

# Research on Detection and Control Method of Civilian UAV Based on Radio Technology in Prison Environment

Zhifang Wang, Xiaofang Zhou, Congyu Xu

Third Research Institute of Ministry of Public Security, Shanghai  
Email: fw339wzf@126.com

Received: Aug. 26<sup>th</sup>, 2018; accepted: Sep. 7<sup>th</sup>, 2018; published: Sep. 14<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

With the widespread application of UAVs and the further expansion of the global UAV market, the potential of the civil UAV market is enormous. It will be extended to a wider range of areas, but it also brings serious security risks, such as airway safety, social order, large-scale assembly, sports events and other interference factors. Especially in recent years, the potential safety hazards caused by UAVs in prisons have attracted wide attention. Based on the radio signals used by civil UAVs, this paper analyzes the data, picture and satellite navigation signals of civil UAVs, and uses radio technology to extract the spectrum features of UAVs signals to discover UAVs, and uses radio direction finding or TDOA positioning technology to locate UAVs. This paper discusses the use of radio blocking technology and navigation signal guidance technology to control UAVs.

## Keywords

Radio Technology, UAV Detection, UAV Control, Radio Direction Finding, TDOA

---

# 基于无线电技术的民用无人机侦测与管控方法在监所环境的探究

王智芳, 周晓芳, 徐从宇

公安部第三研究所, 上海  
Email: fw339wzf@126.com

收稿日期: 2018年8月26日; 录用日期: 2018年9月7日; 发布日期: 2018年9月14日

**文章引用:** 王智芳, 周晓芳, 徐从宇. 基于无线电技术的民用无人机侦测与管控方法在监所环境的探究[J]. 计算机科学与应用, 2018, 8(9): 1407-1415. DOI: 10.12677/csa.2018.89153

## 摘要

随着无人机广泛应用,全球无人机市场规模的进一步扩大,民用无人机市场潜力巨大,必将向更广阔的领域推广,但同时也带来了严重的安全隐患,如空中航道安全、社会秩序、大型集会、体育赛事等带来了多种干扰因素。尤其是近年来,无人机在监所方面所引起的安全隐患更是引起了广泛的关注。本文从民用无人机所使用的无线电信号出发,分析民用无人机的数传信号,图传信号,卫星导航信号等,利用无线电技术实现无人机信号频谱特征提取达到发现无人机的目的,利用无线电测向或TDOA定位技术实现无人机的定位。探讨使用无线电阻塞技术,导航信号诱导技术对无人机的管控。

## 关键词

无线电技术,无人机侦测,无人机管控,无线电测向,TDOA

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 民用无人机的应用及存在的隐患

随着科技的发展进步,无人机及配套载荷的成本降低,无人机广泛应用在警用、国土资源、能源、商业、农业、医疗、防灾救护、视频拍摄等诸多领域。如在警用领域,民用无人机可用于突发事件、重大活动、森林防火、人流控制、交通监管等;在能源领域,民用无人机可用于电力巡线、石油管道巡线、天然气管道巡线等;在国土资源领域,民用无人机可用于城镇规划、铁路建设、考古调查、矿产开发等;在商用领域,民用无人机可用于新闻采访、商业宣传、电影制作、物流配送等[1]。

据美国权威研究机构 BI Intelligence 最新报道,2015 年到 2020 年期间,轻微型无人机市场年增长率预计将达到 19%,美《航空与太空技术周刊》刊登的分析报告也显示,未来十年,全球无人机市场规模将达到 673 亿美元[2]。可见民用无人机市场潜力巨大,必将向更广阔的领域推广,但同时也会带来严重的安全隐患。在国家安全方面,不法分子会利用无人机侦察军事设施、敏感地区,或将无人机改造成新式袭击的武器。据统计,1995 年至 2017 年,全球针对政要的疑似无人机携带炸药、生化武器的袭击达几百起。在空中航道安全方面,民用无人机违规在机场周边、航线禁区飞行,不仅存在碰撞的危险,其发射的无线电信号也会对民航飞行安全构成严重威胁。在社会秩序方面,无人机在人口密集区飞行,一旦发生坠机,会对群众生命财产安全造成危害,同时,无人机也会对大型集会、体育赛事等公众活动的顺利开展带来多种干扰因素,再次,先进的无人机也被犯罪分子用来将毒品、武器、手机,甚至色情刊物偷运进监狱。因此,在民用无人机给社会发展带来极大便利的同时,做好监管工作也是维护社会稳定、确保公共安全的现实需要。

