

文章编号: 2095-4980(2018)05-0796-06

基于图像的输电线杆塔定位技术

王 刚¹, 程庆敏², 易 琳¹, 庞文清², 钱金菊¹, 张 峰¹

(1.广东电网有限责任公司 电力科学研究院, 广东 广州 510080;
2.中国航空工业集团公司 洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 介绍了无人机电力巡检的应用背景, 结合国内外的发展现状, 提出一种新的无源定位技术——基于图像的输电线杆塔定位技术。给出了基于图像的定位算法, 同时分析了误差来源。具有高精确度定位定向系统(POS)的航摄相机能够绘制大比例尺的地形图, 绘制地形图的过程实际上是目标定位的过程。将配备有高精确度POS和高清摄像机的载机光电转塔用于无人机输电线路巡检, 完成对目标杆塔的实时定位, 定位精确度达到5 m。

关键词: 无人机; 定位; 比例尺

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0796

Location technology of transmission line tower based on image

WANG Gang¹, CHENG Qingmin², YI Lin¹, PANG Wenqing², QIAN Jinju¹, ZHANG Feng¹

(1.Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510080, China;
2.Luoyang Institute of Electro-optical Equipment of AVIC, Luoyang Henan 471009, China)

Abstract: The application background of Unmanned Aerial Vehicle(UAV) power inspection is introduced. A new passive positioning technology—image-based transmission pole tower positioning technology is put forward. An image-based positioning algorithm is proposed, while analyzing the source of error. The aerial camera with Position & Orientation System(POS) can draw large scale of the topographic map, and The process of drawing the topographic map is actually the target positioning process. Carrier photoelectric turret equipped with high-precision POS system and high-definition camera, is utilized in the UAV transmission line inspection to complete the target tower real-time positioning, with positioning accuracy of 5 m.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle; location; scale

近年来,全数字摄影测量工作站的国产化,大大推进了我国数码航空摄影测量的发展,许多数码航摄相机越来越多地用于测绘工程中,直接获取数字影像,结合现代通信技术、全球定位系统(Global Position System, GPS)差分定位、惯性导航等技术^[1],实现了航测内业许多方面的自动化^[2]。目前载机光电转塔多用于公安执法、森林防火、电力巡检等多个领域,其通常搭载了制冷型红外和高清可见光摄像机,能昼夜对目标进行监视、取证,但其并不能对目标进行定位。

基于图像的输电线杆塔定位技术一般由飞机、转塔、光电传感器(主要包括电视和红外)和定位定向系统(POS)^[3]组成。其中,电视和红外主要用于获取目标的图像信息,测绘领域的POS主要用于获取目标在惯性坐标系下的方位角和俯仰角,从而实现地面静止目标的(例如输电线杆塔)精确定位^[2]。

1 POS 系统

POS 集差分定位系统(Differential Global Position System, DGPS)技术和惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)技术于一体,可以获取移动物体的空间位置和三轴姿态信息,POS 主要包括 GPS 接收机和惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)装置两部分^[3]。

2 POS 在航空测绘中的应用

高清可见光传感器和 POS 固联在一起，航空对地拍摄的每一张相片，都由 POS 的 GPS 提供图像的精确位置信息，IMU 提供图像的精确空间姿态信息，前后 2 张相片具有一定的重叠度，将 2 张相片的 IMU、DGPS 数据和图像联合处理，可获得重叠度区域所有目标的经纬度信息，然后绘制出高精度、大比例尺的地形图^[4]，如图 1 所示。



Fig.1 A large scale schematic of UAV mapping
图 1 无人机测绘大比例尺示意图

3 POS 辅助图像定位技术在光电转塔中的应用

常规的光电吊舱只能获得目标的图像信息和吊舱坐标系下的目标角度信息，只有这些信息无法获得目标的地理位置信息。通过加装高精度的 POS，辅助光电吊舱实现目标的定位功能^[5-6]。目标的定位示意图如图 2 所示。

