

西安电子科技大学

硕士学位论文



多无人机协同复合干扰航路规划方法研究

作者姓名 沙兆群

指导教师姓名、职称 刘聪锋 副教授

申请学位类别 工学硕士

学校代码 10701
分 类 号 TN97

学 号 1602120671
密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文

多无人机协同复合干扰航路规划方法研究

作者姓名：沙兆群

一级学科：电子科学与技术

二级学科：电路与系统

学位类别：工学硕士

指导教师姓名、职称：刘聪锋 副教授

学 院： 电子工程学院

提交日期：2019 年 6 月

Research on Route Planning Method for Multi-UAVs Cooperative Complex Jamming

A thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master
in Circuits and Systems

By

Sha Zhaoqun

Supervisor: Liu Congfeng Title: Associate Professor

June 2019

摘要

随着信息技术的持续发展，无人机在电子战中的重要性逐渐凸显，它能够代替有人驾驶飞机在危险的环境下执行多种作战任务。在当今互联互通、数据共享的一体化防空体系下，单架电子战无人机的干扰能力是极为有限的，只有多架电子战无人机相互协作，共同对敌进行干扰才能更好地达到预期的干扰效果。而无人机航路规划技术是无人机实现自主飞行、智能导航与安全飞行的基础与关键。因此，研究多机协同复合干扰航路规划方法就显得尤为重要。

首先，分析了电子战无人机的作战应用。介绍了无人机的结构及特点，并描述了电子战无人机执行的主要作战任务。探讨了电子战无人机在空袭中的作战运用，包括佯装攻击、掩护干扰、分布式干扰以及引诱干扰。总结了电子战无人机的发展趋势。

然后，研究了多机协同复合干扰航路规划方法，该方法将假目标欺骗干扰与噪声压制干扰相结合，从而保障了实施欺骗干扰的电子战无人机的安全性，提高了在雷达组网环境下假目标航迹的可信度。推导了包含 7 种飞行参数约束的无人机航路规划最优控制模型。给出了两种不同的代价函数，认为在不同情况下可以按需灵活地选择不同的代价函数对无人机航路进行规划。通过 Matlab 仿真求解了在两种不同的代价函数下，所有电子战无人机在干扰任务中的飞行航路及相应的运动参数，并对结果进行了分析，验证了多机协同复合干扰航路规划方法的有效性。

最后，研究了多场景下电子战无人机进行干扰任务时的航路规划问题。提出了针对组网雷达的多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰方法，该方法具有实际意义，提高了无人机在巡弋与搜索阶段的安全性。在直角坐标系下提出了单机欺骗干扰单架预警机的数学模型，并推导了无人机发射干扰信号的频率公式及时延公式，以达到欺骗敌方预警机、掩护我方作战舰船的目的。设计了多机协同复合干扰敌方多架预警机的方法，并推导出相应的无人机航路规划最优控制模型。对上述三种情况下全部无人机的干扰航路与飞行参数进行了 Matlab 仿真，验证了相应方法的有效性。

关键词：无人机， 协同干扰， 航路规划， 组网雷达， 代价函数， 最优控制

ABSTRACT

With the continuous development of information technology, the importance of unmanned aerial vehicle(UAV) in electronic warfare(EW) has become increasingly prominent. It can replace manned aerial vehicle to perform a variety of combat tasks in dangerous environments. Nowadays, because of the integrated air defense system with interconnection, intercommunication and data sharing, the jamming capability of single electronic warfare UAV is extremely limited. When multiple electronic warfare UAVs cooperate with each other to jam the enemy, the effect of expected jamming can be achieved. In addition, UAV route planning technology is the basis and key to realize autonomous flight, intelligent navigation and safe flight. Therefore, it is particularly important to study the route planning method of multiple UAVs cooperative complex jamming.

Firstly, this thesis analyzed the operational application of electronic warfare UAVs. Introduce the structure and characteristics of UAV and describe the main tasks of electronic warfare UAVs. The operational application of electronic warfare UAVs in air attack is discussed, including feigned attack, cover jamming, distributed jamming and decoy jamming. And the development trend of electronic warfare UAVs is summarized.

Then, this thesis studied the route planning method of multi-aircraft cooperative deception jamming. This method combines false target deception jamming with noise suppression jamming, which ensures the security of deception jamming UAVs and improves the reliability of false target track in the environment of radar networking. The optimal control model of UAV route planning with seven kinds of flight parameters constraints is deduced. Two different cost functions are proposed. It is considered that different cost functions can be flexibly chosen to plan UAV route in different situations. The flight route and corresponding motion parameters of all electronic warfare UAVs under two different cost functions are simulated with MATLAB. The results are compared and analyzed, and the validity of the route planning algorithm of multi-aircraft cooperative complex jamming is verified.

Finally, this thesis studied the route planning problem of electronic warfare UAVs which

are in jamming mission in multiple situations. Design a method of multiple electronic warfare UAVs cooperative jamming in cruising and searching phases for netted radar system. This method has practical significance and improves the security of electronic warfare UAVs in cruising and searching phases. In Cartesian coordinate system, propose the mathematical model of single aircraft deception jamming single early warning aircraft(EWA), the frequency formula and delay formula of the interference signal, which can deceive the enemy early warning aircraft and cover our warships. The method of multiple electronic warfare UAVs cooperative jamming multiple enemy EWAs is designed, and the corresponding optimal control model of UAV route planning is derived. The effectiveness of the jamming route planning method for all UAVs under the above three conditions is verified with MATLAB.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, Cooperative jamming, Route planning, Netted radar, Cost function, Optimal control

插图索引

图 2.1 电子战无人机佯攻干扰示意图	11
图 2.2 电子战无人机掩护干扰示意图	12
图 2.3 电子战无人机分布式干扰示意图	13
图 2.4 电子战无人机协同火力摧毁示意图	14
图 3.1 脉冲雷达测距原理示意图	19
图 3.2 单欺骗干扰无人机干扰单部雷达位置关系示意图	24
图 3.3 多机协同复合干扰作战任务模型	29
图 3.4 协同航迹欺骗时假目标状态转换	29
图 3.5 噪声压制干扰无人机位置关系示意图	30
图 3.6 单机欺骗干扰单部雷达示意图	37
图 3.7 电子战无人机控制量变化曲线	38
图 3.8 电子战无人机速度变化曲线	39
图 3.9 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	39
图 3.10 文献[14]模型航路规划示意图	40
图 3.11 单机欺骗-单机压制示意图	41
图 3.12 电子战无人机控制量变化曲线	42
图 3.13 电子战无人机速度变化曲线	42
图 3.14 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	43
图 3.15 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时多机协同复合干扰组网雷达示意图	44
图 3.16 电子战无人机控制量变化曲线	45
图 3.17 电子战无人机速度变化曲线	45
图 3.18 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	46
图 3.19 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰组网雷达示意图	46
图 3.20 电子战无人机控制量变化曲线	47
图 3.21 电子战无人机速度变化曲线	48
图 3.22 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	48
图 4.1 多无人机定高飞行下对组网雷达的复合干扰示意图	52
图 4.2 无人机和假目标做定高飞行的运动关系	53
图 4.3 巡弋与搜索阶段多机协同复合干扰多部雷达	57
图 4.4 假目标和 4 架无人机速度	57