## 2. 民用无人机使用的无线电信号概述

民用无人机,在遥控飞行模式或者轨迹飞行模式下,均离不开无线电信号的存在。如图 1 所示,无人机使用到的无线电信号主要有数传信号、图传信号、卫星导航信号和其他数据信号等。

### 2.1. 民用无人机使用的数传信号

数传信号是无人机在遥控器远程控制模式下,遥控器与无人机建立的指挥与控制链路所使用的无线

电信号。一般情况下,该链路为双向链路,上行链路遥控器向无人机传输指挥与控制指令等数据,下行链路无人机将相关的飞行信息,如航迹信息、飞行高度、续航电量等数据回传至地面控制站供驾驶员及时掌握。在近距离遥控飞行中,驾驶员在目视视距内进行操作,无人机可以不向遥控器传输相关飞行信息,但上行链路遥控器必须向无人机发送指挥与控制指令。目前我国市场上 90%以上的民用无人机指挥与控制链路都工作在免执照的 ISM 频段,常用的技术制式有跳频扩频(FHSS)、直接序列扩频(DSSS)、WiFi、蓝牙等,其中最常见的是在 2.4 GHz/5.8 GHz 频段的 DSSS/FHSS 或 WiFi 信号。图 2 给出了这种信号的频谱特征,从上方的频谱图可以看出信号的实时频谱。

由于 2.4 GHz, 5.8 GHz 是 ISM 开发波段无需授权、全球通用,此波段有 WiFi、蓝牙、zigbee 等各类设备,目前该波段信号拥挤和环境恶劣,为了保障无人机数传信号,基本上采用抗干扰能力强的扩频通信技术,也就是 DSSS/FHSS 混合双扩频方式,如图 3 所示。

