

反无人机设备的灵巧干扰与协同诱偏技术研究

李少鹏¹ 费香邦²

上海航天电子技术研究所 201108

【摘要】文章主要针对反无人机设备的灵巧干扰和协同诱偏技术开展研究,梳理了无人机导航和通信链路的主要特点,分析了灵巧干扰和协同诱偏的基本原理和优势,设计了基于软件无线电(SDR)的灵巧干扰系统架构,并优化了干扰信号的生成算法,实现对无人机调频和扩频等抗干扰链路的精准性压制。而后,创建了多节点的协同诱偏体系,提出了基于分布式一致性控制的协同对策,以此解决单点诱偏覆盖范围和精度不足的问题,实现对无人机航迹的精准诱导,以期给反无人机设备的工程化应用提供更多参考。

【关键词】反无人机设备; 灵巧干扰; 协同诱偏; 分布式控制; 低空安防

Research on Agile Interference and Collaborative Deviation Techniques for Anti-UAV Systems

Li Shaopeng¹ Fei Xiangbang²

Shanghai Aerospace Electronic Technology Research Institute 201108

【Abstract】This study focuses on agile interference and collaborative deviation techniques for anti-UAV systems. It examines the key characteristics of UAV navigation and communication links, analyzes the fundamental principles and advantages of agile interference and collaborative deviation, designs an agile interference system architecture based on Software-defined Radio (SDR), and optimizes the interference signal generation algorithm to achieve precise suppression of UAV frequency modulation and spread spectrum interference channels. Furthermore, a multi-node collaborative deviation system is established, employing a distributed consensus control-based coordinated strategy to address limitations in single-point deviation coverage range and accuracy, thereby enabling precise trajectory guidance for UAVs. The findings provide valuable references for the engineering application of anti-UAV technologies.

【Key words】Anti-drone equipment; Agile jamming; Collaborative deviation induction; Distributed control; Low-altitude security

近几年,商用和微型的无人机广泛地应用在航拍、物流和农业等领域中,但是,一些滥用也带来了较为严重的安全隐患。如非法入侵到机场的净空区域、刺探敏感的设施、实施恐怖袭击等事件频频发生,这也迫使各个国家加快的创建高效、低成本且低附带损伤的反无人机的体系。传统的防控雷达很难有效地探测到雷达的实际截面积(RCS) $<0.01\text{m}^2$ 的“低慢小”的目标,但动能拦截和激光损伤成本较高且法律风险较大。在这样的背景之下,用灵巧干扰和协同诱偏的软杀伤技术应运而生。灵巧干扰突破了传统噪声的压制模式,使用智能信号重构了实现精准欺骗。而协同诱偏则借助多节点时空协同来强化干扰的效能,二者的融合形成了现代电子对抗的主要范式。

一、相关技术原理

(一) 无人机核心链路特性

无人机运行主要借助导航和通信这两个链路,其信号的特点也决定了反制技术的设计方向。

导航链路主要包含卫星导航和惯性导向,其中卫星导航是主要的定位方法,其信号功率比较低且调制较为稳定,容易被干扰和欺骗。而惯性导航的自主性比较强,不会受到电磁的干扰,但是存在着累积误差,常常和卫星导航组合使用,

增加了诱偏的难度。通信链路主要负责无人机和地面站在指令上的传输和数据上的交互,并分为遥控和图传链路,其中,遥控链路主要使用跳频和扩频等调制方法,有些新型的无人机会使用MIMO技术和隐藏的频点,抗干扰的能力比较强,而图传链路则多使用OFDM调制,传输的速率比较高但是抗干扰的能力比较弱,容易被压制^[1]。

