

基于多源传感的输电线防碰线预警方法及装置设计

陆新宇¹, 张庆², 马李锋², 任杰², 张敏³, 魏建胜¹, 潘树国^{1*}¹东南大学仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096;²国网北京石景山供电公司, 北京 100040;³国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211106

摘要 为了解决输电线路防机械碰线实时监测的问题, 研制基于多源传感的输电线预警装置, 同时提出基于毫米波雷达与视觉融合的输电线预警算法, 并在真实场景下对算法的有效性进行验证。该预警装置首先采用基于标准差聚类的视觉识别算法对前方输电线进行检测; 其次, 通过基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法对输电线距离进行实时稳定的测量, 在视觉检测的基础上实时跟踪输电线距离; 最后, 根据视觉检测和毫米波雷达测距结果对预设的机械碰撞线条件进行实时预警判断。实验结果表明: 基于标准差聚类的视觉识别算法的有效识别距离大于 20 m, 识别精度达 93%, 输出频率为 1 Hz; 基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法的测距精度为 ± 0.1 m, 测距误差为 2%, 输出频率为 1 Hz。本装置满足对输电线路防机械碰线实时监测的整体需求。

关键词 输电线预警; 多源传感; 视觉识别; 毫米波雷达测距

中图分类号 TH89; TP23 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2412001

Early Warning Method and Device Design of Anti-Collision Line for Transmission Line Based on Multi-Source Sensing

Lu Xinyu¹, Zhang Qing², Ma Lifeng², Ren Jie², Zhang Min³, Wei Jiansheng¹, Pan Shuguo^{1*}¹School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;²State Grid Beijing Shijingshan Power Supply Company, Beijing 100040, China;³Guodian Nanrui Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China

Abstract This study develops a transmission line warning device based on multi-source sensing to address the problem of real-time transmission line monitoring against mechanical collision. It also proposes a transmission line warning algorithm based on millimeter wave radar and visual fusion, and the algorithm's effectiveness is verified in a real scene. First, the front transmission lines were detected using a vision recognition algorithm based on standard deviation clustering. Second, a millimeter wave radar ranging algorithm based on an improved robust Kalman filter was used to measure the transmission line distance in real time, while visual detection was used to track the transmission line distance in real time. Finally, real-time warning and judgment for the preset mechanical collision line conditions were conducted based on the above visual detection and millimeter wave radar ranging results. The experimental results show that the visual recognition algorithm based on standard deviation clustering has an effective recognition distance of more than 20 m, a recognition accuracy of 93%, and an output frequency of 1 Hz, whereas the millimeter-wave radar ranging algorithm based on improved robust Kalman filter has a ranging accuracy of ± 0.1 m, a ranging error of 2%, and an output frequency of 1 Hz. This device can meet the overall demand for real-time monitoring of transmission lines against mechanical collisions.

Key words transmission line warning; multi-source sensing; visual recognition; millimeter wave radar ranging

1 引言

输电线路是保证电力正常输送的通道, 同样也是

电网公司最为重要的资产之一。随着我国经济的快速发展, 各行各业对电力供应的质量和可靠性都提出了更高的要求, 输电线路的密度越来越高, 有些甚至绵延

收稿日期: 2021-09-10; 修回日期: 2021-10-22; 录用日期: 2021-10-27

基金项目: 国网北京市电力公司科技项目(52020620002N)

通信作者: *psg@seu.edu.cn

几十至上百千米。仅在 2016—2020 年,电网新增的电压为 110 kV 及以上的线路就达 40.1 万千米。高压输电线路所处的地理位置和周围环境条件比较特殊,高压输电线路具有分布面积大、难以维护等特点^[1],并且常年暴露在野外,除了要遭受众多恶劣自然天气的侵袭,各种违法、违章行为带来的输电线路设备的短路、倒杆、倒塔、停电等外力破坏事故也呈逐年上升的趋势,例如吊车等大型机械或特种作业车在输电线下方进行施工时导致输电线路短路等。种种事故的发生对输电线路、电网运行及人民的生命财产安全均构成了极大的威胁^[1-2]。

近年来,国内外在该方面也已有不少研究成果。蔡骏峰等^[3]研究并发明了起重机防触电报警系统,该系统能够通过测量电场强度保障施工安全。聂鹏飞等^[4]提出了一种基于差分传导电流的工频电场传感器设计方法,并完成了基于此方法的工频电场传感器的样机研制和标定工作,该传感器能适用于对高压交流输电线路周边工频电场的测量,具有较好的线性度和测量准确性。深圳特力康科技有限公司生产的高压架空线静电报警器^[5]是一种适合大型设备的非接触智能报警装置,主要应用于高空施工、吊车、起重机械上,该装置只对电压为 220 V 以上的 50~60 Hz 电流频率部分进行输电线安全距离监测预警。电网公司研发的基于毫米波雷达的诸多输电线测距系统虽然可以进行输电线路距离的测量,但无法实时监测并预警^[6-11]。另外还有以视频监控为主的智能管控系统,全天候不间断对视频进行实时分析并在线预警输电线路附近的施工状况,但该系统需要专职人员 24 小时看护,费人费时

费力,且全靠肉眼判断施工车辆与输电线路的距离,准确度大大降低^[12]。综上,应用于输电线安全距离测量和预警的技术已有逐步的研究和应用,但依赖单一传感器,抗干扰能力差,且对高压输电线路及多电压等级情况缺乏研究,因此现在亟需一种新型的能够解决输电线路防机械碰线实时监测问题的方法。

本文提出基于毫米波雷达与视觉融合的输电线预警算法,研制基于多源传感的输电线预警装置,在实时跟踪输电线路的基础上,准确且稳定地测量出机械设备与输电线的距离,同时通过实验验证了装置的有效性和鲁棒性。

2 装置硬件设计

2.1 平台搭建

针对单一传感器抗干扰能力较差的问题,本装置采用多源传感的方案。图 1 为本装置的硬件平台,该装置主要由三个模块组成,包括毫米波雷达测距模块、视觉识别模块和信号集成模块。其中毫米波雷达测距模块包括一个毫米波雷达传感器,视觉识别模块包括一个相机,信号集成模块包括一个 WIFI 接收机和一个移动终端。装置硬件平台如图 1(a) 所示。

