

防止恶意无人机入侵电力巡检区的管控方法

王鹏¹, 郝小龙¹, 朱耀康², 杨光², 崔漾¹, 彭启伟¹, 何道敬²

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏 南京 211106;

2. 华东师范大学计算机科学与软件工程学院, 上海 200062)

摘要: 在电力巡检工作中, 巡检方法逐渐从原先的人工巡检, 升级为无人机智能巡检。然而, 恶意无人机入侵电力巡检工作区域, 会给电厂的生产带来诸多安全问题。针对电子围栏技术在管控恶意无人机时缺乏实时性、灵活性以及管控避障效果差等问题, 提出了一种防止恶意无人机入侵电力巡检区的管控方法, 并通过实验验证了该方法使电力巡检区对无人机有高效的管控性能。

关键词: 电厂; 电力巡检; 无人机管控区; 电子围栏技术; 避障

中图分类号: TP309.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-109x.2018052

Control method to prevent malicious UAV intrusion into electricity inspection area

WANG Peng¹, HAO Xiaolong¹, ZHU Yaokang², YANG Guang²,
CUI Yang¹, PENG Qiwei¹, HE Daojing²

1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China

2. School of Computer Science and Software Engineering, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract: In recent years, the exploitation and deployment of UAV (unmanned aerial vehicle) has grown rapidly. The number of UAV is increasing and it is becoming more and more important in many areas. For example, the power inspection method has been upgraded from the original manual inspection to unmanned intelligent inspection. However, malicious UAV intrude on the power patrol work area and also bring about safety problems to the power plant's production. Because the electronic fence technology (geo-fencing) lacks the real time and flexibility when it controls the UAV, a novel control method to prevent malicious UAV from invading the power inspection area is proposed. The experimental results demonstrate the effectivity of our proposed method.

Key words: power plant, power inspection, UAV control area, geo-fencing, avoidance

1 引言

随着科学技术的进步和发展, 无人机(UAV)在技术上越来越成熟, 在生产生活中的应用也变得越来越广泛^[1]。无人机具有成本低、易操纵、

高度灵活性、高度适应性和安全稳定性等优点, 在处理自然灾害、事故灾难以及社会安全事件等方面发挥着重要作用。近几年, 无人机产业发展迅速。无人机数量逐渐增多, 重要性日益彰显。无人机的应用范围非常广泛, 如在军事上无人机

收稿日期: 2018-04-15; 修回日期: 2018-05-21

通信作者: 何道敬, hedaojinghit@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51477056)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.51477056)

被用来监视敌方活动，消除未爆炸的弹药，在民用上无人机被用于空中侦查、航拍，转播体育赛事，评估地震风险，施工管理等^[2]。在电力巡检工作中，巡检方法也从原先的人工巡检，升级为无人机智能巡检。电力巡检过程也不可避免地存在一系列的安全问题。最常见的问题是恶意无人机入侵电力巡检区，与周围障碍物发生碰撞，以及窃取电力巡检区巡检数据。这对人们的生命财产都构成了威胁，因此解决恶意无人机入侵电力巡检区的问题成了当务之急。

本文主要研究恶意无人机以及恶意无人机集群入侵电力巡检区域的安全问题，具体工作如下。

恶意无人机入侵电力巡检区域给生产带来安全问题，针对电子围栏技术（geo-fencing）^[3]在管控恶意无人机时缺乏实时性、灵活性以及管控避障效果差等问题，本文提出了一种防止恶意无人机入侵电力巡检区的管控方法。通过管控设备发出的卫星导航欺骗信号诱导单架或多架无人机飞离巡检区，通过手机客户端程序发送 360°全方位诱导信号实时调整恶意无人机飞行方向。仿真实验表明，该恶意无人机的管控方法在管控效果上比电子围栏技术更加有效，在管控的实时性、灵活性以及避障效果上有优势。

2 无人机地理围栏技术

未来 10 年，无人机系统能够使各行各业受益匪浅，然而其易发生的安全问题还有待考察。许多公司在无人机控制系统中加入了飞行限制区域，限飞区域包括机场、电力巡检区域和一些可能带来风险的区域。