(二) 灵巧干扰技术原理

灵巧干扰是基于软件无线电结构的智能化的干扰技术,使用“感知-分析-调整-干扰”的闭环控制方式。其和传统的全频段的压制干扰是不同的,其借助实时感知无人机信号的特点,生成了针对性的干扰信号,有着低功耗、高效能和电磁兼容性能较好的等优势。其主要的技术包含三个模块:1.信号感知模块。其会捕获无人机导航和通信的信号,并提取频率、调制的参数和跳频的周期等特点;2.干扰信号生成模块。其会生成欺骗式的或者压制式的干扰信号,前者会误导无人机的控制系统,后者则会阻断链路的传输。3.自适应调整模块。其会实时的监测干扰的效果,并动态的调整干扰的参数,以便应对无人机抗干扰的行为。灵巧干扰的方式针对性强,不会干扰到周边的民用设备,有着较好的动态自适应,可以跟踪跳频和扩频等的抗干扰技术。功耗比较低,仅为传统的压制干扰的1/10-1/5,有着较强的可扩展性,借助软件升级就可以反制新型的无人机。

(三) 协同诱偏技术原理

协同诱偏技术主要是借助多台诱偏设备之间的协同工作, 创建区域化的虚假导航信号场, 诱导无人机偏离预设的航迹, 以此解决单节点诱偏覆盖范围较为有限、精度不足及容易被识别等问题。

其基本技术原理为: 多台的诱偏设备借助分布式的通信网络来实现信息的同步, 按照目标无人机的实时位置与运动的轨迹, 协同地生成与真实卫星导航信号特点高度一致的虚假的信号。借助功率的渐变来控制波束的赋形技术, 让虚假的信号能够在目标区域中的强度高于真实的信号, 使得无人机接收到错误的导航信息并自主地调整飞行的轨迹^[2]。该技术的主要要求为: 1. 信号同步。多个节点所生成的虚假信号在频率、相位和时序上要保持一致; 2. 协同对策。按照无人机的实际运动状态来动态的分配诱偏的任务, 优化信号功率和实际的覆盖范围。分布式的协同是基于多智能体一致性的孔子算法, 并不需要中央孔子器, 抗干扰的能力较强且扩展性好, 较为适用于复杂的场景中。

二、灵巧干扰系统设计

(一) 系统总体架构

基于软件无线电(SDR)的结构, 设计反无人机的灵巧干扰系统, 其整体上分为信号感知模块、信号分析模块、干扰信号生成模块、自适应控制模块和发射模块这5个部分。每个模块之间是协同工作的, 以期实现对无人机信号的精准化感知、分析与干扰, 以此保证干扰的效能和电磁的兼容性^[3]。

1. 信号感知模块。该模块使用宽带来接收天线和高速的ADC转换器, 接收的频率会覆盖无人机较为常用的导航和通信的频段, 捕获无人机的信号和遥控及图传的信号, 把这些信号转换成数字的信号, 上传到信号分析的模块中。该模块使用多传感器相互融合的模式, 以此提升信号的捕获灵敏性和稳定性, 并降低复杂电磁环境之下信号的误检率。

2. 信号分析模块。该模块主要基于数字信号处理(DPS)技术, 对所接收的数字信号开展特点的提取和分析, 主要包含信号的频率、调制的方式、跳频的序列和功率的强度等参数。对于跳频信号, 会使用基于混沌调制的信号识别算法, 以便快速地解析跳频的周期和跳频的图谱。对于扩频的信号, 会使用匹配滤波的算法来提取信号的特点, 以便实现对不同类型无人机信号的精准性识别。

3. 干扰信号生成模块。基于SDR的平台, 使用FPGA+DSP的硬件架构, 按照信号分析的结果, 生成最为适配的干扰信号。对于导航链路, 会生成欺骗式的干扰信号, 借助篡改卫星导航信号的实际位置信息来误导无人机的定位。对于通信链路, 会按照信号的类型来选择压制式或者欺骗式的干扰方式。对于遥控链路会使用跳频跟踪干扰的方式, 对于图传的链路会使用窄带的压制干扰方式, 以此保证干扰的信号更有针对性和有效性。该模块可以多频段同时地

进行干扰, 可以保证同时应对多架无人机的入侵。

4. 自适应控制模块。该模块会实时地监测干扰的效果, 借助接收无人机的实时反馈信号, 动态地调整干扰信号的功率、频率和调制方式等参数。使用强化学习(DDPG)的算法, 创建干扰效果的评估模型, 按照环境变化和无人机抗干扰的行为, 自动化的干扰对策来实现干扰效能的最大化, 并降低设备的能耗, 保证干扰的信号不会影响周边的一些民用的通信设备。