其中,视觉识别模块将相机拍摄的图像通过 WIFI 接收机传入移动终端,采用基于标准差聚类的视觉识别算法对前方输电线进行检测。毫米波雷达测距模块通过基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法以 1 Hz 的频率实时输出输电线路的距离和方位角信息,并通过 WIFI 接收机将信息传入移动终端。最后在移动终端融合数据并进行预警和判断。

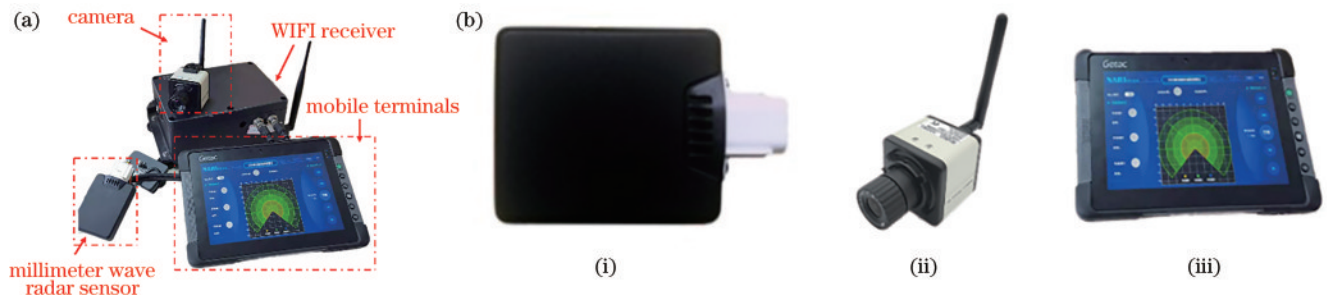


图 1 装置硬件。(a) 装置硬件平台;(b) 装置硬件的实物图

Fig. 1 Device hardware. (a) Device hardware platform; (b) physical pictures of device hardware

2.2 硬件选型

2.2.1 毫米波雷达选型

选取的毫米波雷达传感器型号为 SR73F,如图 1(b)的(i)所示。该传感器采用具有高复杂度的 FMCW 调制模式,利用发射的无线电波与回波的差准确地测量目标距离、速度、角度等相关信息^[13-16]。SR73F 体型小巧(96 mm×58 mm×24 mm),测距范围为 0.2~40 m,测距精度为±0.1 m,测角范围为 0~120°,测角精度为±0.5°,功耗为 2.5 W,操作温度为

-40~85 °C。

2.2.2 相机选型

选取的相机为一款 4K 网络高清摄像头,如图 1(b)的(ii)所示,该相机可以在室外曝光逆光强光下拍摄,满足室外场景下识别输电线路的要求。该相机的最小分辨率为 640×360,最大分辨率为 2592×1944,帧率为 1~30 frame/s 且可调,可适应最高 65 °C 的工作环境,视角范围为 20°,最大拍摄距离大于等于 20 m,可满足输电线路远距离拍摄要求。

2.2.3 移动终端选型

选取的移动终端如图 1(b)的(iii)所示,采用 Intel (R) Atom(TM)x7-Z8750 处理器,机带 4 GB 大小的 RAM,支持 64 位操作系统,能够满足数据存储和算法运行的要求。

3 装置系统研发

3.1 总体设计方案

本方案共包含两个部分:基于标准差聚类的输电线识别算法、基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法。图 2 为本装置进行一次预警的算法流程图。

在基于标准差聚类的输电线识别算法中,针对毫

米波雷达可能出现误测的问题,首先将相机拍摄的雷达前方视图传入移动终端,接着采用基于 Canny 边缘检测与 Hough 变换结合的直线检测算法和基于标准差聚类的输电线识别算法对输电线进行检测。

在基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法中,针对雷达多点多帧返回、输出不稳定、受环境干扰较大等问题,在获取其返回数据时,利用基于时间域的有效目标距离最小值提取算法滤除异常值;其次对持续输出的数据进行抗差卡尔曼滤波处理,实现数据平滑,提高系统的抗粗差干扰能力。在实时跟踪输电线的基础上,基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法准确且稳定地测量出机械设备与输电线的距离,并根据相应预警条件进行预警。