在现实世界的地理区域内建立的虚拟周边，被称为地理围栏。通过卫星导航信号提供的无人机的实时地理位置，可以判断无人机是否在禁止飞行的空域（包括电力巡检区域）。同时通过手机 App 可以在预设的地图中提供有关某些点的信息，说明它是什么类型的位置。因此，该安全系统可以通过卫星导航信号和预先建立的地图数据轻松实现无人机管控。

与大多数其他地图服务一样，地理围栏技术使用称为节点的地理点构建其地图。每个节点包含确定坐标的数据和表示其物理特征的关键元素。

例如，某个节点可以被标记为高速公路、建筑物或航空公司。标记为公园或草地的节点对飞行来说是安全的。在大多数情况下，安全的飞行区域（如公园）可以表示为分散在整个空域（电厂、周边建筑物、电力设施）景观中的多边形^[4]。图 1 为地理围栏系统模块。

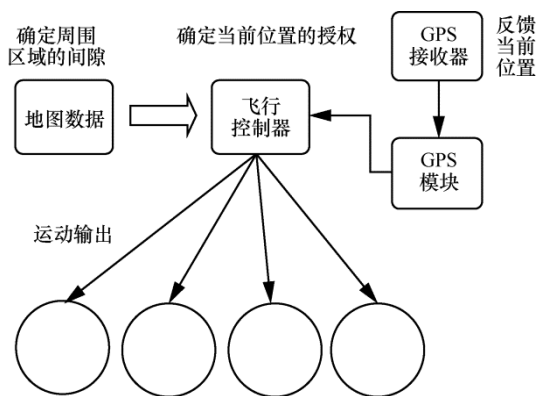


图1 地理围栏系统模块

因此，使用多边形管控区记录的地图数据和飞行器的当前 GPS 坐标数据，可以计算出无人机是否在一个安全地带。如果安全系统返回 true，那么无人机目前处于安全飞行区域^[5]；否则，它是在一个管控区（电力巡检区域）。这种真实和虚假的区分可以让控制者或用户知道他们所在的空域是情况，能够做出相应的反应。

图 2 为大疆公司（DJI）地理围栏系统提示。



图2 大疆公司（DJI）地理围栏系统提示

然而这些策略都是基于无人机持有者的角度进行管控，如果无人机持有者没有将无人机列入电子地理围栏系统，管控便无法实施。传统的地理围栏技术只是提示无人机用户该无人机进入禁飞区域，缺乏有效的管控措施，大疆禁飞区则是在该基础上使进入禁飞区^[6]的无人机自动降落，缺乏后续管控流程。

3 基于卫星导航系统的无人机管控方法

3.1 设置单架无人机管控区

电力巡检区域的管控区是对无人机进行管控的必要选择。管控区首先定下管控范围，当无人机飞行超出一定范围，使用这些已定界的区域，通过雷达探测确定 UAV 位置是否在边界内。该区域的平面图形可以是圆形、多边形等任何形状。

1) 设置多边形管控区

对于复杂类型的多边形，很难找出点是在边界内还是在边界外。对于这种类型的多边形解决方案是通过设置穿过无人机位置的垂直阈值线^[7]。垂直阈值线与多边形边的交点表示为节点。如果在 UAV 位置的每一侧有奇数个节点，那么它在边界内；如果每一侧有偶数个节点，那么它是超出边界的；如果无人机正好在多边形边缘，那么它可能是在边界内也可能在边界外。如图3所示，无人机位置的每一侧有偶数个节点，那么无人机位于管控区边界外。

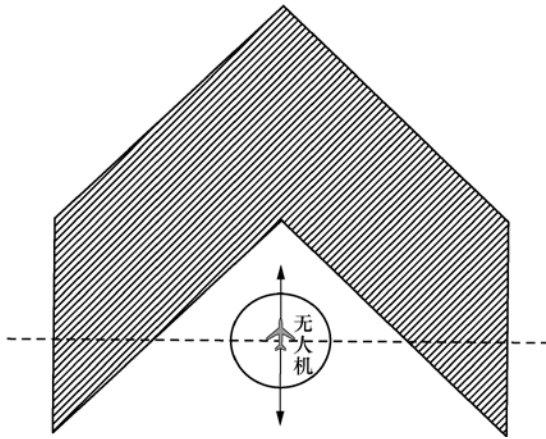


图3 无人机在多边形管控区外

2) 设置圆形管控区

假设管控区（电力巡检区域）是一个规则平面中的圆，该圆将被视为无人机位置的边界^[8]。以雷达的观察范围作为半径标准值，管控区的范围可设置为小于或等于探测的观察范围。在实施方面，与多边形管控区相比，圆形管控区的设置更加容易。图4中黑色斜线区域为圆形无人机管控区，外层圆环为管控区警戒线，黑色实心区域为无人机管控区外围区域。在圆形管控区的圆心位置摆设一套管控设备，该设备位于管控区的圆