图 4.5 假目标和 4 架无人机航迹偏角	58
图 4.6 单机欺骗干扰敌方单架预警机	59
图 4.7 某时刻预警机、欺骗干扰无人机与假目标位置关系示意图	60
图 4.8 任意时刻无人机欺骗干扰预警机示意图	64
图 4.9 单机欺骗干扰单架预警机	67
图 4.10 电子战无人机控制量变化曲线	68
图 4.11 电子战无人机速度变化曲线	69
图 4.12 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	69
图 4.13 无人机干扰信号控制参数	70
图 4.14 多机协同复合干扰敌方多架预警机	71
图 4.15 某时刻预警机、压制干扰无人机与欺骗干扰无人机位置关系示意图 ...	72
图 4.16 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时多机协同复合干扰多架预警机	77
图 4.17 电子战无人机控制量变化曲线	78
图 4.18 电子战无人机速度变化曲线	78
图 4.19 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	79
图 4.20 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数	79
图 4.21 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰多架预警机	80
图 4.22 电子战无人机控制量变化曲线	81
图 4.23 电子战无人机速度变化曲线	81
图 4.24 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线	82
图 4.25 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数	82

表格索引

表 3.1 无人机干扰雷达时飞行参数约束	37
表 3.2 两种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率	49
表 3.3 两种代价函数下电子战无人机的平均速度	49
表 4.1 无人机干扰预警机时飞行参数约束	67
表 4.2 两种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率	83
表 4.3 两种代价函数下电子战无人机的平均速度	83

符号对照表

符号	符号名称
u_1	加速度
u_2	航迹偏角变化率
u_3	航迹倾角变化率
v	速度
α	航迹偏角
β	航迹倾角
θ	俯仰角
ϕ	方位角
$\dot{\theta}$	航迹偏角变化率
$\dot{\beta}$	航迹倾角变化率

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机
EW	Electronic Warfare	电子战
UCAV	Unmanned Combat Aircraft Vehicle	无人作战飞机
ECAV	Electronic Combat Air Vehicle	电子战飞行器
EWA	Early Warning Aircraft	预警机

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
插图索引	V
表格索引	VII
符号对照表	IX
缩略语对照表	XI
目录	XIII
第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 研究与发展现状	2
1.3 论文内容与安排	4
第二章 电子战无人机的应用分析	7
2.1 无人机的结构及特点	7
2.2 电子战无人机的作战任务	7
2.2.1 电子侦察	8
2.2.2 电子攻击	8
2.2.3 电子防御	10
2.3 电子战无人机在空袭中的作战运用	10
2.3.1 佯装攻击	10
2.3.2 掩护干扰	12
2.3.3 分布式干扰	13
2.3.4 引诱干扰	14
2.4 电子战无人机的发展趋势	15
2.5 本章小结	15
第三章 多机协同复合干扰航路规划	17
3.1 电子战无人机干扰方式概述	17
3.1.1 欺骗干扰	17
3.1.2 噪声压制干扰	18
3.2 电子战无人机干扰实现原理	19
3.2.1 航迹欺骗干扰技术原理	19
3.2.2 噪声压制干扰技术原理	20
3.3 对组网雷达的多机协同复合干扰	21
3.3.1 组网雷达抗干扰能力	21
3.3.2 多机协同复合干扰优势	22
3.3.3 多机协同复合干扰要求	22
3.4 单机欺骗干扰单部雷达数学模型	23
3.4.1 假目标位置关系及运动模型	23
3.4.2 欺骗干扰无人机位置关系及运动模型	25
3.4.3 电子战无人机控制模型	26
3.4.4 耦合方程	27

3.5	多机协同复合干扰组网雷达数学模型	28
3.5.1	多机协同复合干扰组网雷达任务想定	28
3.5.2	压制干扰无人机位置关系及运动模型	30
3.5.3	最优控制模型	32
3.6	仿真与分析	36
3.6.1	单机欺骗单部雷达仿真与分析	37
3.6.2	单机欺骗-单机压制仿真与分析	40
3.6.3	多机协同复合干扰组网雷达仿真与分析	43
3.7	本章小结	50
第四章	多场景无人机干扰航路规划	51
4.1	多机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰	51
4.1.1	假目标和无人机的运动模型	51
4.1.2	模型求解	55
4.1.3	仿真分析	56
4.2	单机欺骗干扰单架预警机	58
4.2.1	单机欺骗干扰单架预警机数学模型	58
4.2.2	无人机干扰信号控制参数	63
4.2.3	单机欺骗干扰单架预警机仿真与分析	66
4.3	多机协同复合干扰多架预警机	70
4.3.1	多机协同复合干扰多架预警机数学模型	70
4.3.2	多机协同复合干扰多架预警机仿真与分析	75
4.4	本章小结	83
第五章	总结与展望	85
5.1	总结	85
5.2	展望	86
参考文献	87
致谢	91
作者简介	93

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)属于一种动力驱动飞行器,能够替代有人飞行器执行多项任务,包括在恶劣环境下的各种枯燥甚至危险的任务^[1-4]。无人机与有人飞行器相较,其优势在于机动性强、投入费用少以及零人员伤亡等,尤其是在执行高危险任务时可以充分发挥其自身优势。无人机于科索沃战争、海湾战争、伊拉克战争、阿富汗战争以及利比亚战争中承担的任务主要包括侦查情报、中继通信、评估战果、对地攻击和电子对抗等^{[5][6]},北约与美国在无人机的协助下,在各场战役中获得了最后的胜利^[7]。

将无人机与有人飞行器相对比,发现无人机的优势体现在自身重量更轻、尺寸更小^{[8][9]}。构造无人机时无需将座舱、环境控制和弹射救生等安全性问题思量在内,并且无人机执行的任务与有人飞行器相比更单一^[10],因此无人机在飞行与完成任务时灵活性更强。通常无人机质量为几十克至几百千克之间,部分进行战略侦查任务与对地攻击任务的无人机与其他类型无人机相比质量稍高,在战场上的生存能力更强。因为无需将飞行员生理问题等考虑在内,无人机机动能力得到一定提升,可以实现飞行员驾驶无法完成的高难度机动性工作。无人机机身采用隐形设计令其在不同环境下执行任务难度更低。无人机投入费用少,在发射、回收、使用、维修等方面投入成本更低,并且其对机场跑道依赖小,机动部署难度更低。

无人机在飞行时必须由操作人员利用地面控制方式制定飞行计划、规划飞行航路,然后向无人机机载控制系统发送相关数据,机载控制系统根据已设置完成的数据来完成相应的飞行任务^[11]。另外,地面控制人员能够根据实际需求由地面控制站直接对无人机完成控制与操作,类似于在地面上进行各种空中飞行操作。