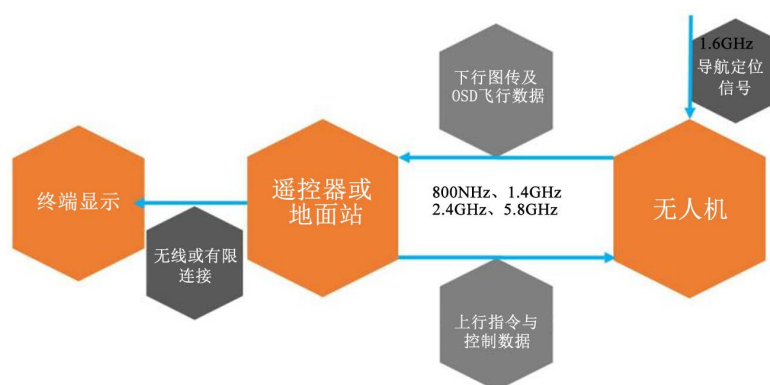


Figure 1. Radio signals used by civilian UAVs

图 1. 民用无人机使用的无线电信号

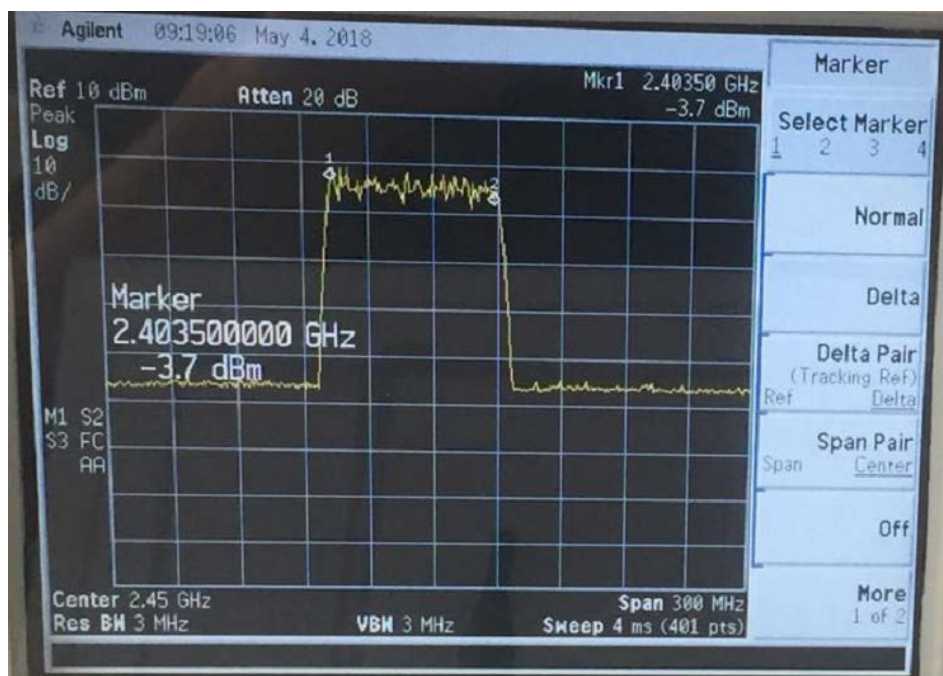


Figure 2. Data transmission of civilian UAV in 2.4 G band

图 2. 在 2.4 G 频段中的民用无人机数传信号

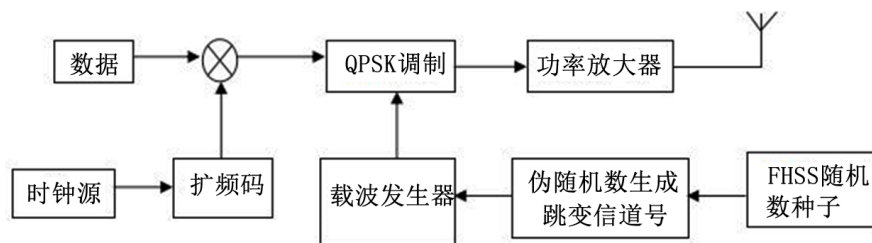


Figure 3. DSSS/FHSS mixed double spread spectrum block diagram  
图 3. DSSS/FHSS 混合双扩频方框图

如图 4 所示, 直接序列扩频(DSSS)不仅抗干扰且由于功率谱密度低, 对其他设备干扰小, 同频容纳多个设备通信, 增加了通信设备数量, 对遥控器而言可以允许更多人同时同场地使用。跳频扩频(FHSS), 通过不停的改变载波使载波均匀布满整个波段来实现频谱扩展。直扩(DSSS)抗干扰, 一旦遇到某个强功率谱信道依然会造成解码失败。跳扩(FHSS)不能抗干扰但可以避干扰, 将两者结合构成混合扩频技术可实现最佳抗干扰。

## 2.2. 民用无人机使用的图传信号

### 2.2.1. 无人机图传信号概述

无人机图传目前主流采用数字图传技术和模拟信号传输技术。模拟图传具有价格低廉、没有延迟、工作距离远的优点。具有易受同频干扰, 画质差等缺点。数字图传技术有 OFDM 技术、WiFi 技术等, 通过 2.4 G 或 5.8 G 的数字信号进行视频传输。具有抗干扰性强, 图像质量高、可靠性高等优点, 具有图像延迟的缺点。

图 5 给出了一种常见的模拟图传信号频谱特征, 可以看到该图传信号中心频率为 5.8 GHz。同时, 较为常见的图传信号还分布在 328 MHz~334 MHz、1200 MHz 频段、2400 MHz 频段等。

### 2.2.2. 图传信号通信体制分析

- OFDM、COFDM 调制技术, 如 DJI Lightbridge 高清图传技术

OFDM 正交频分复用技术是多载波调制的一种, 该技术更适用于高速数据的传输, OFDM 有很多优势, 比如在窄带带宽下也能够发出大量的数据、能够对抗频率选择性衰落或窄带干扰等等。OFDM 也有缺点: 载波频率偏移、对相位噪声和载波频偏十分敏感、峰均比比较高等[3]。

- WiFi 图传技术

WiFi 传输是具有高性价比的无人机图传使用最广泛的技术, 但是因为 WiFi 在技术上有很多限定, 且不可修改的, 并且很多厂家都是拿来方案直接搭建, 所以其缺点也十分突出: 比如芯片设计成什么格式就是什么格式的, 无法修改, 技术比较固化; 干扰管理策略实时性不强; 信道利用率比较低等等。WiFi 传输还有跟物理层的衔接不紧密的缺点, 导致反应不迅速, 传输时延较大, 最多有秒级的时延。