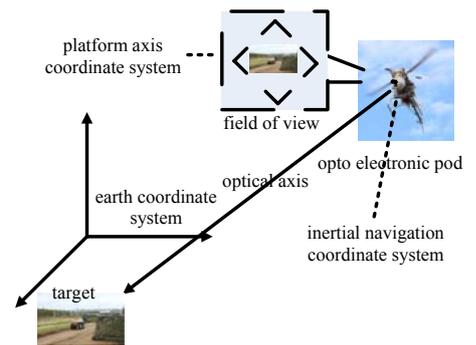


Fig.2 Target positioning diagram
图 2 目标定位示意图

3.1 硬件设计

光电吊舱内部装有高清可见光摄像机、IMU、图像板、控制板以及定位解算板，外部有 GPS 接收机、显示器和操作手柄，硬件结构示意图如图 3 所示。

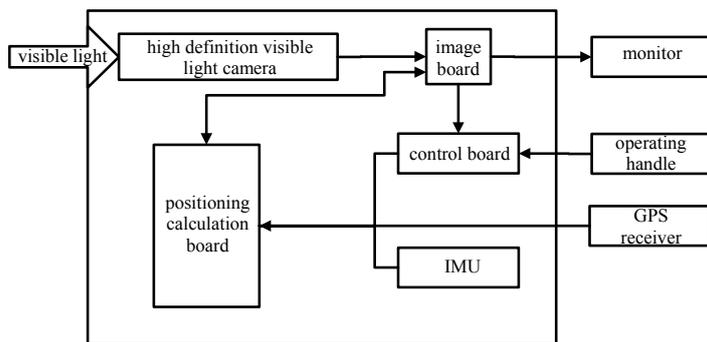


Fig.3 Hardware structure diagram
图 3 硬件结构示意图

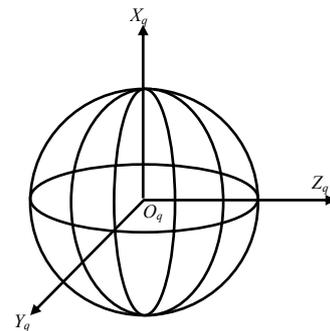


Fig.4 Earth's coordinate system
图 4 地球坐标系

3.2 定位原理

3.2.1 坐标定义

1) 地球坐标系(OXYZ)_q

地球坐标系如图 4 所示。以地球参考椭球面为基准建立，原点 O_q 位于地球质心， $O_q X_q$ 指向北极， $O_q Y_q$ 位于赤道平面与本初子午面的交线上，正向指向 0° 经度。 $O_q Z_q$ 由右手定则决定(赤道平面内指向东经 90°)。赤道以北为正纬度，范围为 $\pm 90^\circ$ ，东经为正，西经为负，经度范围为 $\pm 180^\circ$ 。任意点可表示为经纬高(大地坐标系)或 XYZ 直角坐标(空间直角坐标系)的形式。

2) 惯性导航地理坐标系(OXYZ)_e

以惯性导航器件 IMU 为原点， $O_e X_e$ 轴沿经线切线方向指向北， $O_e Y_e$ 轴指向天， $O_e Z_e$ 轴沿纬线方向指向东，如图 5 所示。

3) 惯性导航(OXYZ)_a

以惯性导航器件 IMU 为原点，由惯性导航地理坐标系(OXYZ)_e 绕 $O_e Y_e$ 轴逆时针转过航向角(φ) (惯性导航水平坐标系(OXYZ)_n)，再绕 $O_e Z_e$ 轴逆时针转过俯仰角(θ)，再绕 $O_e X_e$ 轴逆时针转过横滚角(γ) 得到，如图 6 所示。