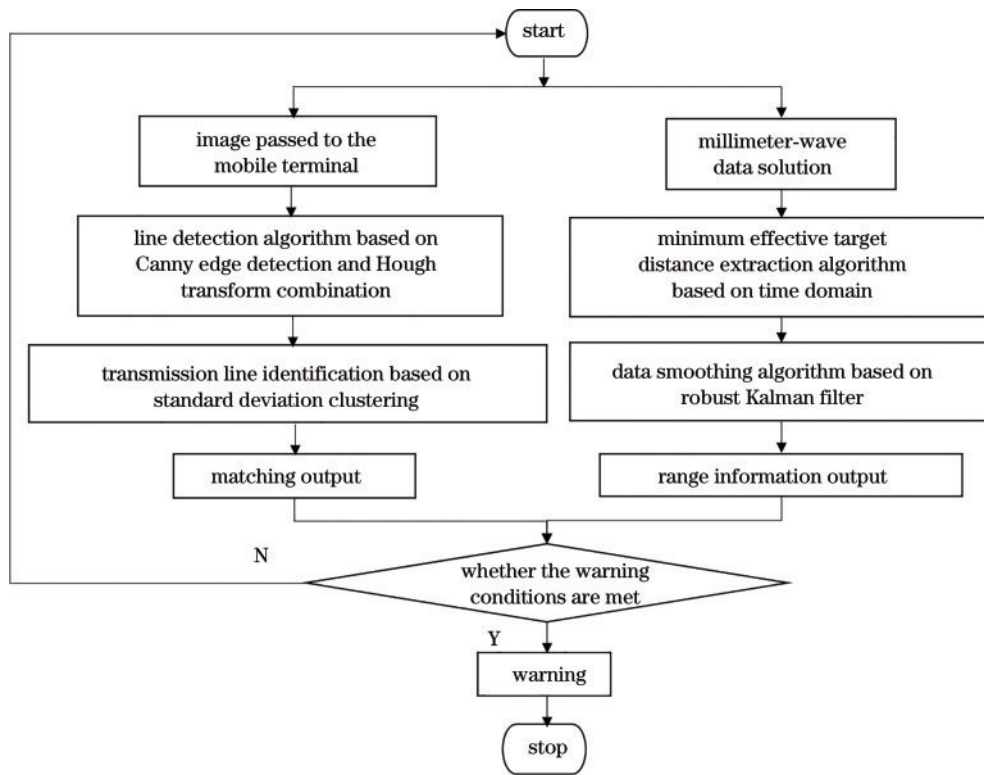


图 2 装置算法流程

Fig. 2 Flowchart of device algorithm

3.2 基于标准差聚类的输电线识别算法

基于标准差聚类的输电线识别算法的流程如图 3 所示。当输电线路在雷达的视角范围内时,雷达可以

实时跟踪输电线路,但当雷达意外对准别的目标物时,测距结果无效。因此利用相机拍摄雷达前方图像,经过算法处理后粗略计算出图像中输电线存在的概率。

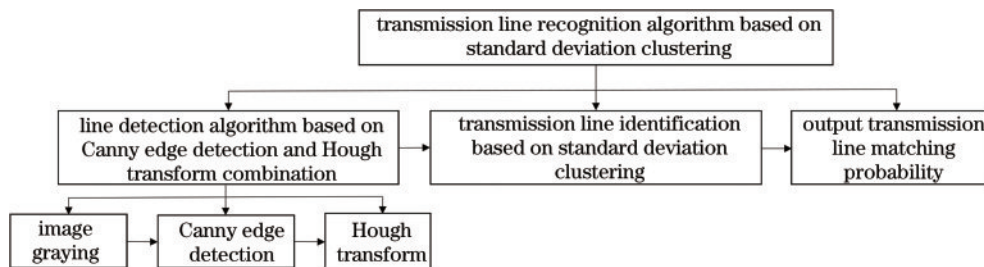


图 3 基于标准差聚类的输电线识别算法的流程

Fig. 3 Flowchart of transmission line identification algorithm based on standard deviation clustering

3.2.1 基于 Canny 边缘检测与 Hough 变换结合的直线检测算法

要识别出图像中的输电线,首先利用 Hough 变换检测出图像中的直线,该过程包括三个步骤:图像灰度化、图像二值化、Hough 变换。

采用加权平均法进行图像灰度化;图像二值化中,选用 Canny 边缘检测获取二值图像^[17];Hough 变换过程中,利用图像空间和 Hough 参数空间的线-点对偶性,找到所有边缘点在 Hough 空间中对应的曲线,以此进行直线的检测^[18-21]。

3.2.2 基于标准差聚类的输电线识别

Hough 变换只可以检测出图像中的直线,无法识别出真正的输电线。考虑到输电线路平行分布的规律,且作业环境大多空旷,无屋檐等线状干扰物,因此提出基于标准差聚类的输电线识别算法。

首先计算检测出来的直线相对于水平线的角度,

接着求出角度的标准差,公式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n}, \quad (1)$$

式中: σ 表示角度的标准差; x_i 表示检测到的直线的角度; \bar{x} 表示角度的平均值; n 表示检测到直线的数量。倘若标准差较小,则说明检测到直线为输电线的概率较大;反之,则说明检测到直线为输电线的概率较小。

3.3 基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法

基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法的流程如图 4 所示。本装置使用的雷达有多点多帧返回、输出不稳定、受环境干扰较大等问题,考虑到施工场景环境的空旷性和机械设备运动的缓慢性,提出对一段时间内的测距最小值进行提取并作为最终距离值的方法(根据经验值设置时间域为 1 s),即在雷达测到的众多目标信息中,通过处理得到一个最终距离值,以 1 Hz 的频率输出。

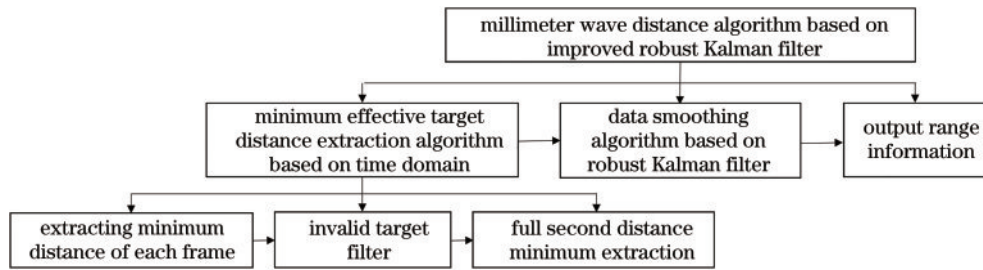


图 4 基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法的流程

Fig. 4 Flowchart of millimeter wave radar ranging algorithm based on improved robust Kalman filter

3.3.1 基于时间域的有效目标距离最小值提取算法

1) 每帧距离最小值提取

如图 5 所示,SR73F 毫米波雷达每 30 ms 传来一帧数据,每一帧数据内含有小于等于 10 组雷达与目标物之间的距离信息。首先提取每一帧数据中距离值最小的目标,并将其距离值输出,达到初步提高算法稳定性的目的,将该距离值定义为 d_{\min}^j ,表达式为

$$d_{\min}^j = \min \{ d_1^j, d_2^j, \dots, d_m^j \}, m \leq 10, j \approx 30, \quad (2)$$

式中: j 表示 1 s 内的雷达接收到的第 j 帧数据; m 表示该帧数据中雷达检测到的目标物个数; d_m^j 表示第 j 帧

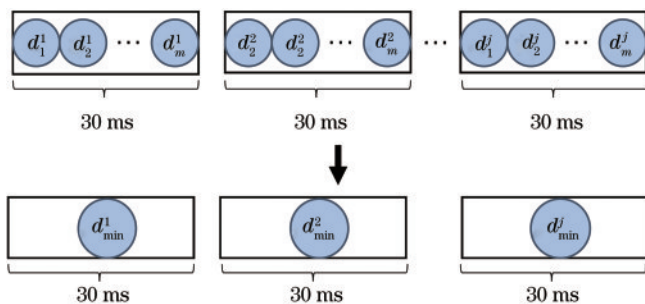


图 5 每帧距离最小值提取示意图

Fig. 5 Schematic of extracting the minimum distance of each frame

数据的第 m 个目标物的距离值; d_{\min}^j 表示从第 j 帧数据检测到的距离最小值。

2) 无效目标滤除

考虑到雷达会时不时探测到异常值而导致输电线跟踪出现误差,因此提出了一种滤除无效目标的方法。对雷达接收到的每一帧数据都如步骤 1) 一样进行处理,当时间达 1 s 后,即输出的每帧距离最小值达 30 个左右后,进行无效目标的判断与滤除。将毫米波雷达中的异常值分为两种情况^[22]:空目标信息,当毫米波雷达前方未探测到目标物,此时没有数据输出,于是将 d_{\min}^j 设置为 1000 m,方位角设置为 0° ,并输出;无效目标信息,将毫米波雷达运动中出现在雷达与输电线间的目标物定义为无效目标,此时输出的结果会对输电线距离跟踪带来影响,需要滤除。无效目标的判定规则如下:当前后两帧输出的距离最小值变化大于 0.3 m 时,即 1 s 内的距离变化大于 4 m 左右,认为测到了无效目标;当前后两帧输出的方位角变化大于 20° 时,认为测到了无效目标。

$$\begin{cases} |d_{\min}^{j+1} - d_{\min}^j| \geq 0.3 \text{ m} \\ |a^{j+1} - a^j| \geq 20^\circ \end{cases}, \quad (3)$$