心位置点 O ，设为 (x_0, y_0, z_0) ，当无人机即将到达管控区警戒线时，无人机会受到来自管控信号的诱导产生一个速度指令矢量，该速度指令矢量反向于无人机的目标方向。例如，图4中指向西南箭头代表管控速度指令矢量，指向东北箭头代表无人机正常飞行的速度指令矢量。当管控速度指令矢量的大小大于正常飞行的速度指令矢量时，无人机撤离管控区。

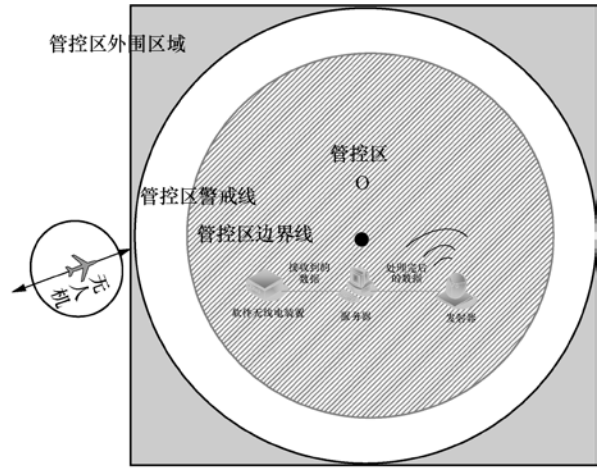


图4 圆形无人机管控区

3.2 探测无人机

1) 雷达探测原理

本文使用雷达^[9]电磁波探测管控区周围无人机的飞行状况，在自由空间中，当不考虑任何环境影响时，雷达最大作用距离由以下的雷达方程决定。

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 F_t^2 F_r^2}{(4\pi)^3 k T_s D_0 C_b L} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

其中， P_t 为发射功率； G_t 为发射天线功率增益； G_r 为接收天线功率增益； τ 为脉冲带宽， σ 为雷达标截面积， λ 为波长； k 为波尔兹曼系数， T_s 为接收系统噪声温度； D_0 为检测因子， C_b 为带宽校正系数， L 为系统损耗因子， F_t 为发射天线到目标的方向图传播因子； F_r 为目标到接收天线的方向图传播因子。

2) 雷达探测无人机的瞬时探测概率

假设无人机的雷达散射截面不变，雷达接收机输出的信噪比 $\frac{S_0}{N_0}$ 与无人机和雷达之间的距离

离 R 呈 4 次方的反比关系, 且信噪比 $\frac{S_0}{N_0}=1$ 时, 无人机和雷达之间的距离为 R_0 , 因此有

$$\frac{S_0}{N_0} = \left(\frac{R_0}{R} \right)^4 \quad (2)$$

假设雷达的发射信号服从 Swerling 模型, 背景噪声具有高斯统计特性, 雷达采用单元平均恒虚警率处理雷达接收机的输出信号, 那么雷达对于无人机的瞬时探测概率 P_d 为

$$P_d = \left[1 + \frac{T}{1 + \frac{S_0}{N_0}} \right]^{-N} \quad (3)$$

结合式(2)与式(3)可得出最终雷达探测无人机的瞬时探测概率 P_d 为

$$P_d = \left[1 + \frac{T}{1 + \left(\frac{R_0}{R} \right)^4} \right]^{-N} \quad (4)$$