当 IMU 三姿态角均为 0 时，惯性导航坐标系与惯性导航地理坐标系重合。

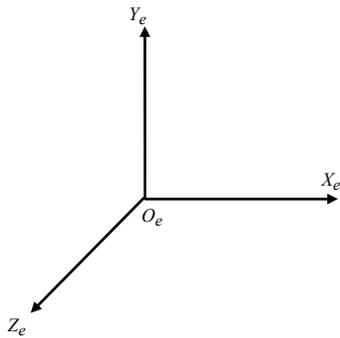


Fig.5 Inertial geographic coordinate system
图 5 惯性地理坐标系

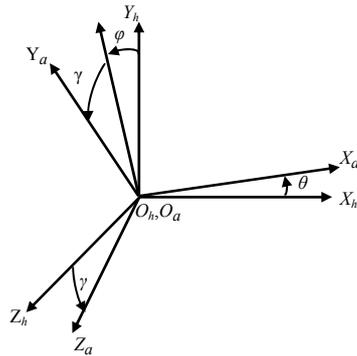


Fig.6 Inertial navigation coordinate system
图 6 惯性导航坐标系

4) 光电平台视轴坐标系(OXYZ)_s

坐标原点为光电平台成像中心(假设成像中心和 IMU 共点)。由(OXYZ)_a绕 O_aY_a轴逆时针转过视轴方位角(v),再绕 O_sZ_s轴逆时针转过视轴俯仰角(μ)得到,如图 7 所示。

因此,目标在视轴坐标系的方向向量为:[1,0,0]^T。

3.2.2 目标定位过程

首先,目标定位模型根据目标图像的像点位置计算出目标在机载光电吊舱的惯性地理坐标系;然后根据惯性地理坐标系与地球坐标系的关系计算它们之间的转换矩阵,求解目标在大地坐标系中的坐标,完成对目标的定位。其转换关系如图 8 所示。

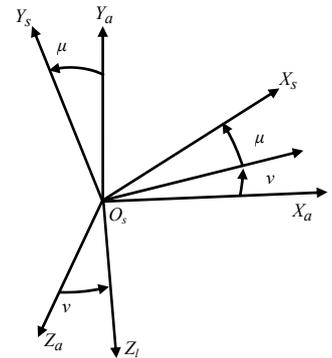


Fig.7 Boresight coordinate system
图 7 视轴坐标系

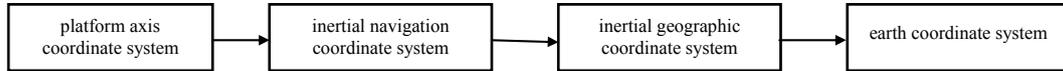


Fig.8 Target positioning coordinate system conversion relationship
图8 目标定位坐标系转换关系

最终的求解目的是获得目标点在地球坐标系下的经纬高。因此需要获得目标在地球坐标系下的方向矢量,通过 2 个观测点的方向矢量和 2 点的地球坐标,可以解出目标在地球坐标系下的直角坐标,最终转换为大地坐标,计算流程如图 9 所示。

3.2.3 目标定位算法

已知光电吊舱在观察点 A 测得目标的视轴方位角为 v_A,视轴俯仰角为 μ_A,此时的吊舱姿态为航向角 φ_A、俯仰角 θ_A、横滚角 γ_A。根据上述坐标转换关系,可以通过以下步骤获得目标的地球坐标系下的矢量 [X_q, Y_q, Z_q]^T。

1) 目标在视轴坐标系(OXYZ)_s的矢量可定义为:

$$[X_s, Y_s, Z_s]^T = [1, 0, 0]^T$$

2) 观察点 A 的经度 L_A、纬度 B_A、海拔高度 h_A在地球坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} Y_{q_0} = (N + h_A) \cos B_A \cos L_A \\ Z_{q_0} = (N + h_A) \cos B_A \sin L_A \\ X_{q_0} = (N(1 - \alpha^2) + h_A) \sin B_A \end{cases} \quad (1)$$