式中: d_{\min}^{j+1} 和 d_{\min}^j 表示前后两帧输出的距离最小值; a^{j+1} 和 a^j 表示前后两帧距离对应的方位角。当前后

两帧的输出值满足式(3)中任意一个条件时,就暂定出现了无效目标。如图 6 所示,处理空目标时,将距离值赋为 1000 m,方位角赋为 0°并输出,表示未探测到任何目标物的距离信息。处理无效目标时,需考虑其出现的时间长短,本文以雷达探测 1 s 内的距离最

小值作为输出,基于机械设备缓慢运动的特性,若该无效目标在雷达探测区域持续出现 0.5 s 以上,即连续出现 15 帧及以上,则将该无效目标定义为有效目标,需输出其距离值并判断预警,反之则滤除该目标。

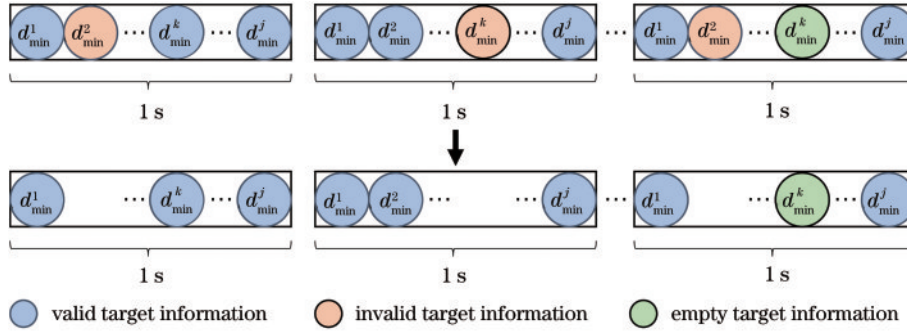


图 6 无效目标滤除示意图

Fig. 6 Schematic of invalid target filtering

3) 整秒距离最小值提取

如图 7 所示,当处理完一包数据(1 s)中的无效目标后,对 1 s 内保留的有效目标对应的距离值进行比较,提取出 1 s 内雷达检测到的最小距离,并作为最终

值 D'_{min} 输出。

$$D'_{min} = \min \{d_{min}^1, d_{min}^2, \dots, d_{min}^j\}, j \approx 30, t \geq 1, \quad (4)$$

式中: d_{min}^j 表示 1 s 内从第 j 帧检测到的有效目标物的距离最小值; D'_{min} 表示第 t 秒内的最终距离值。

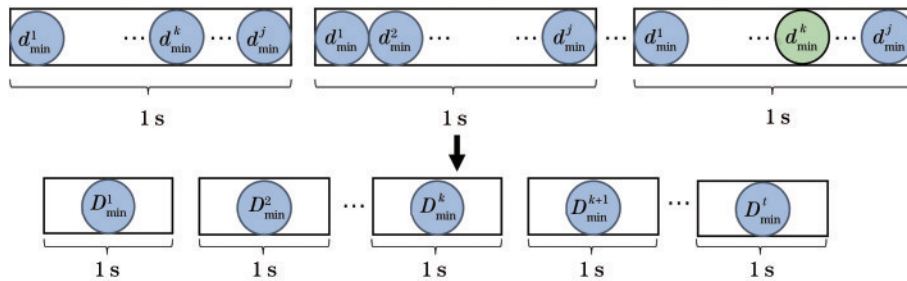


图 7 整秒距离最小值提取示意图

Fig. 7 Schematic of extracting the minimum distance of the whole second

3.3.2 基于抗差卡尔曼滤波的数据平滑算法

对 3.3.1 节连续输出的数据进行卡尔曼抗差滤波处理,以实现数据的平滑,从而提高系统的抗粗差干扰能力^[23-24]。采用三段法的 IGG III 方案的等价权函数,等价权函数 \bar{P}_k 的初值设定为 R , R 为观测误差方差矩阵。由于本文不含多维变量,因此所有的矩阵都是一维的。

采用三段法的观测误差方差矩阵 R 的表达式为

$$R = \begin{cases} R, & |\bar{V}_s| \leq k_0 \\ R / \left[\frac{k_0}{|\bar{V}_s|} \times \left(\frac{k_1 - |\bar{V}_s|}{k_1 - k_0} \right)^2 \right], & k_0 < |\bar{V}_s| \leq k_1, \quad (5) \\ R + c, & |\bar{V}_s| \geq k_1 \end{cases}$$

式中: R 为权元素; k_0 和 k_1 为常量,通常 $k_0 = 1.0 \sim 1.5$, $k_1 = 2.5 \sim 8.0$; \bar{V}_s 为标准化残差,且 $\bar{V}_s = V_s / \sigma_0$,其中 V_s 为观测残差, σ_0 为方差因子,该值可以

根据 $\sigma_0 = \text{med} \{ \sqrt{q_v}, v_s \} / 0.6745$ 求得, q_v 是权倒数。当观测值小于一定范围时,其观测误差方差值不变;当观测值超出一定范围,并保持在一定阈值中时,根据观测值大小适当改变观测误差方差值,从而降低权重;当观测值出现明显异常时,将观测误差方差值放大,从而大大降低权重。

3.4 装置预警条件

在实时稳定跟踪输电线路的条件下,毫米波雷达若返回距离小于等于安全距离,则装置进行预警,具体预警条件如表 1 所示。

表 1 装置预警条件
Table 1 Early warning condition of device

Voltage grade	≤ 1 kV	1-10 kV	35-110 kV	154-220 kV	350-500 kV
Safe distance	4 m	6 m	8 m	10 m	15 m