在当今战争中,无人机应用于战场侦察工作,并且在各个国家都开始普遍使用。从 1915 年生产出全球首架无人机开始,无人机就在战争中充分地表现出巨大的潜力。在 20 世纪 60 年代美国与越南的战役中,美国利用无人机获取了诸多对方战争情报,降低了人员伤亡数量^[12]。美军在后期的战争中,如与伊拉克之间的海湾战争、与塔利班的阿富汗战争,一直到利比亚战争,都操纵无人机执行各种任务,获得了巨大的战场优势。

在通信网络技术与信息技术的迅速发展下,防空作战中敌我对抗更激烈,对抗模式也正在发生改变,由最初的平台对抗发展成为体系对抗,最终发展成为集群对抗。世界各国为了增强本国空袭作战对抗强度^[13],都投入了更多科研力量用以研发作战能

力更加丰富、隐身性能更加强大以及机动性能更加完善的新型高空作战平台，即无人作战飞机(Unmanned Combat Aircraft Vehicle, UCAV)。与普通无人机对比，这种无人作战飞机智能化控制能力更强，可以用于在复杂性更强、危险程度更高的战场环境中执行各种任务。在无人作战飞机技术逐渐发展、装备载荷能力逐步增强的情况下，其作战任务也已经渐渐发生了改变，一些一般无人机不能够执行的任务，无人作战飞机都可以执行，其中包括渗透式纵深攻击、压制敌方防空系统、空中电子进攻等比较困难的作战任务^[14-17]。

然而在雷达组网环境下，虽然无人作战飞机的作战能力与从前相比得到了大幅提升，但还是无法应对敌方的组网雷达。显而易见的是，在实际作战时，多架无人机共同执行任务与一架无人机单独执行任务相比表现出更加显著的优势：

(1)、安装不同载荷的各架无人机之间互相配合下可以提高作战灵活性，任务完成率得到大幅提高；

(2)、这种多无人机共同作战模式可利用通信网络达到情报信息共享；

(3)、采用更合理的方式分配任务可以使任务成功率得到提高；

(4)、多无人机系统与单无人机相比鲁棒性更高，一旦平台出现故障，可以通过调动其他无人机平台来进行任务的重新分配。

无人机技术近年来不断地提高与完善，应用于战争中所能取得的优势愈加显著，已经发展到目前许多国家的军事研发重要项目。随着全球在无人机领域的研究热潮，如今信息化战争愈加猛烈，对抗环境复杂性也进一步增强，无人机未来的研究主要围绕制定无人机任务计划、掌握无人机自主飞行技术和对无人机进行航迹规划等方向来进行^[18]。作为发展航空技术、空军作战能力以及现代化国防建设的重要组成部分，目前我国正在深入研究基于地面控制站指令的自主控制与侦察一体化的无人机作战平台系统，进而基于该平台实现迅速作战与准确作战的目标。无人机的任务规划、自主飞行技术、飞行控制技术以及规划航路等方面对其能否充分发挥作战能力具有决定性作用。许多军事专家提出，无人机今后会逐渐发展成为空中最重要的航空侦察设备，除了可以实现与飞行员驾驶飞机共同作战之外，甚至还可以在在某些特殊条件下取代有人驾驶飞机来完成一系列任务。

无人机在电子战中最为重要的一项任务就是对敌方进行电子干扰，扰乱、压制敌方防御系统，从而为我方接下来的战略战术目标获取优势。因此，研究无人机在不同场景下实施干扰过程中的航路规划问题就显得尤为重要。

1.2 研究与发展现状

常见的航路规划算法较多，而且可以由各种规划标准出发划分算法类型^[19]。根据

规划决策计算方式的不同, 可将航路规划算法划分成最优式算法与启发式算法^[20-22]。作为一种纯数学优化算法, 最优式算法的计算时间与问题的规模相关, 在问题规模较大情况下, 相应的计算时间也表现出爆炸式增长。最优式算法中使用较多的为穷举法、动态规划、参数优化法、数学规划法以及梯度法等, 纯数学优化方式存在计算复杂性高与计算量大等问题, 无法符合多种不同约束条件要求, 因此在规划航迹时无法实现最优化问题。启发式算法中经常使用的方法有遗传算法、模拟退火算法、蚁群算法、神经网络、启发式搜索、专家系统、粒子群优化算法、A-Star 算法以及机器学习等。由几何学出发可以将航路规划算法分为两种, 分别为基于图形算法与基于栅格算法, 二者各具优势。通常基于栅格算法可达到实时收敛需求, 但在某些情况下对于复杂的约束条件无法处理; 基于图形算法获得的结果准确性高, 然而需要较长的收敛时间。

无人机在电子战领域的一项主要应用为电子干扰, 随着无人机技术的快速发展, 许多学者与研究单位致力于研究无人机电子干扰规划航路问题, 并在这一领域获得显著成果。

Pachter M 等人在文献[23]中首次提出了多机协同产生假雷达航迹目标的概念。

Maithripala D H A 等人在文献[24-26]中提出了对组网雷达的多机协同欺骗技术, 研究了多机协同欺骗的原理和约束条件, 后又从几何学角度研究了多机协同欺骗的实施方法, 并分析了其可行性。

汪宏宇等学者在文献[27]中分析两架无人机在掩护突防机群时对岸基警戒雷达进行干扰规划的问题, 其中包含干扰无人机执行任务前制定的分别在侧向干扰与前后向干扰情况下的航路规划方法, 实现由某个角度对突防战机进行掩护并在该方向上产生有效的干扰扇面的目的, 最终获得处于多种环境下的干扰飞行航路。

杨继庚等专家在文献[28]中提出并建立无人机干扰预警雷达模型, 在求解单架无人机最优路径时按照突防飞机与无人机相对于预警雷达的角速度及其他约束条件进行计算, 获得的仿真数据显示: 这种方式通过无人机速度实现掩护, 极大地节约了无人机资源。

汤亚波等学者在文献[29]中基于掩护通道定量研究了在俯仰面与方位面假目标欺骗干扰无人机群空域协同作战, 并探讨了相应的空中部署方法, 为无人机群掩护空中力量突防的实际作战给出了重要依据。

李小波等专家在文献[30]中建立了一种优化多机干扰组网雷达航迹的数学模型, 仿真结果显示, 使用本模型所规划出的假目标航迹的干扰成功概率能够得以提高, 同时可以实现最小化干扰飞行过程推力。