式中: N = r/W, W = √(1 - α² sin² B_A); r 为地球椭球长半轴; α 为地球椭球第一偏心率。

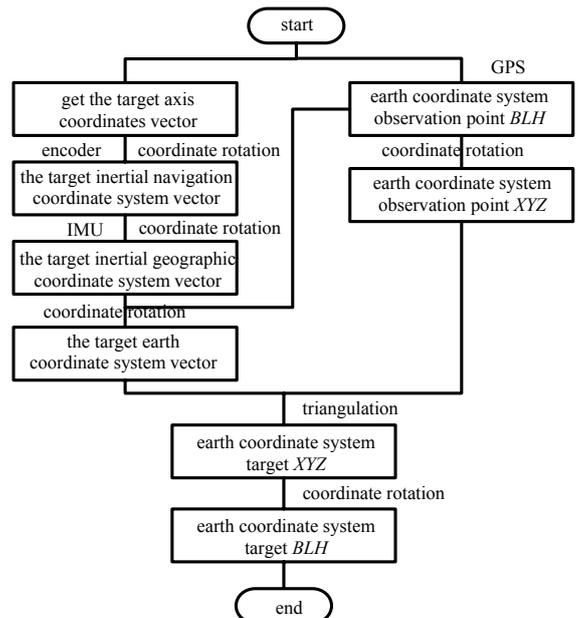


Fig.9 Calculation process
图 9 计算流程

3) 计算目标在惯性导航地理坐标系 $(OXYZ)_e$ 的矢量 $[X_e, Y_e, Z_e]^T$

$$\begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} = M_{e,a} M_{a,s} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

4) 计算目标在地球坐标系 $(OXYZ)_q$ 的矢量

$$\begin{bmatrix} X_q \\ Y_q \\ Z_q \end{bmatrix} = M_{q,e} \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{q_0} \\ Y_{q_0} \\ Z_{q_0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样的方法可以获得观测点 B 在地球坐标下的位置坐标和目标矢量。

根据上述算法, 已获得 2 点在同一地球坐标系下的地理位置和目标矢量, 可以使用三点定位的方法获得目标的地球坐标值。

根据上一步获得的目标矢量, 可以解得目标在地球坐标下的观测角。几何关系如图 10 所示。

由三角几何学可列出式(4)^[5]:

$$\begin{cases} -x \tan \beta_1 + y = -x_1 \tan \beta_1 + y_1 \\ y \tan \varepsilon_1 - z \sin \beta_1 = y_1 \tan \varepsilon_1 - z_1 \sin \beta_1 \\ -x \tan \beta_2 + y = -x_2 \tan \beta_2 + y_2 \\ y \tan \varepsilon_2 - z \sin \beta_2 = y_2 \tan \varepsilon_2 - z_2 \sin \beta_2 \end{cases} \quad (4)$$

联立即可解得目标在地球坐标下的空间直角坐标 (x, y, z) , 根据上文算法迭代转换为经纬高, 完成定位运算^[7-8]。

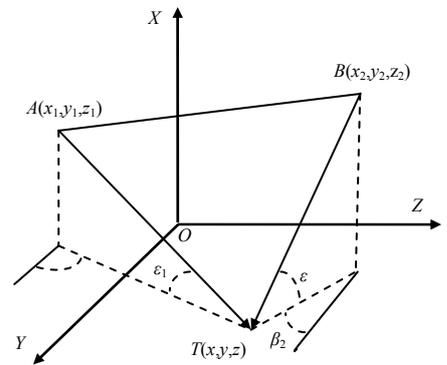


Fig.10 Triangular positioning geometry
图 10 三角定位几何关系

4 目标定位误差分析

影响定位精确度的误差因素主要有以下几个方面^[9-10]:

- 1) 视轴角度误差; 2) 图像像素误差; 3) 方位、俯仰轴角编码器测量误差。

4.1 视轴角度误差

IMU 与测角器联合解算获得的理论视轴与时间传感器视轴指向存在误差, 如图 11 所示。此误差来源于系统安装误差以及框架不正交因素导致的角度误差, 进而影响目标点定位精确度, 当坐标轴 X 偏移 m_f 角度至 X' 所在位置时, 将对传感器视准轴 OP 的计算角度产生影响。根据工艺水平和安装经验, 视轴误差不大于 0.05° , 目标距离为 5 000 m 时, 由视轴误差引起的目标定位误差约为 $(0.03^\circ/57^\circ) \times 5\,000\text{ m} = 2.63\text{ m}$ 。