4 实 验

分别针对视觉识别模块和毫米波测距模块进行实验和数据分析,最后将二者结合,对装置的可行性进行验证。

4.1 输电线视觉识别

基于标准差聚类的输电线识别算法包括几个步骤:图像灰度化、Canny 边缘检测、Hough 变换直线检测、基于标准差聚类的输电线匹配度计算。经过多次实验发现:将 Canny 边缘检测中双阈值筛选的高低阈值分别设为 0 光度和 100 光度;将 Hough 变换中的距离精度设为 1 pixel,角度精度设为 1°,最低线段的长度设为 120 pixel,累加平面的阈值参数设为 30 pixel,同一行点与点之间连接起来的最大距离设为 5 pixel,此时的直线检测效果最佳。同时经过测试,根据实际情况

对比并观察标准差的大小,将检测到输电线的概率分为五个等级:

$$p = \begin{cases} 90\%, & 0 \leq \sigma \leq 10 \\ 70\%, & 10 < \sigma \leq 20 \\ 50\%, & 20 < \sigma \leq 30 \\ 30\%, & \sigma > 30 \\ 10\%, & \text{no line detected} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: p 表示检测到输电线的概率; σ 表示直线角度的标准差。当 σ 分别在 $[0, 10]$ 、 $(10, 20]$ 、 $(20, 30]$ 、 $(30, +\infty)$ 这4个区间时,认为检测到输电线的概率分别为90%、70%、50%、30%;当在图片中未检测出直线时,认为 $p = 10\%$ 。经多次实验发现,当 $p \geq 70\%$ 时,输电线识别效果较好,认为毫米波雷达前方所测目标为输电线。测试结果如图8所示,绿线为检测线。

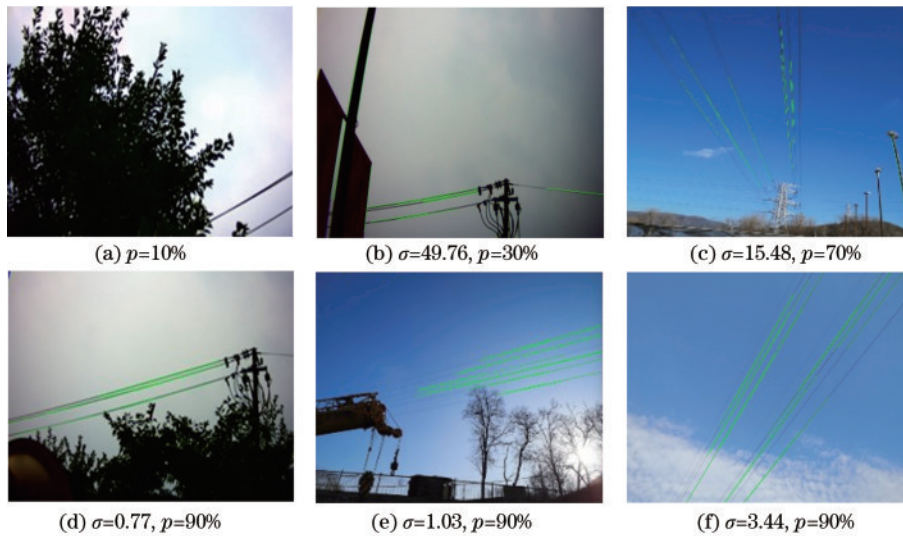


图8 基于标准差聚类的输电线识别结果

Fig. 8 Transmission line identification results based on standard deviation clustering

图8(a)中,干扰物遮挡严重,未检测出输电线, $p = 10\%$;图8(b)中,有干扰物遮挡,且干扰物呈线状,此时认为前方存在输电线的概率很低, $p = 30\%$;图8(c)中,视场简洁,但由于视角问题,输电线间存在夹角, $p = 70\%$,此时认为前方存在输电线;图8(d)和图8(e)中,均存在干扰物遮挡,但形状干扰较小,此时认为前方存在输电线,且概率较大, $p = 90\%$;图8(f)中,视场简洁且输电线分布规律,此时认为前方存在输电线,且概率较大, $p = 90\%$ 。实验中采用识别精度 P 作为输电线识别准确度的指标,其定义为

$$P = \frac{n'}{N}, \quad (7)$$

式中: N 为算法检测出存在输电线的图片数量; n' 为真实存在输电线的图片数量。检测结果表明:当视场中出现明显输电线,即使存在干扰物,算法也能够进行准确识别;当干扰物形状呈线状时,识别精度降低,但由

于机械设备真实工作环境较为空旷且视场简洁,此情况可大大减少。多次实验计算得到,基于标准差聚类的输电线识别算法的识别精度可达93%左右。

4.2 毫米波雷达测距

选取一处类似实际施工环境的场景(如图9所示)进行实验,对比预警算法处理前后的结果,验证算法的可行性。该实验分为静态实验、动态实验,动态实验分为垂直运动实验、水平运动实验,以此模拟施工车辆的运动情况。根据测量,输电线离地高度约为11.22 m。以1 Hz的频率输出输电线的距离,采样点数作为横坐标,所测距离作为纵坐标进行数据汇总。