同时得到无人机的三维坐标 (x_u, y_u, z_u) 。

3.3 生成诱导点

1) 选择诱导点

当雷达探测到无人机即将到达管控区^[10]警戒线时, 记录此时无人机的三维坐标点 $S(x_u, y_u, z_u)$, 假设圆形管控区的圆心 O 为 (x_0, y_0, z_0) , 则设置卫星导航诱导点为从无人机所在位置^[11]到管控区中心有向连线的延长线上极远处一点 E , 管控区诱导点如图 5 所示。点 E 平面坐标通过公式求得为

$$(x_e, y_e) = (2x_0 - x_u, 2y_0 - y_u) \quad (5)$$

将该坐标进一步转换为经纬度坐标存入管控设备, 假设某点的大地经纬度坐标为 $A(B, L, H)$, 其中, B 为纬度 (纬度是空间的点与参考椭球面的法线与赤道面的夹角); L 是经度 (经度是空间中的点与参考椭球自转轴所在的面与参考椭球的起始子午面的夹角); H 是大地高度 (大地高度是空间点沿参考椭球的法线方向到参考椭球面的距离)。空间大地坐标系可用图 6 表示, 转换公式如下。

$$x = (N + H) \cos B \cos L \quad (6)$$

$$Y = (N + H) \cos B \sin L \quad (7)$$

$$Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \quad (8)$$

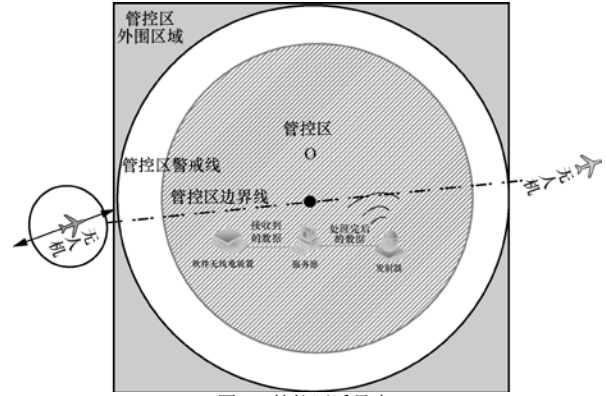


图5 管控区诱导点

其中, $N = \frac{a}{W}$, (a 为椭球的长半轴, 值为 6 378.137 km, N 为椭球的曲率半径, W 为第一基本维度常数)

$$W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (9)$$

其中, e 为椭球的第一偏心率, b 为椭球的短半轴, 值为 6 356.752 31 km。

通过以上计算可以将直角坐标转换成为经纬度坐标, 并作为管控系统的输入。

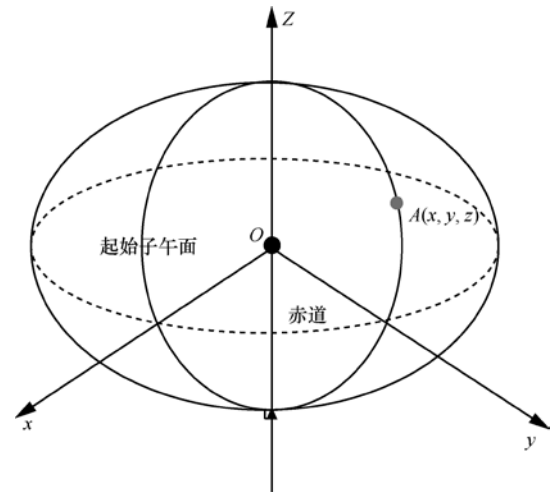


图6 空间大地坐标系

2) 下载导航数据文件

在 NASA 官网上管控设备更新下载实时的导航数据文件, 导航数据文件作为管控设备模拟 GPS 信号的依据, 包含卫星的导航电文、GPS 观测值、测定的气象数据以及卫星和接收时钟信息等。

3) 生成管控信号

将以上生成的坐标点代入以下操作流程中。

① 通过 USRP&GNURadio 录制卫星导航信号, 存入 bin 文件中。

② 将 bin 文件的二进制数据包解析为 RINEX、XML 或 NMEA 文件。

③ NMEA 数据修改输出 NMEA。

④ 将以上生成的诱导点经过 GPS-SDR-SIM 处理输出为 bin 文件。

⑤ 通过 USRP&GNURadio 发射管控信号。

3.4 驱离无人机

通过管控设备生成数字信号流, 通过管控设备的发射端发射出 GPS 管控信号, 目标无人机 GPS 接收器接收到管控设备发来的管控信号后, 管控信号中模拟第 i 颗卫星的信号满足扩展码相位对准。在捕获目标接收机的载波和码相位跟踪环路之后, 管控设备调整其管控信号的相对码相位, 以诱导目标接收机相对其真实位置报告模拟的虚假位置。