## 2.3. 民用无人机使用的卫星导航信号

民用无人机在飞行过程中, 会利用卫星导航信号实时确定自身位置, 从而实现回传位置状态、调整飞行方向等功能, 因此在预设路径飞行模式下, 无人机可以预先按照设计好的位置信息进行自主导航飞行, 可做到不需要任何遥控操作。在遥控操作模式下, 如果指挥与控制链路信号出现异常中断, 无人机也可以利用卫星导航信号, 启动失效保护模式, 自主控制飞行, 返回起飞地点或就地降落, 确保无人机及周边环境安全。目前绝大多数的无人机都已配备基于美国 GPS 全球定位系统、俄罗斯 GLONASS 系统和中国北斗卫星导航系统三模一体的导航模块, 以提高定位精度和抗干扰能力。



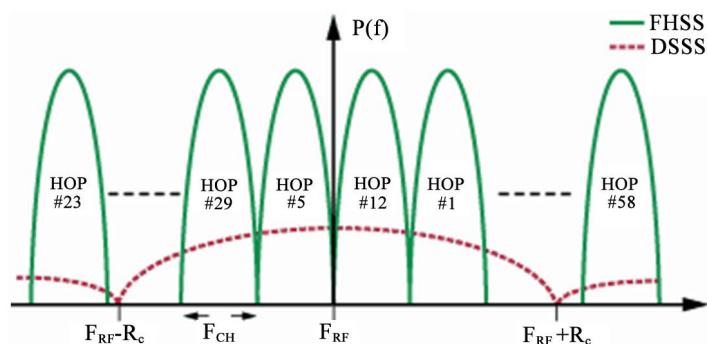


Figure 4. FHSS and DSSS brief introduction

图 4. FHSS 与 DSSS 简介

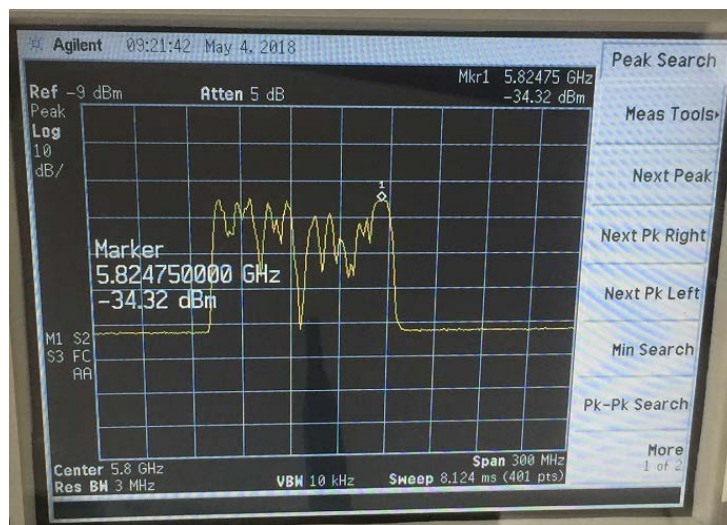


Figure 5. Signal transmission for civilian UAV in 5.8 G band

图 5. 在 5.8 G 频段中民用无人机图传信号

无人机利用导航信号实现以下功能：

- 确定自身位置信息，并回传位置状态；
- 调整飞行方向；
- 预设路径模式下，自主导航飞行；
- 遥控操作模式下，启动失效保护模式。

#### 2.4. 民用无人机使用的其他数据信号

随着“民用无人机行业应用”模式的广泛应用，当无人机用于测绘、遥感等特定工作时，还会向地面发射特定的测试数据信号，此类信号与无人机自身飞行无关，根据不同的行业应用有不同的信号特点。