孙琳等人在文献[31]中建立分布优化无人机干扰航迹数学模型, 协同干扰的难度在本规划模型下得到降低, 让假目标可以躲避威胁区直接到达目标地域。

李飞等人在文献[32]中提出了多机协同航迹欺骗最优控制模型, 通过无量纲化模

型提升了模型在解算时的精确度与实时性，最终通过勒让德伪谱法进行了模型求解。

范振宇等人在文献[33]中并未使用最优算法，而是使用次优算法规划无人机航迹，最终证明这种方式具有一定的可行性与实用性。

McLain 等学者在文献[34]中研究并提出了多机协同的汇聚问题，最小化确定时刻无人机在雷达组网内的暴露点迹，以达到控制无人机飞行路线和方向的目的。

K.B.Purvis 等人在文献[35]与[36]中通过多机协同获取敌方组网雷达的情报，然后利用雷达位置信息提出了基于瞄准线准则的协同欺骗算法，同时还将风向和油耗对于无人机飞行系统的影响考虑在内。

Shima T 等人在文献[37]中推导出了存在可行飞行航迹的充分必要条件以及相应的地速和加速度边界，然后采用次级控制将这些瞬时航迹点连接起来，产生最后可供 ECAV 飞行的路线。

1.3 论文内容与安排

本文研究内容主要为多架电子战无人机执行协同复合干扰任务时的航路规划方法，分析了电子战无人机的作战任务和其在具体空袭中的作战运用，进而研究了对组网雷达的多机协同复合干扰航路规划问题，在航路规划最优控制模型中加入了 7 种飞行参数限制，使得规划出的每架无人机飞行航路与运动参数更贴合实际的无人机飞行情况。分别在 2 种代价函数下对组网雷达规划了无人机的干扰航路，认为在实际应用中可以按需灵活地构建、选取相应的代价函数进行航路规划。设计了多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰组网雷达的航路规划方法，保障了无人机在进行情报获取时的安全性；构想了单机欺骗干扰敌方单架预警机与多机协同复合干扰敌方多架预警机的任务想定，推导了相应的干扰无人机航路规划数学模型，并基于规划出的无人机飞行航路推导了相应的无人机干扰信号控制参数的求解公式。本文分别对几种场景下电子战无人机的航路规划方法进行了仿真与分析。

本论文共分为五章，结构安排如下。

第一章分析了本文的研究背景与意义，然后介绍了航路规划算法与无人机干扰航路规划方法的研究与发展现状，最后是本文的主要研究内容与章节安排。

第二章主要对电子战无人机的应用进行了分析。通过介绍无人机的结构及特点，指出由于无人机所具备的各种优势，所以它能够在未来的军事斗争中将起到极为重要的作用。随后讨论了无人机在电子战中的作战任务，并重点分析了电子战无人机在空袭中的作战运用。最后总结了未来电子战无人机的发展趋势。

第三章主要研究了针对组网雷达的多机协同复合干扰航路规划方法。首先介绍电子战无人机的主要干扰方式与实现原理。其次研究并推导了单机欺骗干扰单部雷达的

数学模型以及航路规划最优控制模型，并基于此研究并推导了多机协同复合干扰组网雷达的数学模型以及航路规划最优控制模型，而且，本章构建的航路规划模型是基于7种无人机飞行参数限制的，更加贴合实际。然后给出了两种不同的代价函数，并认为在不同实际条件与需求下，可以灵活地构建、选取不同地代价函数对无人机航路进行规划。最后基于7种飞行参数限制分别在2种代价函数下对电子战无人机的航路进行了仿真求解与分析。

第四章主要研究了多场景下电子战无人机干扰航路规划问题。首先，设计了多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰组网雷达的航路规划方法，这有利于我方无人机的情报收集，具有实际意义。接着，构想了单机欺骗干扰敌方单架预警机与多机协同复合干扰敌方多架预警机的任务想定，推导了相应的干扰无人机航路规划最优控制模型，并推导了无人机发射干扰信号的频率公式及时延公式，从而形成具有真实舰船运动特征的假目标轨迹，掩护了我方作战舰船。最后本章对三种情况下的无人机航路规划算法进行了仿真验证与分析。

第五章对本文的研究工作进行了总结，并基于此对未来的研究方向进行了展望。

第二章 电子战无人机的应用分析

现代化战争是一种全方位、高科技的战争，其任何阶段都离不开电子战。最近几年世界上发生的几场局部战争中都离不开电子战无人机的身影，让世界各国纷纷意识到它在现代化战争中的必要性。本章主要介绍无人机的结构及特点，描述了电子战无人机的主要任务，其中有电子侦查、电子攻击以及电子防御等。随后探讨分析了电子战无人机在空袭中的作战运用，其中包括佯装攻击、掩护干扰、分布式干扰以及引诱干扰。最后，总结了电子战无人机的发展趋势。

2.1 无人机的结构及特点

无人机也可以被称作空中飞行器，作为国内外应用较多的一种电子升空平台，它投资少、安装简单、机动灵活性强。无人机系统主要由三部分组成，分别为地面设备、无人机载体以及有效载荷，其中，地面设备包括任务控制、无线电控制和发射升降装置等。

目前，无人机已经发展成为电子战武器或者电子战平台，未来潜力巨大，通过对比载人飞机，无人机的特点与优势主要表现为：首先，自身结构简单、投入成本少以及应用效率高，应用时更简单便捷，后期维护费用少；其次无人机能够飞入敌方军事要地上空对敌军侦察设备进行干扰、进攻等，且隐蔽性强^{[38][39]}；第三，战场上无人机具有强大的生存能力，生产无人机的材料主要为透波材料、塑料玻璃纤维等，雷达有效反射面积比较小；第四，体积较小，自身重量轻，机动性高，无需设置专用机场起降装置，在起降时对场地无要求；第五，无人机重复使用性强，而普通反辐射武器或者导弹仅能实现一次性攻击；第六，无人机不需要飞行员驾驶，提高了生命安全性^[40]。基于无人机的上述特点与优势，其在战场上受到更多军事家的青睐。然而无人机自身也有缺陷：活动区间受到限制，遇到突发状况无法灵活处理，容易受敌军干扰与影响，载荷能力以及全天候性能与有人飞机相比相对较差等。

2.2 电子战无人机的作战任务

无人机可根据已预先设定的程序自行完成一系列侦察干扰任务，同时也可以通过岸基指挥站或者舰基控制完成相应的对抗任务。通常情况下，当飞行高度达到 4000m 以上无人机才开始进行盘旋飞行并完成预定任务。无人机目标小，敌军地面武器系统与海上作战系统很难对其进行有效地攻击，不会造成人员伤亡等问题；同时也可以潜入敌对方要地完成电子侦察任务，对一些普通侦察设备无法获取的低功率、短距离关

键信号进行截获,也可以将敌军关键电子设备诱导开机,进而截获到一些常态下无法得到的辐射源信号。除此以外,当无人机在与敌军靠近的区域释放干扰信号时,因其升空增益相对较高,所以采用较低干扰功率即可得到更好的干扰效果,进而可降低对于侦察干扰设备的基本需求,为降低干扰设备重量、体积、成本以及电源功率提供了基础。