5. 发射模块。该模块使用定向的发射天线, 把干扰的信号精准的投射到目标的区域中, 控制干扰信号的实际覆盖范围, 以此减少电磁的污染。

(二) 核心算法优化

1. 跳频信号跟踪干扰算法

对于无人机遥控链路较为常用的跳频(FHSS)技术, 传统的干扰算法有着跟踪速度慢且干扰效能低的问题, 文章则技术改进粒子滤波的跳频信号跟踪干扰算法, 实现了对跳频信号的快速跟踪和精准的干扰。

算法的主要步骤为: ①信号的预处理。对于所接收的跳频信号开展去噪处理, 使用小波阈值去噪的算法来去掉环境的噪声和干扰的信息, 以此提升信号的纯净度。②跳频序列估计。基于粒子滤波的算法, 初始化粒子集, 把跳频的频率作为状态的变量, 按照信号的特点来更新粒子的权重, 借助重采样的机制, 去掉无效的粒子, 以此提升跳频序列的实际估计精度。③干扰信号生成。按照之前估计的跳频序列, 生成和跳频信号同步的干扰信号, 使用“频率跟随”的对策, 实时的跟踪跳频信号在频率上的变化, 以此保证干扰信号能够始终覆盖到目标的跳频点。④自适应调整。借助监测干扰的效果, 动态化地调整干扰信号的功率和调制的方法, 以便应对无人机的跳频对策调整, 保证干扰的效能。

2. 导航欺骗干扰信号生成算法

对于无人机的卫星导航链路, 设计基于三维参数精准控制的导航欺骗干扰信号生成算法, 其生成和真实的卫星信号“时-频-相”特点高度一致的虚假信号, 以便提升诱偏的成功率。算法主要借助对于卫星导航作用机理的深度分析与定位导航滤波逆过程的数学推导, 获得导航欺骗的信号功率、频率和相位的三维精度高的投送模型, 具体实现过程为:

①真实信号的采集解析。采集到卫星的导航信号, 并解析信号的频率、相位和码率等参数, 创建真实的信号模型; ②虚假信号参数设计。按照诱偏的目标, 设计出虚假的导航信号的位置和速度等参数, 以此保证虚假信号和真实信号在特点上没有差距; ③信号的调制和申城。使用正交调制技术, 把虚假的参数调制到卫星导航的频段中, 以此生成虚假的导航信号, 借助控制功率, 保证虚假信号能够在目标的区域中覆盖的强度高于真实的信号。④信号校准。借助实时的监测虚假信号在传输上的误差, 对于信号的相位和频率开展动态化的校准, 保证虚假的信号能够更为稳定且准确。

三、协同诱偏体系构建

(一) 协同诱偏总体架构

构建分布式的架构方式,并由多个诱偏节点和通信链路及控制中心一同组成,整体分为感知、协同和执行三层,实现对无人机的精准诱偏和区域化的覆盖。

1.感知层。该层主要由各个诱偏节点的信号感知模块所组成,主要的功能为无人机探测和环境的感知。使用GPS/北斗定位和雷达的探测技术,实现了 $\leq 1\text{m}$ 的无人机定位精度,并监测周边的电磁环境。通过多源数据融合技术,整合了雷达、光学和声学等的探测信息,有效地降低漏检和误检率,给协同诱偏的对策制定提供更多数据支持。

2.协同层。由控制中心和通信链路所组成,主要负责多节点的信息同步和协同决策。其控制中心使用分布式的控制架构方式,借助5G/Wi-Fi无线链路来实现各个节点之间的无人机位置、诱偏参数等数据的实时交互。基于无人机运动状态动态地分配诱偏的任务,以此优化信号的覆盖范围和功率的实际分配,避免出现信号的冲突。

3.执行层。主要由各个节点的信号生成和发射模块所组成,主要负责虚假导航信号的生成与投射,按照协同对策生成和真实卫星信号特点相一致的虚假信号,借助定向天线创建区域化的诱偏场。各个节点均可以动态地调整诱偏信号的功率、频率和相位等的参数,以此保证多个节点信号的同步性和一致性,进而实现对于无人机的精准航迹的诱导。