### 3. 基于无线电技术的无人机发现、定位

如图 6 所示，基于无线电技术的无人机发现、定位可分为三个步骤：

第一步，利用无人机数传信号与图传信号，提取无人机频谱的特征，建立无人机的特征库，实现对无人机的发现；

第二步，利用无线电技术，如无线电监测测向技术、TDOA 定位技术，实现对无人机的定位；

第三步，利用无线信道阻塞技术，阻断无人机的遥控及图传信号，使无人机迫降或者返航，利用导航诱导技术，达到接管、控制其无人机飞行的目的，实现对无人机的管控。

### 3.1. 基于无线电技术的无人机发现

如图 7 所示，基于无线电技术的无人机发现过程如下：

1) 无人机频谱特提取、建立无人机特征库：利用无人机数传信号与图传信号的频谱特征，可以使用无线电技术对一定范围内的无人机进行侦测发现。随着信号处理软硬件能力的飞速提升，目前技术手段已可以做到通过采集分析信号的频率、带宽、调制方式、符号率、跳变参数等数据，对信号进行特征识别，从而得出所采集频段范围内的无人机信号。

2) 建立频率模板：通过提前对指定区域的电磁环境进行监测来形成频率模板，对于获得使用授权的无人机，可通过开机建立通信链路的方式，使系统完成对其信号的采集分析和识别，将其信息添加至频率模板中。当有与频率模板特征不符的新增信号出现时，系统会对该信号进行分离与采集，然后进行信号处理与分析，如结果与无人机信号特征吻合，便可以快速作出预警警告。通过这种方式，最快可以在无人机开机起飞前侦测发现，将可能存在的隐患降到最低。

3) 信号解调：对于存在图传链路的无人机，还可通过对未加密图传信号的解调，从而观察到无人机实时传输的图像信息，协助识别无人机用户信息。

### 3.2. 基于无线电技术的无人机定位

#### 3.2.1. 无线电监测测向技术

无线电测向是依据电磁波传播特性，使用仪器设备测定无线电波来波方向的过程。测定“来波方向”，是指测向机所在地实在的电磁环境中电波达到的方向，无线电测向，通常的最终目的是要确定“辐射源的方向”和“辐射源的具体位置” [4]。

无人机测向技术是利用阵列测向天线对无人机信号进行测向。监测系统一般由 3D 测向天线、实时频谱仪和监测软件组成。3D 测向天线接收实时测量无人机电磁发射的信号方向，从而侦测入侵的未知无人机。

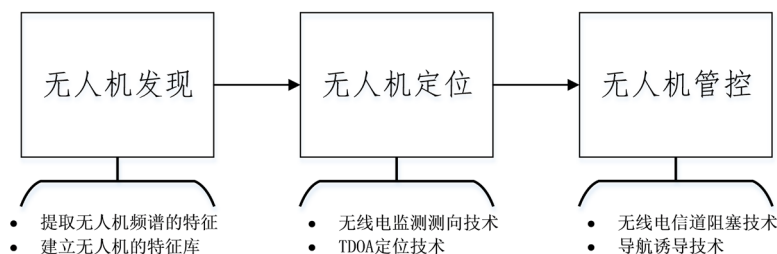


Figure 6. Radio based UAV discovery and location steps

图 6. 基于无线电技术的无人机发现、定位步骤

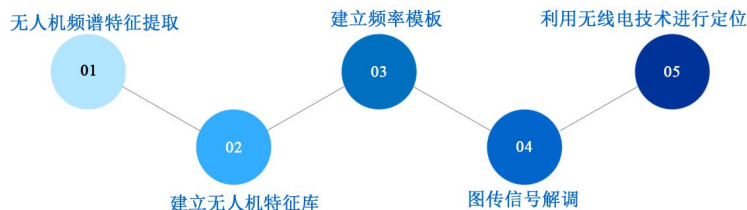


Figure 7. UAV discovery process based on radio technology

图 7. 基于无线电技术的无人机发现过程

如图 8 所示, 3D 测向天线由 8~64 个阵列组成, 频率范围(9 kHz~40 GHz), 提供高性能实时信号监测和测向, 以及关键区域频谱信息。

### 3.2.2. TDOA 定位技术

TDOA 是一种利用时间差进行定位的方法, 通过测量信号到达监测站的时间, 可以确定信号源的距离。利用信号源到多个无线电监测站的距离(以无线电监测站为中心, 距离为半径做圆), 就能确定信号的位置。通过比较信号到达多个监测站的时间差, 就能做出以监测站为焦点、距离差为长轴的双曲线, 双曲线的交点就是信号的位置。