通过多次局部高科技战争可以总结出,电子战无人机主要执行的任务包含电子侦察、电子攻击以及电子防御等^[41]。

2.2.1 电子侦察

电子战无人机侦察作为填补卫星侦察与其他侦察的关键方式,伴随无人机性能上的提高,它的应用范畴与强度势必也随之上升^[42]。雷达预警距离由于受地球曲率的影响,只能探测视距内的区域,无法达到先敌发现与先敌攻击等需求。远程无人侦察机优势在于航行时间长、隐蔽性高以及不会存在驾驶员生命安全等方面,与敌军接触或者进入战区前,采用长时间、远距离对目标区域监控与实时侦察,获得准确的情报,对电子设备性能参数有效侦测,同时获取敌方无线电信号,作为后期火力进攻的重要情报^[43]。当电子战无人机组队执行任务时,其内的电子战无人机彼此协作,实现全天候、多批次、立体化以及大纵深侦测与监控敌军。基于电子战无人机远距离侦察、飞行高度更高以及侦察方式多样化等优势,我方可以在前沿设置一定范围为无人机巡查警戒区域,提高防御等级并增大防守纵深,对于来袭敌军设备延长预警时间,同时将预警无人机与数据链连接共同配合指挥防空火力,实现杀伤拦截来袭兵器^[44]。第二次车臣战争俄军使用无人侦察机“雄蜂-1”与“蜜蜂-1T”,通过空中自动摄像装置侦察敌军兵力部署状况等信息,收集情报后向联合战役集群司令部传递,再经过分析与判断后对于俄军作战指挥进行精确引导。

当前,国内外已经发起了研究高空长航时无人侦察机的热潮,该研究用来应对当前无人机在侦察面积、侦察速度以及无法获取连续信息等方面的缺陷。能够大胆预测,电子战无人机今后将是完成空中侦察监视任务的主要力量^[45]。

2.2.2 电子攻击

电子战无人机可以在复杂电磁环境下对敌方实施电子攻击,其电子攻击任务可以划分成下面几种类型:

(1) 支援干扰

无人机执行电子干扰任务时,用于对敌军指挥、电子、通信以及光电系统造成压制,同时也可以起到对我方作战飞机的突防与攻击进行掩护的作用。无人机能够到达敌军的前沿或者侧翼,也可以深入敌军内部向其进行近距离干扰,完成大功率干扰机

无法完成的任务^[46]，同时能够适当地减少干扰功率，防止对我方电子设备产生干扰。执行干扰任务时，可以利用机载电磁波发射器将有源干扰发送至敌军电子设备中，也可以采用放置金属干扰丝或者箔条等方式对敌方电子设备造成无源干扰。另外，也可以通过无人机有针对性地释放多种投掷式干扰设备，实现干扰并掩护攻击编队，其中投掷式干扰设备包含通信干扰设备、雷达干扰设备、光电干扰设备以及指令信号干扰设备等。

现代化战争中最重要就是在战场上获得敌方关键信息，夺得战场上的制信息权，这样才能在战场上获得主动权，进而控制整个战事。海上作战的水面舰艇利用无线电通信实现信息交流，这可以作为电子干扰作战的基本条件。战争中通过干扰舰-舰与舰-机通信的方式中断对方指挥，可以很大程度上将敌军海军作战能力减弱；对预警雷达干扰后，可确保我军水面舰艇执行作战安全性更高。由于预警机应用最领先的雷达技术与通信技术，辐射功率较大，使用舰载干扰机无法得到很好的干扰效果。若采用电子战无人机，就可通过其间距较短和升空增益较高的特点，令干扰效果成倍增加，成为我军在战事中获得主动权的可能性因素^[47]。

(2) 反辐射攻击

因为制造无人机所采用材料的特殊性，导致其行动隐蔽性高，不会遭到敌方攻击。通过改装或者设计无人机为反辐射无人机后，将炸药或者遥控武器安装在无人机上，让无人机携带寻的器、战斗部以相应舵机控制系统，此时无人机成为一种飞行炸弹，同时具有制导功能，能够用于攻击对方无线电通信设备与雷达装置，战场中它可以根据实际条件选择正确时机对敌军预警机摧毁，保证我军行动不会被暴露。

电子战无人机通常形成一组攻击编队，盘旋飞行于敌军上空，诱导对方雷达开启，从而接收威胁信号并由寻的器控制其根据预设的威胁等级对该雷达实施攻击。与反辐射导弹相比，反辐射无人机于某些方面具有一定优势：首先是投入成本少、可以在更多应用中使用；其次无人机可以在目标区域中长时间盘旋飞行，造成敌军长时间受到干扰，心理压力增强。基于无人机侦察距离远、飞行高度高以及侦察方式多等优势，也可以将其用于搜寻我方上空或者敌方前沿是否存在对我方构成威胁的雷达、电子系统以及通信设施等，一旦发现即刻进行干扰或者摧毁，从而让作战纵深得以扩展。

(3) 非致命性攻击

高功率微波武器作为电子攻击中的新式武器，能够造成电子设备无法正常使用且将计算机内存数据全部擦除，但对建筑物物理结构与人不会产生致命攻击，同时也可用于对生产以及保存核生化武器的设施实施打击与摧毁。如今科学技术迅速发展，高功率微波武器已经可缩小尺寸用于安装在电子战无人机上，使得其作战区间得以扩大，可以全天候侦察感兴趣的区域与目标。

2.2.3 电子防御

下面分析电子战无人机在进行电子防御时的主要任务类型：

(1) 骗敌诱饵

无人机作为诱骗敌军的诱饵，与其他侦察设备相互协作一起实施诱骗侦察^[48]。另外，它也可以通过增强发射信号来模仿作战飞机，使敌方防空系统接收到大量的污染信息，诱导敌军暴露目标，迅速消耗弹药，从而形成对我方更有利的火力空隙。电子战无人机还可以将箔条播撒在空中，形成纵深更宽更长的干扰区域，实现对执行突袭任务的作战飞机的有效掩护。

(2) 空中预警

电子战无人机经过功能扩展后可以执行空中预警任务。由于电子战无人机可实现通信、预警、以及指挥控制等功能，因此与有人预警机相比实用性更强。电子战无人机的优势主要体现在：首先，投入成本低，构造体积小；其次，具有隐身技术，对雷达反射截面较小，具有更强的生存能力；第三，信号沟通速度较快；最后，是其采用一种创新的预警机作战模式，与传统预警机相比探测深度更高，可扩展空中预警警戒线数百千米，同时具有引导执行特殊任务的分队的能力。

(3) 反导拦截

世界各军事强国都在开发各种反导技术，用于对付与解决战术弹道导弹威胁，使用电子战无人机进行反导拦截是其中一个重要方向。电子战无人机可实现提前布置，短时间内侦察到目标，在与目标相距较远的位置对来袭导弹实施拦截，可避免反导导弹多方面的缺陷^[49]。