4 实验

为防止恶意无人机闯入电力巡检区^[12], 本文提出了基于卫星导航系统的无人机管控方法, 本文实验主要对该管控方案中所用到的硬件设备及相关环境进行了介绍, 并通过设置真实户外实验, 对无人机闯入电力巡检区这一行为进行管控, 同时通过仿真实验与大疆无人机禁飞区技术进行对比, 验证管控方案的实时性以及灵活避障^[13]等效果。并通过改变设置管控信号的参数 (包括信号强度、信号中诱导点的移动速度) 优化该方案。

4.1 实验条件

1) 实验场地

管控区主要通过模拟学校运动场作为电力巡检区域, 采用圆形平面管控区形状, 该管控区场景设置为在学校足球场, 实验设备放置于足球场中心点 O 处, AO 、 OC 为该圆形管控区的半径 (27 m), BO 、 OD 为警戒线到点 O 的距离 (46 m)。该范围内的空域没有其他遮挡物。图 7 为大疆无人机客户端拍摄的管控区场景。图 8 为实验场地上划定的管控区。

该管控区地面由塑胶构成, 风力等级在 0.3~1.5 m/s 范围内, 且其中没有其他的电磁干扰源。该范围内的可用 GPS 卫星数有 9 颗或以上。



图 7 大疆无人机拍摄的实验场地

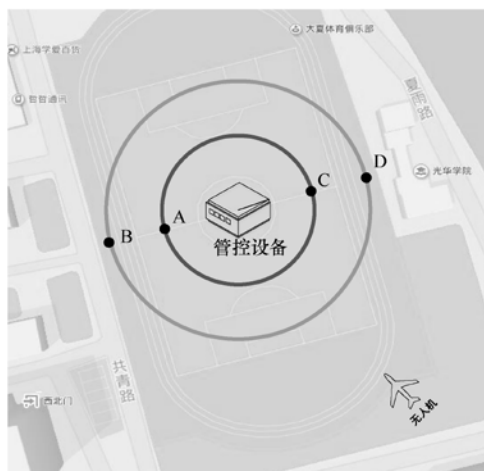


图 8 实验场地划定的管控区

2) 无人机

实验中使用的无人机为大疆精灵 3 标准版, 该无人机中导航传感器包括一个 IMU、一个磁力计、一个压力表以及一个 GPS 接收器, GPS 芯片背面, 芯片都被电磁屏蔽层覆盖。在飞行的过程中, 尽量减少甚至避免遥控器对无人机的控制。

3) 管控系统

管控系统硬件设备包括 HackRF、大功率全定向天线、笔记本等。其中, HackRF 主要与笔记本相连, 通过 GNURadio 无线电处理软件将卫星导航欺骗信号上变频至 L1 波段发射。全定向天线与 RF 射频前端相连。

在正常操作期间, 大疆精灵 3 按照平面向量 $\overrightarrow{EO}$ 的方向以 1.5~3.5 m/s 的速度飞行, 当精灵 3 接近管控区警戒线时, 此时将诱导点设置为 $\overrightarrow{EO}$ 方向上的极远处一点, 本实验将该点定为太平洋上的塞班岛, 并通过管控设备向大疆精灵 3 发射含有该诱导点信息的管控信号, 塞班岛经纬度坐标为 (145.504 356, 15.087 252)。

4.2 实验结果

1) 定位至塞班岛

GPS 管控开始于目标无人机接近管控区警戒线时, 如图 9 所示, 大疆精灵 3 按照 $\overrightarrow{EO}$ 方向以 1.5~3.5 m/s 的速度飞行, 无人机的飞行高度为 8.2 m。当大疆精灵 3 接近管控区警戒线时, 无人机客户端报告的定位从原先的定位变换至塞班岛。然而摄像头记录的画面依旧是校园足球场上的画面。图 10(a)中箭头代表无人机此时的定位, 而 H 点代表无人机的返航点, 返航点仍然为足球场, 图 10(b)中显示无人机收到的导航信号星数为 5 颗, 且无人机处于姿态模式下飞行。该模式下无人机不能定点悬停, 只能保证自动平衡。