TDOA 是基于多站点的定位系统, 因此要对信号进行定位必须有至少 3 个以上的监测站同时测量, 如图 9。而每个监测站的组成则相对比较简单, 主要包括接收机, 天线和时间同步模块。

TDOA 具有以下优点:

- TDOA 不存在相位模糊的问题, 因此测向基线可以不受限制。传统的测向方法需要通过相位来计算方向角, 而相位测量存在  $2\pi$  周期的不确定性, 所以往往利用天线基线小于信号波长的方法来避免  $2\pi$  周期的回绕。但是高频信号的波长短, 使得测试天线的距离较近, 容易产生信号耦合, 使得测量产生误差。而每个 TDOA 监测站只需一个天线, 从根本上解决信号耦合问题。

- TDOA 系统复杂度低。对于 TDOA 监测站, 只需配置监测天线和接收机即可, 对于天线的要求不高, 即便不同的监测点用不同的天线也没有关系。而测向天线本身就是一组天线组成的天线阵列, 并且阵列中各个天线的性能尽可能保持一致, 否则会对测向的精确度带来影响, 从而使系统成本较高, 不利于广泛开展监测。

- TDOA 系统定位的精度较高。对于 TDOA 监测站而言其定位精度取决于时间测量的准确度。通过优化后的算法, 时间差的计算误差在 100 ns 量级, 从定位的准确度来说大约是 30 m。

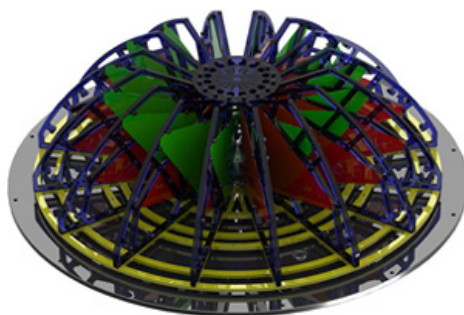


Figure 8. 3D direction finding antenna

图 8. 3D 测向天线

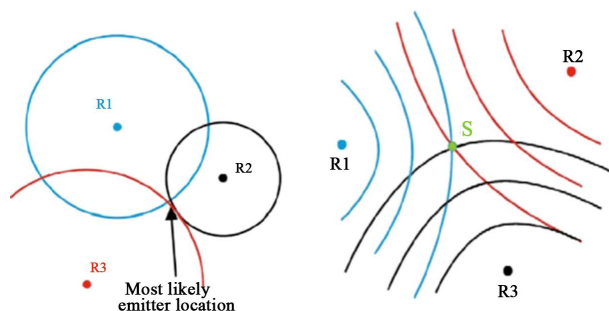


Figure 9. TDOA positioning technology

图 9. TDOA 定位技术

### 3.3. 基于无线电技术的无人机管控

#### 3.3.1. 利用无线电阻塞技术

在完成发现及定位后，用无线电技术手段进行应对的关键点在于切断遥控器与无人机的通信链路，迫使无人机进入失效保护模式，从而自主返回起飞点或就地降落。在此过程中有种暴力的无线电管控手段，即以大功率信号为能量源，向目标发射设备，暴力阻断无人机的飞行，此方法由于对周边环境污染过大，不建议推广应用，仅在特殊场景中授权使用。从绿色环保的角度可针对目标信号本身特征，利用软件无线电技术产生有针对性的目标信号，从而实现小功率、精准的绿色手段。对于固定频点的传输信号，使用传统手段在相同频点释放干扰信号进行技术性阻断即可。对于 FHSS/DSSS 信号，由于其每一个单独时隙的信号都包含了完整的控制信息，可结合识别的信号特征和跳频参数，对每一个时隙相对应的频点分别进行阻断，这样可以减小设备功耗，更为重要的是不会对其他无线电设备产生干扰，如 ISM 频段内大量存在的 WiFi、蓝牙等。如果无人机处于预设路径飞行模式，无人机理论上可以做到与地面遥控站不进行任何形式的数据传输，仅依靠卫星导航信号飞往预设地点，因此只能对无人机接收到的卫星导航信号进行技术性阻断，特别要强调的是，这种情况下应选用方向性强的定向天线，以尽量减少对其他设备卫星导航装置的影响。