(二) 协同控制策略优化

对于现有的协同诱偏协同同步精度较低且策略僵化的问题,基于改进分布式的一致性协同对策,结合领导者-追随者的模型,显著地提升诱偏的精度和覆盖范围。

1.动态节点角色分配。使用领导者-追随者的结构方式,按照节点的位置和性能动态地分配角色。其中,领导者的节点主要负责获取无人机的实时状态并制定整体的诱偏对策,追随者节点则会按照指令来调整自身的参数。引入这一选择机制,会按照通信质量和探测的精度来实时地更新领导者,避免单一阶段的故障进而导致整个系统失效,提升整体的鲁棒性。

2.高精度信号同步控制。使用精确时间协议(PTP)来实现多个节点信号在频率、相位和时序上的同步,精度 $\leq 1\mu\text{s}$,以此有效地避免出现信号的冲突。并提出同步误差补偿的算法,实时地监测并动态地修正信号的行为和频率的偏差,以此保证虚假导航的信号能够连续且稳定,进而提升无

人机对于虚假信号的实际接收效率。

3.动态诱偏对策优化。基于无人机运动的堆积和速度,使用粒子群优化(PSO)算法动态化地分配各个节点的实际诱偏功率与覆盖的范围,让诱偏场能够和无人机的运动轨迹精准地匹配在一起。在无人机靠近的时候提升周边节点的实际功率,偏离的时候则调整相关参数来引导其飞向预设的区域中。

4.强抗干扰机制。实时地监测周边的电磁环境,借助自适应滤波算法来过滤掉外部的干扰,以此保证诱偏信号的稳定性。使用加密通信技术来保护协同指令在传输上的安全,防止对策被破解。

(三) 灵巧干扰与协同诱偏协同机制

为了能够充分发挥两种技术的诸多优势,创建了“干扰-诱偏-捕获”一体化的协同反制的介质,以此显著地提升反无人机的综合效能,主要分为三个阶段:

1.协同探测识别。灵巧干扰系统的信号感知模块挥着协同诱偏体系中的感知层协同工作,借助多源数据的融合技术来捕获无人机的信号特点和实时的位置,进而精准地识别无人机的类型、运动的状态和抗干扰的能力,给后续的反制对策的制定提供更多依据,并降低漏检和误判的概率。

2.精准干扰压制。灵巧干扰系统会针对无人机通信和导航链路开展差异化的精准化干扰:对于普通的无人机会使用窄带压制的干扰方式来降低能耗;针对抗干扰能力比较强的无人机,会结合跳频跟踪干扰和导航欺骗干扰来保证其效能。借助压制遥控和图传功能并降低卫星导航的精度,会让无人机失去地面的控制,进而给后续的诱偏创造最佳条件。

3.协同诱偏捕获。协同诱偏体系会启动多个节点的工作,进而生成虚假的导航信号来创建区域化的诱偏场,以便诱导已经失去控制的无人机飞入制定的区域。在这一过程中,灵巧干扰系统会持续地监测无人机的实际状态并动态地调整其干扰的参数,防止其恢复自身控制。协同诱偏体系也会按照无人机轨迹来实时的优化对策。

结束语

文章对于传统的反无人机技术存在的覆盖不足、精度偏低及附带损伤较大等问题,提出了基于软件无线电的灵巧干扰系统,并创建了多节点且分布式的协同诱偏体系,提出了相对应的主要算法和协同的控制对策,希望能够给低空安防领域的软杀伤反无人机装备的研发提供更多参考。

参考文献

- [1]康佳兴. 基于射频指纹的反无人机技术在石化厂区的应用研究[J].无线互联科技,2026,23(05):39-43.
- [2]王栋,赵洁,刘洋,等. 多模态反无人机检测系统与技术[J].中国科学基金,2026,40(01):73-84.
- [3]单兴霞. 低空经济视域下反无人机无线电干扰问题研究[J].江苏通信,2026,42(01):67-69+79.