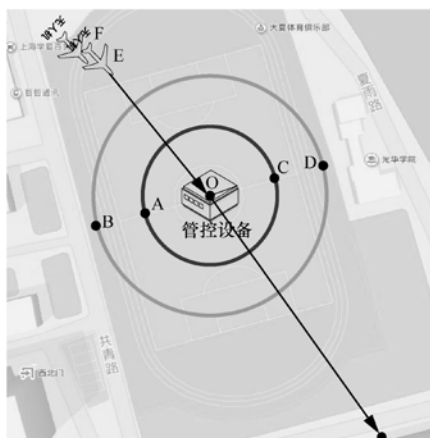
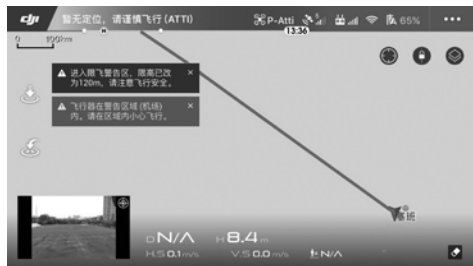


图 9 无人机管控图示



(a) 无人机定位到塞班岛



(b) 无人机收到导航信号星数为 5 颗

图 10 无人机被诱导至塞班岛

2) 管控避障实验

无人机在驱离时, 驱离路线上有存在障碍物^[14]的可能, 为避免^[15]这些障碍物, 操控者通过手机 App 向管控设备发送速度调整信号, 无人机会随着手机端的指令而移动。

如图 11 所示, 在 ROS^[16]平台上模拟无人机入侵电力巡检区域, 无人机驱离时实时改变无人机的运动方向躲避驱离路线上的障碍物。无人机的撤离路线由图中所在点到金字塔点。该路线上设置了 8 个障碍物, 分别是球体、柱体等。使用本文方法无人机可以通过所有障碍物。而使用大疆无人机管控区则无法躲避, 当障碍物密集时, 无人机降落时会撞到障碍物。

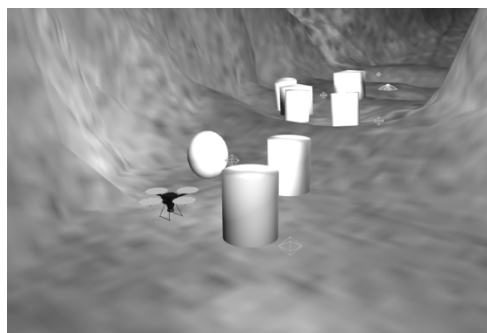


图 11 ROS 模拟管控避障实验

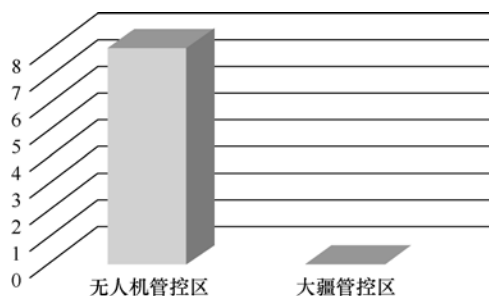


图 12 不同管控区障碍物躲避图

4.3 实验性能评估

通过观测实验数据, 发现基于卫星导航系统的管控区在对无人机进行管控时, 可以给无人机设置一个诱导点, 使无人机撤离管控区, 时速 3.3 m/s 的无人机接收到管控信号后可以在 4 s 内撤离管控区域, 足以说明管控区有高效的管控性能。

同时, 不同速度的无人机管控难度不同。为驱离高速飞行的无人机, 本文通过改变诱导点移动的速度来提高驱离的加速度, 从而加强了管控的能力。其次, 有些管控区内存在大型障碍物,

如果使用大疆等公司的管控区进行管控, 会使无人机原地垂直下降, 存在撞到障碍物的风险。因此本文又提供了管控区的移动端操控方案, 全方位控制无人机撤离管控区。

5 结束语

本文针对无人机电力巡检区安全问题——无人机管控区技术进行了深入研究和实验, 但是本文的方法还存在以下不足。

1) GPS 欺骗方法在对无人机管控的过程中, 导航信号的优先级并非最高, 为使管控效果更佳, 可以考虑先对无人机遥控信号进行屏蔽。

2) GPS 欺骗方法在对多架无人机^[17]进行管控时如果遇到障碍物^[18]的遮蔽会影响无人机的管控效果^[19], 后续管控无人机可以通过无人机枪等其他工具进行多重配合管控, 提高无人机的灵活性。