#### 3.3.2. 利用无线电导航信号诱导技术

在特定授权情况下，针对卫星导航信号，还可以采取导航定位诱导技术，通过对无人机释放预设卫星导航信号，迫使其偏离预定航线、飞往预设区域，从而达到接管、控制其飞行的目的，这也是实现无线电管控的重要手段。

## 4. 基于无线电技术的民用无人机侦测与管控系统

### 4.1. 系统组成

无人机侦测系统主要由方位侦测站、高度侦测站以及控制中心构成，如图 10。部署单套方位侦测站可实现方位测量；部署 2 套方位侦测站可实现交汇定位；部署 3 套侦测站(2 套方位侦测站和 1 套高度侦测站)可实现无人机交汇定位和高度测量。系统对外无电磁辐射，在电磁环境敏感区域，也能安全部署。

无人机侦测系统是通过探测无人机图传和遥控信号来实现对无人机的探测，采用了指纹识别技术、宽带快速测向技术、标准粒子估计算法、质心定位算法等多项先进的无线电频谱监测技术，系统以高达 300 GHz/s 的扫描速度进行数据采集，从复杂的频谱数据中对微弱的无人机信号参数信息进行提取、判别，



Figure 10. System composition

图 10. 系统组成



自动输出信号频率、电平值等结果数据, 并对该信号进行测向, 再通过聚类算法综合判别进行取向。当联动多站时, 可实现精准、连续交汇定位, 绘制无人机飞行轨迹。另外, 系统通过综合数据分析, 能识别多架无人机。

## 4.2. 主要功能

- 1) 具有对无人机信号的快速自动侦测发现、识别、定位跟踪的功能;
- 2) 能测量目标无人机经纬度、高度等参数;
- 3) 具有无人机信号检测频谱显示功能;
- 4) 具有基于地理信息系统的飞行轨迹描绘及回放功能;
- 5) 可设置预警范围, 对非法入侵无人机告警;
- 6) 多架无人机的多目标识别能力;
- 7) 可自动引导管制设备, 对非法无人机强制返航或迫降。

## 4.3. 总结

该系统以无人机监测车为中心, 设备体积小, 架设方便, 不仅能定位无人机, 还可快速追踪定位无人机的操控者。系统界面既能直观地在地图上展示无人机飞行轨迹, 也能实时显示信号频谱等特征数据, 针对探测结果, 必要时利用压制设备对非法无人机进行处置。

## 5. 结束语

民用无人机凭借其成本较低、灵活机动、覆盖面广的特点, 在诸多行业应用广泛, 迅速发展, 同时也带来了一定安全隐患。本文通过分析我国民用无人机管控现状, 从无线电技术角度出发, 结合实测数据, 逐一分析了民用无人机使用过程中所用到的四大类无线电信号特征, 包括其涉及频段、调制方式、频谱特征等技术特点。在此基础上加以利用, 提出了使用无线电信号处理技术对无人机进行侦测发现、使用测向或 TDOA 定位方法对操作员或无人机进行精确定位、使用技术性阻断方式对无人机通信链路或卫星导航信号进行针对性干扰的软介入方法, 从而实现对民用无人机的无线电管控, 形成了一套基于无线电技术的民用无人机侦测与管控系统, 使无线电技术在民用无人机管控中发挥积极的促进作用。

## 基金项目

十三五国家重点研发计划“公共安全风险防控与应急技术装备”重点专项“重要场所安全保卫关键技术研究”的“暴狱、脱逃行为检测技术与应用示范”课题(课题编号: 2016YFC0800405)。

## 参考文献

- [1] 中国民用航空局飞行标准司. 轻小无人机运行规定(试行) [Z]. 2015-12-29.
- [2] 石红梅. 国外无人机监管及反制技术最新发展概况[J]. 环球安防, 2016(4): 100-105.
- [3] 何煦. 对低空小型无人机的对抗方法研究[J]. 中国新通信, 2016(15): 147-149.
- [4] Zhou, Y.Z. (2016) Coexistence Analysis of Civil Unmanned Aircraft Systems at Low Altitudes. *Frequenz*, **70**, 539-546.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2161-8801，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[csa@hanspub.org](mailto:csa@hanspub.org)