality and Mechanism Interpretation of the Seismicity Characteristics before the 2008 Wenchuan M_s 8.0 Earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(5): 1891-1906.

[5] 华建兵,吴韬,蒋敏,等.大震下村镇建筑砌体结构的抗震性能数值分析[J].地震工程学报,2017,39(1):52-57.

HUA Jianbing, WU Tao, JIANG Min, et al. Numerical Analysis of Seismic Behaviors of Masonry Structures in Village Buildings during Strong Earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 2017, 39(1): 52-57.

[6] 蔡宏,程昌玉,秦建峰,等.便携式雷达现场测试和诊断移动平台设计及应用[J].气象科技,2017,45(5):938-943.

CAI Hong, CHENG Changyu, QIN Jianfeng, et al. Design and Application of a Portable Platform for Radar Field Test and Diagnosis[J]. Meteorological Science and Technology, 2017, 45(5): 938-943.

[7] 张涛,张颖江.移动通信网络异常信号优化识别研究[J].计算机仿真,2017,34(3):309-312.

ZHANG Tao, ZHANG Yingjiang. Mobile Communication Network Anomaly Signal Optimization Identification Study[J]. Computer Simulation, 2017, 34(3): 309-312.

[8] 赵龙,高井祥,李增科,等.基于 CEEMD-Wavelet-SavGol 模型的 GPS 多路径修正算法[J].测绘通报,2017(11):1-5.

ZHAO Long, GAO Jingxiang, LI Zengke, et al. GPS Multipath Correction Algorithm Based on CEEMD-Wavelet-SavGol Model[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(11): 1-5.

[9] 尹忠刚,李国银,张延庆,等. STEKF 协同残差归一化的感应电机转速辨识方法[J].电工技术学报,2017,32(5):86-96.

- YIN Zhonggang, LI Guoyin, ZHANG Yanqing, et al. A Speed Estimation Method Based on Strong Tracking Extended Kalman Filter with Normalized Residuals for Induction Motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5):86-96.
- [10] 时盛春.地震灾后区域无人机 GPS 遥感定位技术研究[J].地震工程学报, 2018, 40(2):350-355.
- SHI Shengchun. GPS Remote Sensing Positioning Technology for Unmanned Aerial Vehicle in Post-Earthquake Area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2):350-355.
- [11] 黄丽辉.局部二值平均熵模式与深度残差网络的人群密度估计[J].科学技术与工程, 2018, 18(27):162-169.
- HUANG Lihui. A Novel Algorithm for Crowd Density Estimation Based on Entropy LBP Feature and Deep Residual Network[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(27):162-169.
- [12] 王云宏.基于 DIRECT 算法的微震震源快速网格搜索定位方法研究[J].地球物理学进展, 2016, 31(4):1700-1708.
- WANG Yunhong. Grid-Search Method on Micro-Seismic Source Fast Location Based on DIRECT Algorithm[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4):1700-1708.
- [13] 陈明, 武军郦, 高士民, 等.卫星导航定位基准站网系统测试技术分析[J].测绘科学, 2018, 43(5):143-148.
- CHEN Ming, WU Junli, GAO Shimin, et al. Technical Analysis of System Testing for Satellite Navigation Reference Stations[J]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(5):143-148.
- [14] 金星, 杨文东, 李山有, 等.一种新地震定位方法研究[J].地震工程与工程振动, 2007, 27(2):20-25.
- JIN Xing, YANG Wendong, LI Shanyou, et al. A New Seismic Location Method[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(2):20-25.
- [15] 程麦理, 李青宁, 苗如松, 等.强震作用下超高桥墩动力稳定性理论研究[J].地震工程学报, 2016, 38(3):360-365.
- CHENG Maili, LI Qingning, MIAO Rusong, et al. Theoretical Study on the Dynamic Stability of Super-High Bridge Piers under Strong Earthquakes[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(3):360-365.
- [16] 吴桐, 战兴群.基于 AD9361 射频捷变收发器的 GPS 伪卫星设计[J].电讯技术, 2019, 59(2):162-166.
- WU Tong, ZHAN Xingqun. Design of a GPS Pseudolite Based on AD9361 RF Agile Transceiver[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(2):162-166.
- [17] 黄响, 唐世阳, 张林让, 等.一种基于高效 FrFT 的 LFM 信号检测与参数估计快速算法[J].电子与信息学报, 2017, 39(12):2905-2911.
- HUANG Xiang, TANG Shiyang, ZHANG Linrang, et al. A Fast Algorithm of LFM Signal Detection and Parameter Estimation Based on Efficient FrFT[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(12):2905-2911.