电子战无人机上述功能在应用时可灵活运用，由实际作战状态出发来进行选择，有时可以增强发射信号或者扩大反射面积；而另外一些时候就需缩小反射信号采用隐蔽方式行动；某些无人机执行任务后需回收，而有些则不用。实际中，还要由各种作战对象出发，在无人机上安装不同电子战装备来重点完成某一或某几项任务。

2.3 电子战无人机在空袭中的作战运用

雷达在防空武器系统中处于重要位置，因此雷达总是空袭方的主要攻击目标。电子战无人机作为电子支援干扰的关键组成部分，在执行空袭任务时扮演着非常重要的角色。

2.3.1 佯装攻击

作战中通过电子对抗方式制造假象来迷惑对方，也是空袭作战中掩护我方真实目的的一种经常使用的方式。在 1942 年盟军空军与法国在鲁昂的经典空袭作战过程中，

主攻飞机出发前先派出两批佯攻飞机，第一组佯攻飞机飞至鲁昂西侧 220km 的奥尔德尼岛，第二组佯攻飞机飞至与鲁昂东北相距 180km 的敦刻尔克。第二批飞机中主要有 9 架挑战战斗机与 97 架喷火战斗机，采用护航方式进行编队飞行，其中挑战战斗机安装有月光干扰装置，当其被敌方雷达脉冲装置触发后会发出一个宽脉冲信号，而敌方雷达显示屏受到信号后会显示为一个队形密集的飞行机群。德军被佯攻飞机诱骗后派遣 1700 余架飞机迎战，而真正攻击机群则对鲁昂实施轰炸，自身并未产生任何损失。

电子战无人机近距离作战优势和载荷干扰能力使得其能够在战事中对敌进行电子佯攻行动。经过侦察得到的佯攻方向雷达信息与情报，制定相应规划来向威胁雷达合理分配干扰空域、无人机数量以及工作时序等。电子战无人机根据预先制定的航迹飞入干扰空域，由地面人员指挥与引导，通过电子战无人机编队组网模式根据已制定的任务时序对敌方雷达实施欺骗性干扰。下图 2.1 表示佯攻干扰作战态势。

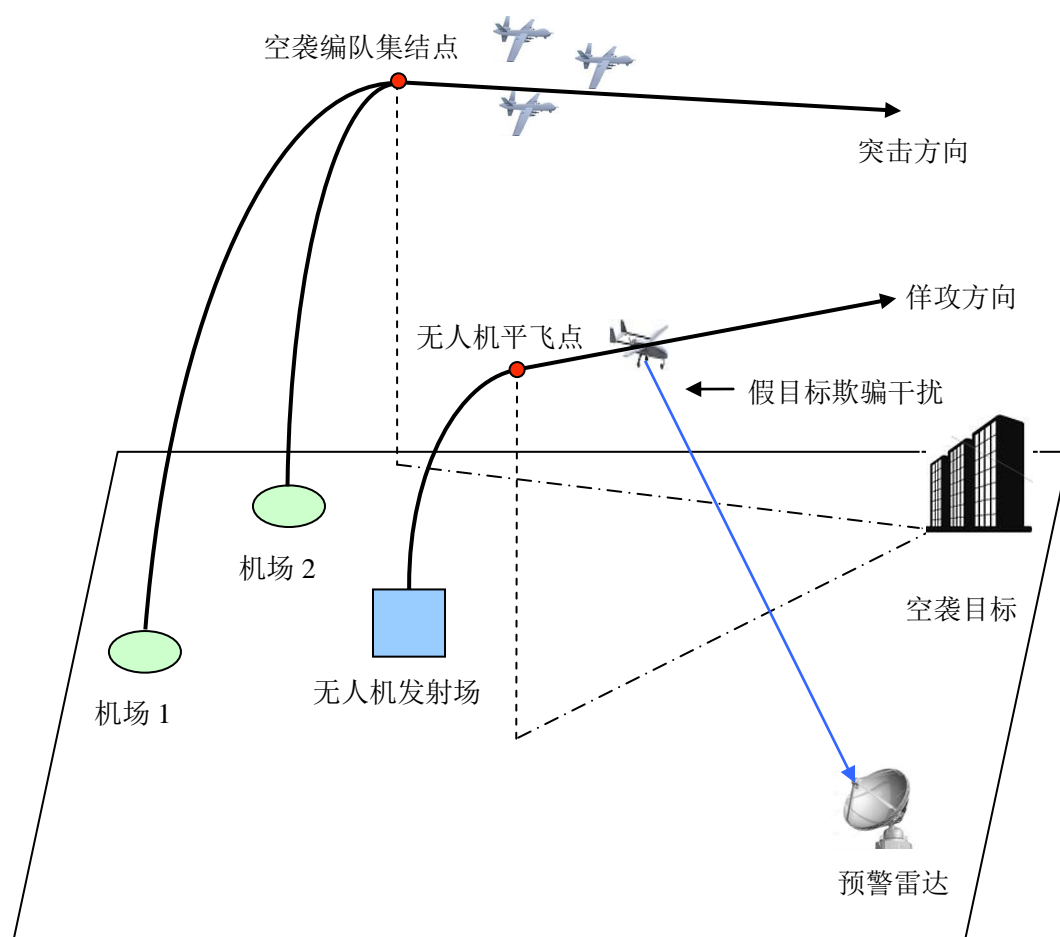


图 2.1 电子战无人机佯攻干扰示意图

2.3.2 掩护干扰

科索沃战争中北约在发动空袭时，最先出动 EA-6B 无人机干扰敌方武器控制雷达系统与预警雷达，达到“致盲”的目的，EA-6B 在支援时采用两种方式，分别为随队支援干扰^[50]与区域干扰。进行区域干扰的过程中，与空袭飞机相比电子战飞机需要提前半个小时飞行至敌军防空导弹射程外空域，强烈干扰敌方的防空雷达；进行随队支援干扰过程中，空袭飞机与电子战飞机共同编队飞行，向敌防空系统产生压制性干扰，从而达到掩护空袭飞机攻击目标的目的。执行随队支援干扰任务过程中不仅需要专用电子战无人机提供支援，同时也需要与主机群型号相同的飞机，安装多部干扰装置来进行支援。