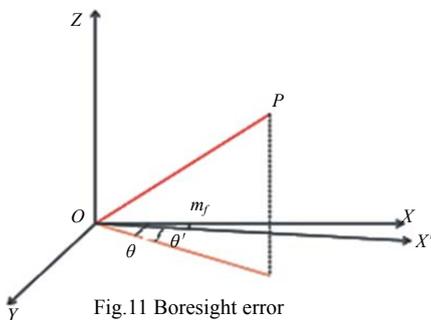


Fig.11 Boresight error
图 11 视轴误差

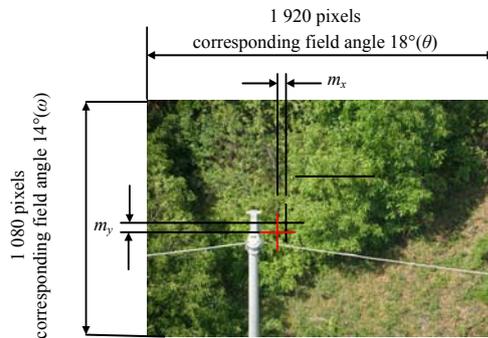


Fig.12 Image pixel error
图 12 图像像素误差

4.2 图像像素误差

像素误差属于操作误差, 在对目标进行定位时, 目标选取存在像素偏差, 如图 12 所示。图中 m_x 表示方位偏差角度, m_y 表示俯仰偏差角度。其中电荷耦合器件(Charge Couple Device, CCD)分辨力为 $1\,920 \times 1\,080$, 视场角为 $18^\circ \times 14^\circ$ 。

$$m_x = (N / 1920)\theta \tag{5}$$

$$m_y = (M / 1080)\omega \tag{6}$$

式中： N 表示方位像素误差个数； θ 表示方位视场角； M 表示俯仰像素误差个数； ω 表示俯仰视场角。

S_2 表示图像的定位误差， D 表示目标距离。测量误差为：

$$S_2 = D\sqrt{m_x^2 + (m_y^2 / 57)} \tag{7}$$

假设像素误差为方位 2 个像素，俯仰 2 个像素，则方位偏差角度约为 0.018，俯仰偏差角度约为 0.025，当距离目标 5 000 m 时，由式(5)~(7)计算出定位误差约为 2.68 m^[11]。

4.3 方位、俯仰轴角编码器测量误差

IMU 和角编码器的角度测量误差是系统误差，如图 13 所示。

吊舱在观测点 U 测得对目标 T 的测距距离为 D ，若角度测量偏差为 θ ，则最终造成的定位距离偏差为 S_3 。可表示为：

$$S_3 = D\theta / 57 \tag{8}$$

假设 IMU 的俯仰角和横滚角的误差为 0.002°，航向误差为 0.02°，对于距离 5 000 m 的目标，此项引起的定位误差约为 1.76 m^[12]。

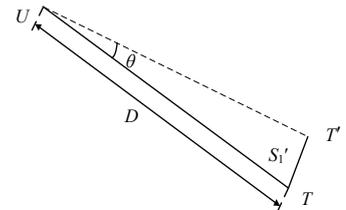


Fig.13 Angle measurement error
图 13 角度测量误差

4.4 仿真结果与分析

在 Z-5 无人直升机上使用光电吊舱测量，对一个已知精确 GPS 坐标的输电线杆塔进行观测，如图 14 所示。测得数据、解算结果见表 1、表 2。

表 1 观测点所测数据
Table1 Measured points data

	observation point 1	observation point 2	observation point 3
longitude	542 018.968	544 729.318	549 595.278
latitude	3 365 274.196	3 368 464.736	3 371 166.826
height	10.463	9.952	9.964
roll angle	-0.435	-1.338	-1.666
pitching angle	2.175	1.336	1.525
heading angle	105.443	53.072	56.598
azimuth angle	26.317	39.117	20.583
pitching angle	1.417	1.300	1.467

表 2 解算观测点数据
Table2 Solving observation points data

	observation point 1	observation point 2	observation point 3
longitude	538 222.4193	538 223.493	538 220.488 6
latitude	3368 866.368	3368 865.158	3368 863.563
height	12.964 7	12.957 7	12.968 9
northward deviation	-0.318 2	-1.528	-3.123 2
eastward deviation	-3.188 7	-2.115	-5.119 4
sky deviation	3.764 7	3.757 7	3.768 9
total deviation	4.94	4.57	3.08