4.2.1 静态实验与数据分析

将雷达静置于输电线下方,如图10所示,与此同时记录雷达与输电线的距离信息。

图11分别为预警算法处理前后雷达返回目标距离的分布对比。表2为预警算法处理前后雷达返回



图 9 实验环境

Fig. 9 Experimental environment

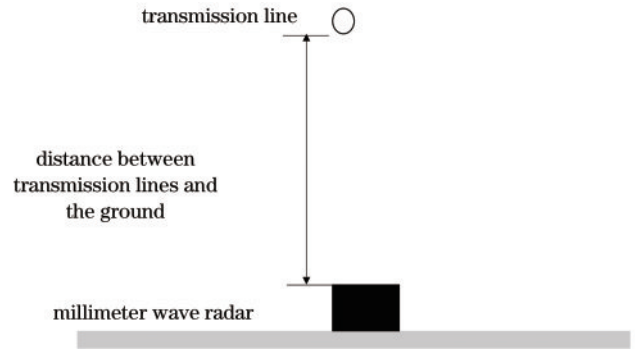


图 10 静态实验示意图

Fig. 10 Schematic of static experiment

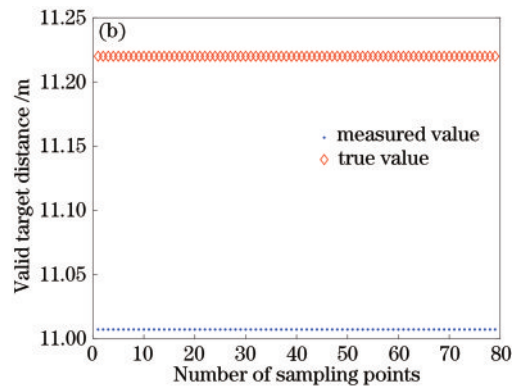
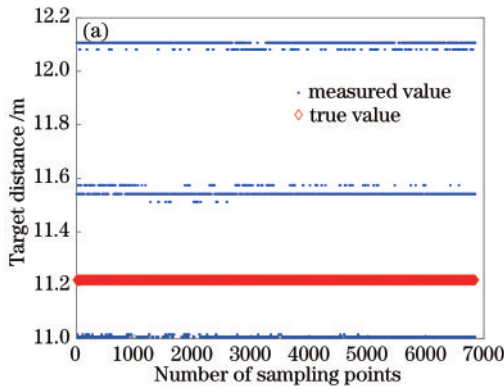


图 11 静态实验数据。(a)原始数据;(b)测距算法处理后的数据

Fig. 11 Static experimental data. (a) Original data; (b) data processed by the ranging algorithm

表 2 静态实验算法处理前后的数据分析

Table 2 Data analysis before and after algorithm processing in static experiment

Parameter	Original data	Final data
Mean distance/m	11.5817	11.0073
Distance variance /m	0.1892	0.0000

目标物距离的均值与方差对比。

图 11 中,真值表示与雷达相距最近的输电线距离,即理想状态下雷达返回的距离,测量值表示雷达返回的所有目标物距离。图 11(a)中,返回了雷达测到的所有目标物距离,信息杂乱无章,且数据有较大干扰,与真值相差大,无法直接应用于预警算法。图 11(b)中,在经过预警算法处理后,距离趋于稳定,测量值为 11.0073 m,真值为 11.22 m(利用毫米级精度的激光

测距仪测得),误差在 2% 左右,精度较高。表 2 中,通过计算雷达返回距离的均值与方差,发现算法处理后的结果稳定性得到了提高,算法可行性得到了验证。

4.2.2 动态实验与数据分析

动态实验中,首先将雷达托举于实验人员头顶,垂直运动中,如图 12(a)所示,实验人员在输电线下方托着雷达做上下蹲起运动;水平运动中,如图 12(b)所示,实验人员晃动手臂使得雷达约呈水平移动,与此同时记录雷达与输电线的距离信息。

图 13 和图 14 分别为垂直动态实验和水平动态实验下,预警算法处理前后雷达返回目标物距离的分布对比。

同 4.2.1 节的实验结果相似,图 13(a)和图 14(a)中返回了雷达测到的所有目标物距离,信息杂乱无章,

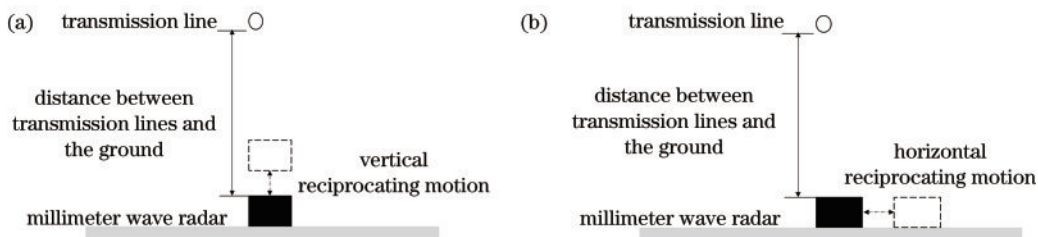


图 12 动态实验示意图。(a)垂直运动;(b)水平运动

Fig. 12 Schematic of dynamic experiment. (a) Vertical reciprocating motion; (b) horizontal reciprocating motion

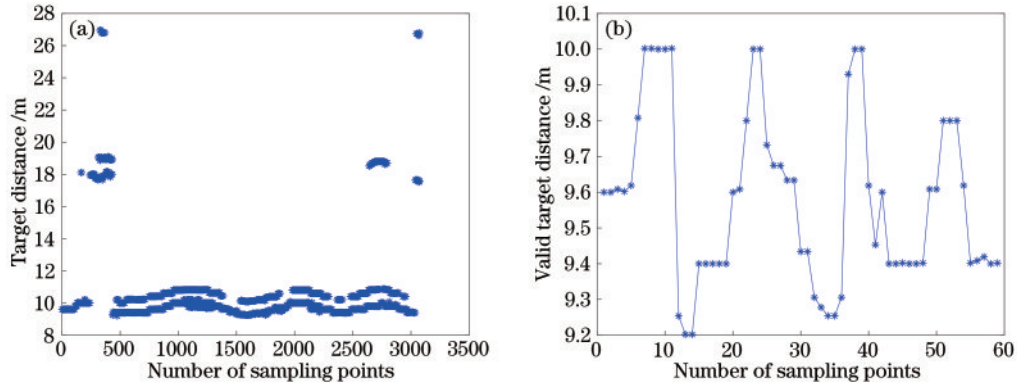


图 13 垂直动态实验数据。(a)原始数据;(b)测距算法处理后的数据

Fig. 13 Vertical dynamic experimental data. (a) Original data; (b) data processed by the ranging algorithm

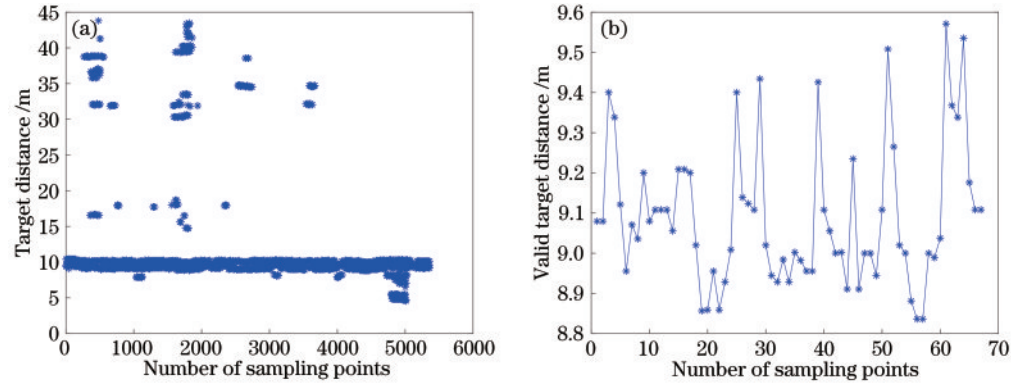


图 14 水平动态实验数据。(a)原始数据;(b)测距算法处理后的数据

Fig. 14 Horizontal dynamic experimental data. (a) Original data; (b) data processed by the ranging algorithm