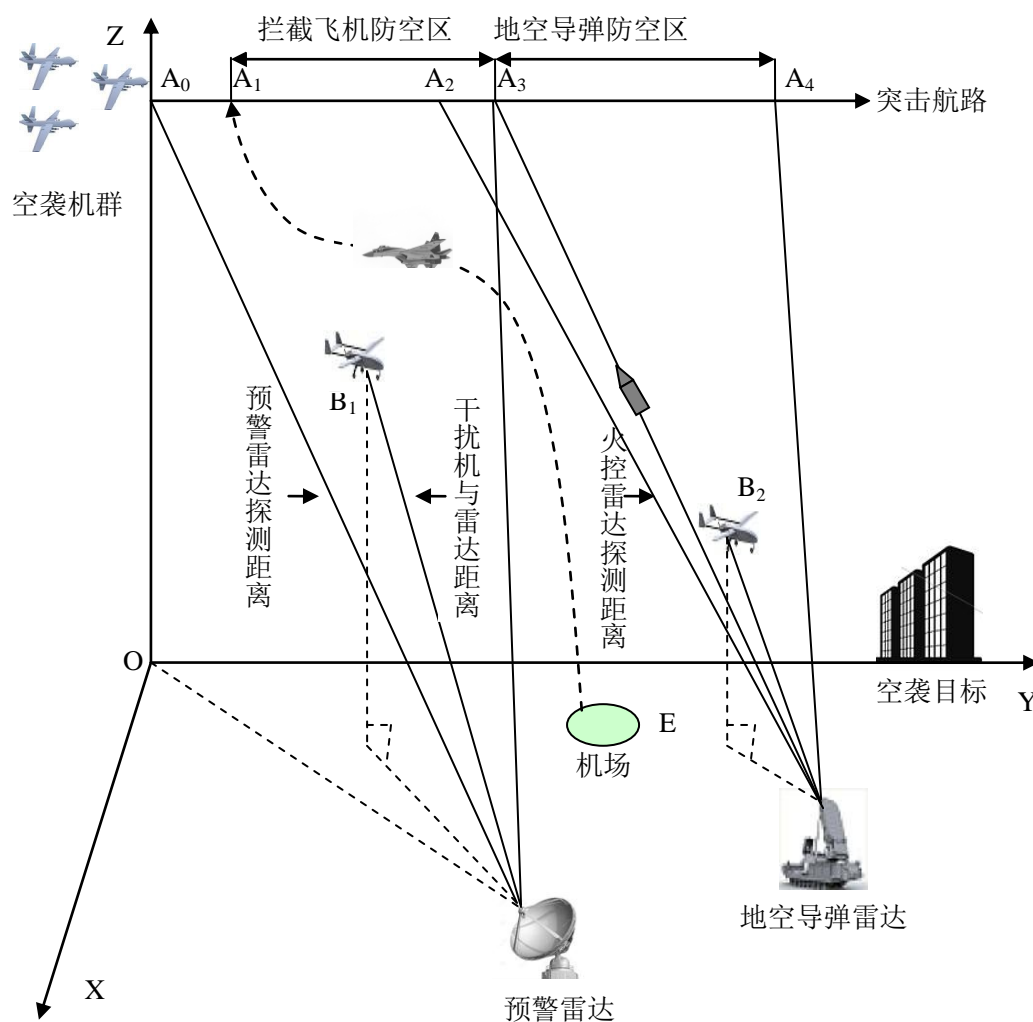


图 2.2 电子战无人机掩护干扰示意图

图 2.2 是电子战无人机掩护干扰示意图。图中 A0 表示第一次拦截飞机需要的雷达发现位置, A1 表示第一次拦截飞机的拦截点, A2 表示第一次地空导弹射击需要的雷达发现点, A3 表示第一次地空导弹射击点, A4 表示地空导弹射击界限。B1 表示

无人机在空袭编队通过拦截飞机防空区时的干扰任务点，B2 表示无人机在空袭编队通过地空导弹防空区时的干扰任务点。

伴随突击编队在作战中执行掩护干扰任务过程中，电子战无人机一般在雷达与空袭突防飞机的中间，在某个空间下进行往返的直线飞行，并压制性干扰敌雷达主瓣。无人机在上述作战方法中与其他支援方式相比复杂性更高，按照突击编队进入雷达探测区的坐标，获得无人机准确的可行干扰区域。无人机应该更早进入干扰位置，按照无人机干扰空域与突击编队进入雷达探测区时间等信息经过逆推得出具体起飞时间；与此同时，电子战无人机由于航速限制，无法与突击编队在相同时间出入防空区，此时要设置多组电子战无人机分段接力掩护干扰。作战中，按照敌方雷达的分布情况与性能得出具体每组无人机型号、数量以及分布干扰空域等，再根据无人机航速、突击编队以及威胁雷达位置等关系对每组电子战无人机有效掩护航迹进行预测，从而获得每组无人机准确的开始干扰时间。

2.3.3 分布式干扰

分布式干扰令大量电子战无人机在特殊地域与空域上分布，对于选定的雷达采用受控或者自动方式实施干扰措施，该干扰方式使用逼近的分布式网络化结构，已经成为一种针对先进预警探测系统中低副瓣与超低副瓣组网雷达技术的重要方式^[51]，下图 2.3 表示其作战态势。

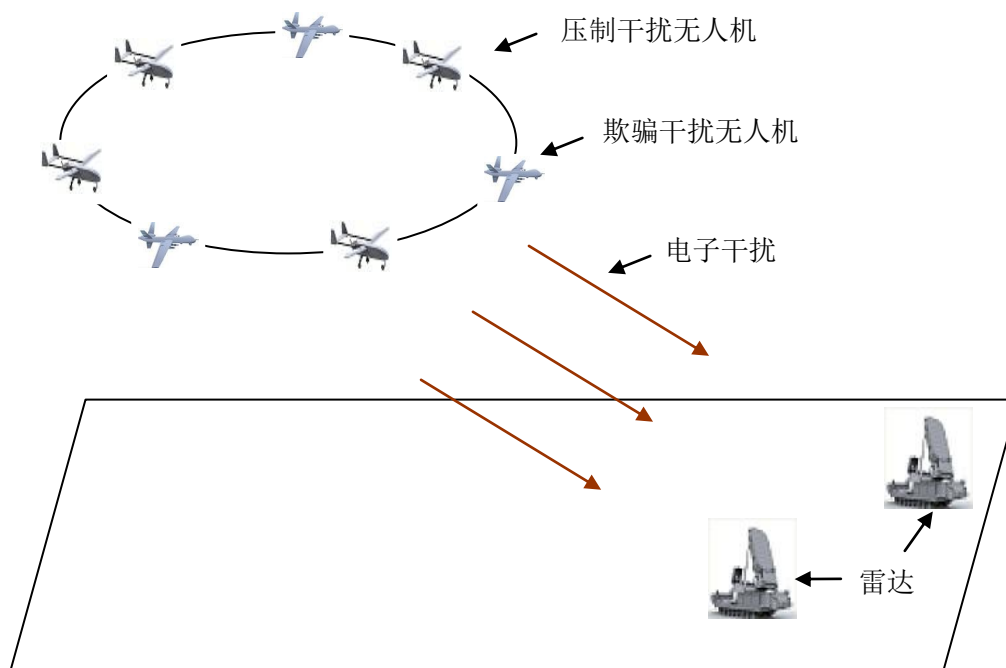


图 2.3 电子战无人机分布式干扰示意图

通常，新体制雷达发射功率较高，采用噪声压制性干扰可缩短其雷达探测距离，

然而一般无法让其丧失全部探测能力；与此同时，新体制雷达应用的主要技术包括隐身技术与旁瓣对消技术，可降低由旁瓣进入的脉冲干扰，假目标欺骗干扰信号有效的进入方向少，干扰方向容易被选通。由此可见，分布式干扰能否在实际作战中取得成功受到每部干扰机干扰样式如何分配的影响，采用提前约定方式，使部分电子战无人机运用噪声压制性干扰，另外一些电子战无人机运用假目标欺骗干扰，也可以每部电子战无人机使用欺骗与噪声相结合的干扰方式。由此不仅可缩短敌方雷达探测距离，也可以使敌方雷达在下降后的探测范围内被我方所形成的假目标欺骗，进而增强整体干扰效果。