Fig.14 Z-5 unmanned helicopter and transmission line tower
图 14 Z-5 无人直升机及输电线杆塔

由以上仿真结果分析，基于图像的输电线杆塔定位精度可以达到 5 m，如图 15 所示。

5 结论

借鉴航空测绘领域的技术，将图像定位技术应用于电力巡检系统，可以大大增加无人机电力巡检系统的实用性，使其不依赖其他机载设备，可独立对观测场景中的目标进行无源定位，实时获得目标杆塔的经纬度信息^[13-14]。



Fig.15 Transmission line tower schematic
图 15 输电线路上的杆塔示意图

参考文献:

- [1] 王春祥,李晓,盛庆伟. 航空摄影测量学[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2011. (WANG Chunxiang,LI Xiao,SHENG Qingwei. Aerial photogrammetry[M]. Zhengzhou,China:Yellow River Water Conservancy Press, 2011.)
- [2] 李德仁,王树根,周月琴. 摄影测量与遥感概论[M]. 北京:测绘出版社, 2008. (LI Deren,WANG Shugen,ZHOU Yueqin. Introduction to photogrammetry and remote sensing[M]. Beijing:Surveying and Mapping Press, 2008.)
- [3] 娄树理,杨增胜,周晓东. 无人机光电侦察、监视技术研究[J]. 航天电子对抗, 2007,23(2):28-30. (LOU Shuli,YANG Zengsheng,ZHOU Xiaodong. Research on the photoelectric reconnaissance and surveillance technology of UAV[J]. Space Electronic Countermeasure, 2007,23(2):28-30.)
- [4] 孙仲康,郭福成,冯道旺. 单站无源定位跟踪技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2008. (SUN Zhongkang,GUO Fucheng,FENG Daowang. Single-station passive location and tracking technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2008.)
- [5] 郁亮. 单站无源定位跟踪技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006:11-14. (YU Liang. Single observer passive location and tracking technology[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2006:11-14.)
- [6] 贾平,张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程, 2003,11(1):82-88. (JIA Ping,ZHANG Bao. Key technologies and development of aviation photoelectric reconnaissance platform[J]. Optics and Precision Engineering, 2003,11(1):82-88.)
- [7] 郑红,李振,刘振强. 嵌入式 DSP 应用系统设计及实例剖析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011. (ZHENG Hong,LI Zhen,LIU Zhenqiang. Embedded DSP application system design and case analysis[M].Beijing:Beihang University Press, 2011.)
- [8] 刘聪锋. 无源定位与跟踪[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011. (LIU Congfeng. Passive location and tracking[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2011.)
- [9] 刘林,范平志. 多径环境下多终端协作高精度定位算法[J]. 西南交通大学学报, 2011,46(4):676-680. (LIU Lin,FAN Pingzhi. Multi-terminal cooperative high-precision localization algorithm in multipath environment[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011,46(4):676-680.)
- [10] 程庆敏,付思瑞. POS 辅助图像定位[J]. 电光与控制, 2015,22(5):77-79. (CHENG Qingmin,FU Sirui. POS assisted image positioning[J]. Electronics Optics & Control, 2015,22(5):77-79.)
- [11] KAY S,VANKAYALAPATI N. Improvement of TDOA position fixing using the likelihood curvature[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013,61(8):1910-1914.
- [12] HARA S,ANZAI D,YABU T,et al. A perturbation analysis on the performance of toa and tdoa localization in mixed los/nlos environments[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013,61(2):679-689.
- [13] HU C,TIAN Y,YANG X,et al. Background ionosphere effects on geosynchronous sar focusing:theoretical analysis and verification based on the Beidou navigation satellite system(BDS)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016,9(3):1143-1162.
- [14] LIU J,CAI B,WANG J. An analysis of Beidou navigation satellite system(BDS) based positioning for train collision early warning[C]// Intelligent Vehicles Symposium(IV). Australia Gold Coast:[s.n.], 2013:1065-1070.

作者简介:



王刚(1986-),男,吉林省农安县人,工程师,学士,主要从事输电线路运行与检修工作.email:745532001@qq.com.

程庆敏(1981-),男,山西省阳泉市人,工程师,学士,主要从事光电科学研究.

易琳(1986-),男,江西省宜丰县人,工程师,博士,主要从事电力智能巡检及应用研究工作.

庞文清(1990-),男,河南省洛阳市人,工程师,硕士,主要从事计算机工作.