且数据干扰大,无法直接应用于预警算法。图 13(b)和图 14(b)中,在经过基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法处理后,距离趋于稳定,且干扰点被滤除。图 13(b)的距离近似呈正弦函数波动,图 14(b)的距离近似呈三角函数波动,符合垂直和水平动态运动规律。由于雷达是托举于实验人员头顶进行运动的,故距离值相较于静态实验时降低 1.7 m 左右,因此输电线相对距离测量准确。由上可知,输电线距离信息跟踪良好,测距算法可行性得到了验证。

4.3 整体测试

将视觉识别与毫米波测距融合在一起进行动态实时检测,以此来验证系统的可行性。本实验模拟真实场景,将毫米波雷达与相机放置同一处,进行从左至右再至左的扇形运动,如图 15(a)所示,同时观察并记录毫米波雷达测距和视觉识别百分比概率的变化,并进行结果分析。

如图 15(b)所示,本实验以从左至右再至左为 1 个周期,共进行了 2 个周期的移动,由于毫米波雷达的视

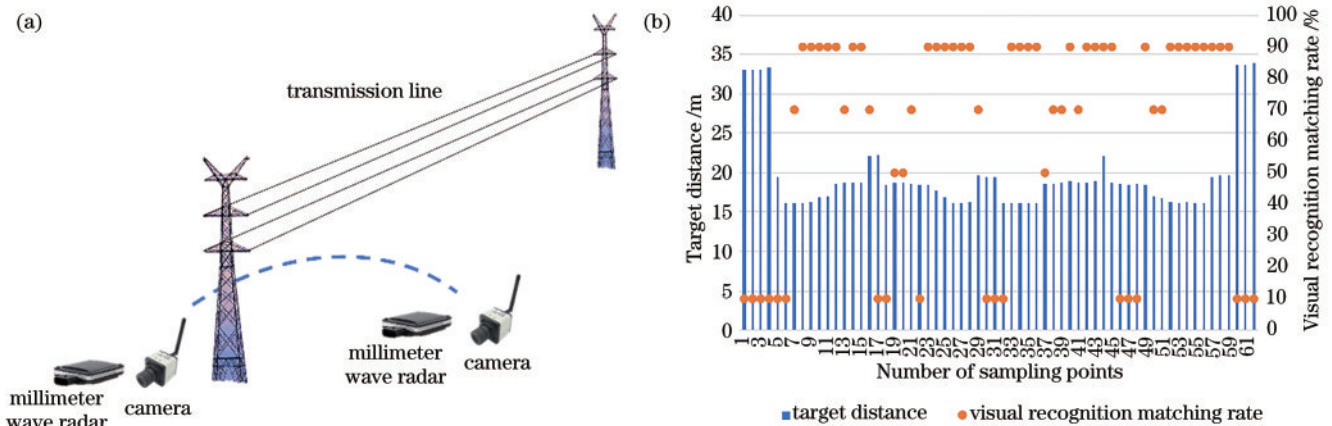


图 15 毫米波雷达测距与视觉识别融合实验。(a)融合示意图;(b)实验数据分析

Fig. 15 Fusion experiment of millimeter wave radar ranging and visual recognition. (a) Fusion diagram; (b) analysis of experimental data

角范围为 30° , 相机的视角范围为 20° , 当测量开始时, 雷达会率先返回目标物距离, 且该目标物非输电线, 视觉识别的匹配率为 10% 。当输电线路进入雷达的视角后, 返回的距离为雷达至输电线的距离, 此时相机视角内还未出现输电线, 匹配率为 10% 。当输电线进入相机视角后, 雷达与相机均在探测输电线路, 此时雷达实时跟踪并返回输电线的距离, 相机返回的输电线匹配度为 70% 或 90% , 符合实际情况。当雷达和相机继续向右移动时, 输电线慢慢离开相机视角, 匹配度变为 10% , 而由于雷达视角略大, 因此仍可以测得输电线的距离。至此, 0.5 个周期结束, 观察图 15(b) 可知, 另外 1.5 个周期也符合上述的变化规律。

在运动过程中, 如第 19, 20, 22, 37 个采样点, 匹配度会产生 50% 和 10% 的突变, 第一个可能原因是相机视场内出现树叶或线状干扰物遮挡, 导致概率降低; 第二个可能原因是手部的抖动, 相机从视频流中截取的图像产生畸变, 影响了识别的稳定性。在实际场景中, 吊臂的运动较为缓慢且更稳定, 因此可以较好地降低类似异常值, 从而保证系统的鲁棒性。

5 结 论

为了解决输电线路防机械碰线实时监测的问题, 提出基于多源传感的输电线防碰线预警方法, 设计了预警装置。该预警装置首先采用基于标准差聚类的视觉识别算法对前方输电线进行检测; 其次, 通过基于改进抗差卡尔曼滤波的毫米波雷达测距算法对输电线距离进行实时稳定的测量, 在视觉检测的基础上实时跟踪输电线距离; 最后, 根据视觉检测和毫米波雷达测距结果对预设的机械碰线条件进行实时预警判断。对该装置及算法开展了实验, 装置的可行性得到了较好的验证。

参 考 文 献

- [1] 成焕顺. 新形势下输电线路防外破管理模式探索[J]. 电子世界, 2020(11): 25-26.
Cheng H S. Exploration on management mode of transmission line anti external damage under new situation [J]. Electronics World, 2020(11): 25-26.
- [2] 郭圣, 曾懿辉, 张纪宾, 等. 输电线路防外力破坏智能监控系统的应用[J]. 广东电力, 2018, 31(4): 139-143.
Guo S, Zeng Y H, Zhang J B, et al. Application of intelligent monitoring system for external force damage prevention for transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 139-143.
- [3] 蔡骏峰, 汤胜, 严涛. 基于电场测量的起重机防触电报警系统[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(5): 177-180.
Cai J F, Tang S, Yan T. Electric shock-proof alarming system of crane based on field measurement[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(5): 177-180.
- [4] 聂鹏飞, 崔勇, 袁海文, 等. 一种基于差分传导电流原理的工频电场传感器[J]. 测控技术, 2015, 34(1): 1-3, 7.