参考文献:

- [1] DU B Q, LIU S Z. A common obstacle avoidance module based on fuzzy algorithm for unmanned aerial vehicle[C]//IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). 2016.
- [2] ILLE M, NAMERIKAWA T. Collision avoidance between multi-UAV-systems considering formation control using MPC[C]//IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2017:651-656.
- [3] GURRIET T, CIARLETTA L. Towards a generic and modular geofencing strategy for civilian UAV[C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. 2016:540-549.
- [4] WANG E. Identification of flight safety zones for unmanned aerial systems using geo-fencing data provided by prebuilt maps[C]//The 11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). 2016.
- [5] QIU Q, CAO L, FANG J Y. Comparative study of parallel point-in-polygon algorithm in dynamic scheduling and static scheduling[J]. Geography and Geo-Information Science, 2013.
- [6] FARLIK J, KRATKY M, CASAR J, et al. Radar cross section and detection of small unmanned aerial vehicles[C]//International Conference on Mechatronics- Mechatronika. 2017.
- [7] KLARE J, BIALLOWONS O, CERUTTI-MAORI D. Detection of UAV using the MIMO radar MIRA-CLE Ka[C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar. 2016.
- [8] PENG X Z, LIN H Y, DAI J M. Path planning and obstacle avoidance for vision guided quadrotor UAV navigation[C]// IEEE International Conference on Control and Automation. 2016:984-989.
- [9] MOSES A, RUTHERFORD M J, VALAVANIS K P. Radar-based detection and identification for miniature air vehicles[C]//IEEE International Conference on Control Applications. 2011:933-940.
- [10] PRATYUSHA P L, NAIDU V P S. Geo-fencing for unmanned aerial vehicle[J]. International Journal of Computer Applications, 2013.
- [11] BAI G, XIANG X, ZHU H, et al. Research on obstacles avoidance technology for UAV based on improved PTAM algorithm[C]//IEEE

International Conference on Progress in Informatics and Computing. 2016:543-550.

- [12] ZHANG X L. Key issues in electricity inspection under the new situation[J]. Heilongjiang Science, 2016.
- [13] CHAUFFAUT C, DEFAY F, BURLION L, et al. UAV obstacle avoidance scheme using an output to input saturation transformation technique[C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. 2016:227-234.
- [14] GAO X J, CHENG X F, ZHI Y. Research on environment and threat model in UAV path planning [J]. Aeronautical Computing Technique, 2013.
- [15] JAMES T. System safety modeling of alternative geofencing configurations for small UAS[J]. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2016.
- [16] QUIGLEY M. ROS: an open-source robot operating system[C]//IEEE ICRA Workshop on Open Source Robotics. 2009.
- [17] CAO W, XU S. A workflow based multi-UAV cooperation architecture[C]//International Conference on Information Management. 2017:496-499.
- [18] SHARMA R, GHOSH D. Swarm intelligence based collision avoidance between realistically modelled UAV clusters[C]// IEEE American Control Conference. 2007:3892-3897.
- [19] RIISGARD S. SLAM for dummies-a tutorial approach to simultaneous localization and mapping[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2000, (4):699-705.

[作者简介]



王鹏 (1981-), 男, 江苏盐城人, 南瑞集团公司工程师, 主要研究方向为电力系统自动化。

郝小龙 (1984-), 男, 山西人, 硕士, 南瑞集团公司高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动化及音视频图像处理。

朱耀康 (1991-), 男, 江苏无锡人, 华东师范大学硕士生, 主要研究方向为无人机安全。

杨光 (1994-), 男, 山东济宁人, 华东师范大学硕士生, 主要研究方向为无人机安全。

崔漾 (1991-), 男, 山西人, 硕士, 南瑞集团公司工程师, 主要研究方向为数字图像处理。

彭启伟 (1984-), 男, 江苏人, 硕士, 南瑞集团有限公司高级工程师, 主要研究方向为信号与信息处理。

何道敬 (1985-), 男, 海南澄迈人, 博士, 华东师范大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络空间安全。