- Nie P F, Cui Y, Yuan H W, et al. Power frequency electric field sensor based on the principle of difference conduction current[J]. Measurement & Control Technology, 2015, 34(1): 1-3, 7.
- [5] 徐伟玲. 变电运维现场作业安全防护及监控技术研究与应用[J]. 通讯世界, 2019, 26(2): 164-165.
Xu W L. Research and application of safety protection and monitoring technology for on-site operation and maintenance of substation[J]. Telecom World, 2019, 26(2): 164-165.
- [6] 梁华贵, 许义, 朱先启, 等. 基于毫米波雷达的输电线路树测距系统[J]. 电气技术与经济, 2019(4): 16-18.
Liang H G, Xu Y, Zhu X Q, et al. Line tree ranging system of transmission line based on millimeter wave radar[J]. Electrical Equipment and Economy, 2019(4): 16-18.
- [7] 熊超英, 乔卫东, 章荣星, 等. 一种测量吊车吊臂与运行中超高压输电线安全距离的方法: CN101825666A [P]. 2010-09-08.
Xiong C Y, Qiao W D, Zhang R X, et al. Method for measuring safety distance between suspension arm of crane and running super high voltage transmission line: CN101825666A [P]. 2010-09-08.
- [8] 陈岸, 王干军, 廖鹏, 等. 一种输电线安全距离测量方法、计算机设备和存储介质: CN111798507A [P]. 2020-10-20.
Chen A, Wang G J, Liao P, et al. A safe distance measurement method, computer equipment and storage medium for transmission lines: CN111798507A [P]. 2020-10-20.
- [9] 曹浩楠, 王彬, 邹国平, 等. 基于输电线路电磁场分布的无人机测距适应性研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(3): 65-70.
Cao H N, Wang B, Zou G P, et al. Research on adaptability of UAV distance detection based on electromagnetic field distribution of power transmission lines[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(3): 65-70.
- [10] 周年荣, 魏杰, 唐立军, 等. 常亚东输电线距离检测方法、装置及系统: CN106646482A [P]. 2017-05-10.
Zhou N R, Wei J, Tang L J, et al. Distance detection method, device and system of changyadong transmission line: CN106646482A [P]. 2017-05-10.
- [11] 徐振磊, 曾懿辉, 郭圣, 等. 基于图像识别技术的输电线路智能监控系统应用[J]. 计算机系统应用, 2020, 29(1): 67-72.
Xu Z L, Zeng Y H, Guo S, et al. Application of intelligent monitoring system for transmission lines based on image recognition technology[J]. Computer Systems & Applications, 2020, 29(1): 67-72.
- [12] 梁煜. 基于毫米波雷达的汽车变道辅助系统研发[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
Liang Y. Research and development of lane change assistant system based on millimeter wave radar[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [13] 陈嘉成. FMCW 雷达系统信号处理算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
Chen J C. Research on signal processing in the FMCW

- radar system[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [14] 吴荣焯, 金钻, 钟停江, 等. 基于毫米波雷达的车辆测距系统[J]. 汽车实用技术, 2019(2): 33-35.
Wu R L, Jin Z, Zhong T J, et al. Vehicle ranging system based on millimeter wave radar[J]. Automobile Applied Technology, 2019(2): 33-35.
- [15] 郭蓬, 郭剑锐, 戎辉, 等. 毫米波雷达研究现状及其测试项目[J]. 汽车电器, 2018(10): 33-35.
Guo P, Guo J R, Rong H, et al. Research status and test items of mm wave radar[J]. Auto Electric Parts, 2018(10): 33-35.
- [16] 薛峰, 郭萍. 计算机视觉检测技术的发展及应用研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(6): 133-134.
Xue F, Guo P. The development and application of computer vision inspection technology[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(6): 133-134.
- [17] 王琦, 宋伟东, 王竞雪. 基于Hough变换的直线提取方法及改进[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(6): 214-217, 221.
Wang Q, Song W D, Wang J X. The line extraction method and improvement based on Hough transform[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(6): 214-217, 221.
- [18] 刘春阁. 基于Hough变换的直线提取与匹配[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2009.
Liu C G. Line extraction and matching based on Hough transformation[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2009.
- [19] 李亚娣, 黄海波, 李相鹏, 等. 基于Canny算子和Hough变换的夜间车道线检测[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 234-237, 242.
Li Y D, Huang H B, Li X P, et al. Nighttime lane markings detection based on Canny operator and Hough transform[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 234-237, 242.
- [20] 陈焱, 陈勇, 王丙佳, 等. 基于直线检测的车间地标线识别与拟合[J]. 轻工机械, 2020, 38(5): 62-66.
Chen Y, Chen Y, Wang B J, et al. Lane line recognition and fitting based on straight line detection[J]. Light Industry Machinery, 2020, 38(5): 62-66.
- [21] 柯振宇. 基于毫米波雷达的车辆纵向碰撞预警系统设计[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
Ke Z Y. Design of forward collision warning system based on millimeter wave radar[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [22] 王诒国, 潘孝星. 基于马氏距离的抗差卡尔曼滤波算法在组合导航中的应用[J]. 北京测绘, 2020, 34(12): 1810-1814.
Wang Y G, Pan X X. Application of robust Kalman filtering algorithm based on Markov distance in integrated navigation[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2020, 34(12): 1810-1814.
- [23] 郭瑞雪, 易梅. 基于抗差卡尔曼滤波的变形监测数据处理[J]. 四川建材, 2017, 43(7): 54-55, 68.
Guo R X, Yi M. Deformation monitoring data processing based on anti differential Kalman filter[J]. Sichuan Building Materials, 2017, 43(7): 54-55, 68.
- [24] 生仁军, 吴波, 高成发, 等. 基于抗差卡尔曼滤波的星间差分精密单点定位研究[M]//第七届全国交通工程测量学术研讨会论文集. 北京: 中国测绘学会, 2015.
Sheng R J, Wu B, Gao C F, et al. Research on precise point positioning based on robust Kalman filter[M] // Proceedings of the 7th National Symposium on Traffic Engineering Survey. Beijing: Chinese Society for Geodesy Photogrammetry and Cartography, 2015.