2.3.4 引诱干扰

现代防空作战中，一些防空雷达只有进入防空区后才开机运行，因此向敌军开展单一的软杀伤或者硬摧毁等方式无法获得显著效果。使用电子战无人机对敌方雷达进行欺骗干扰制造虚假情报，诱导敌军雷达开启，并全面获取敌军雷达情报数据，从而对其实施硬杀伤。上述方法采用软硬协同方式来达到预期目标。

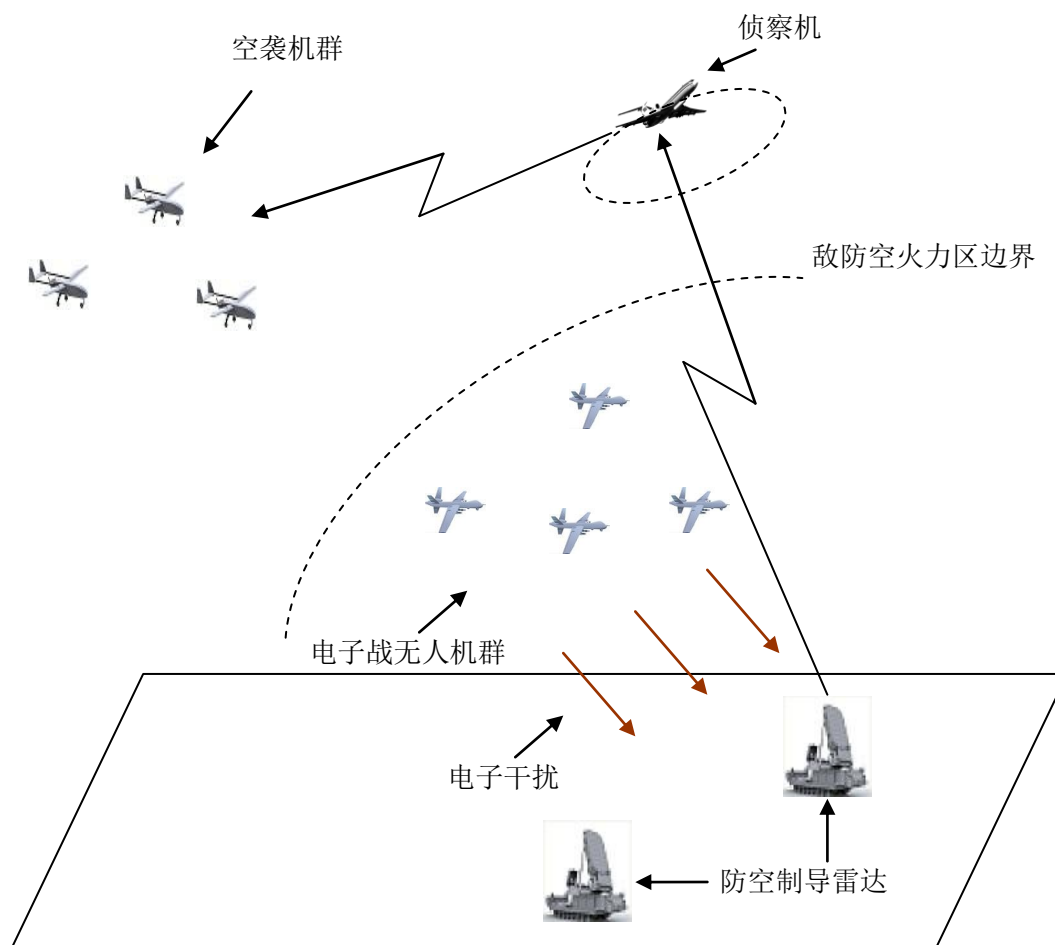


图 2.4 电子战无人机协同火力摧毁示意图

上图 2.4 表示引诱干扰作战态势图。执行空袭的机群抵近敌防空导弹高炮防空区

前，提前派出部分电子战无人机，先行潜入敌军防空区模拟战斗机群对其进行欺骗干扰，诱骗敌军防空制导雷达开启。此时位于防空区边界巡航的电子侦察飞机会获取开机的雷达的位置信息与各种参数，然后利用通信数据链向携带反辐射导弹的空袭飞机发送信息，并对敌防空雷达实施硬摧毁。

2.4 电子战无人机的发展趋势

最近几年，电子战无人机处于飞速发展阶段，世界上一些军事实力强大的国家纷纷在这一领域投入了更多精力，首先是作为干扰载机或者侦察载机，其次是作为杀伤性武器。美军关于电子战无人机的研究工作主要致力于使其全面替代有人机这一方向，其中有微型侦察飞行器、高速无人作战飞机、干扰无人机等^[52]。作为未来战场无人化作战的重要驱动，无人机的快速发展与在战事中的应用，直接影响未来军事行动。未来各军事强国对于电子战无人机研制的发展趋向主要有^[53]：

- (1)、高空长航时且具有隐身功能；
- (2)、体积微型化；
- (3)、动力新型化；
- (4)、功能多元化；
- (5)、使用样式多样化。

2.5 本章小结

本章首先介绍了无人机的结构及特点，指出由于无人机具备成本少、见效快、隐蔽性强、安全性好等优势，所以它能够在战场上承担多种特殊的任务，在未来的军事斗争中将起到更为重要的作用。随后探讨了电子战无人机的主要任务：电子侦察、电子攻击以及电子防御。然后着重分析了电子战无人机在空袭中的作战运用，其中包括佯装攻击、掩护干扰、分布式干扰与引诱干扰。最后总结了未来电子战无人机的发展趋势。

第三章 多机协同复合干扰航路规划

针对组网雷达相对单部雷达大幅提升的抗干扰性,笔者在这一章中以传统的假目标欺骗干扰与噪声压制干扰为基础,从推导单机欺骗干扰单部雷达的数学模型入手,进一步研究了多机协同复合干扰敌方组网雷达的任务想定,推导了包含7种飞行参数约束的无人机航路规划最优控制模型。在该方法中,将假目标欺骗干扰与噪声压制干扰相结合,从而保障了实施欺骗的电子战无人机的安全性,且提高了在敌方雷达组网环境下假目标航迹的可信度。接着本章给出了两种不同的代价函数,认为在不同实际情况下可以按需灵活地构建、选择不同的代价函数对无人机航路进行规划。最后通过仿真求解出了在两种不同的代价函数下电子战无人机的航路及相应的运动参数,并对结果进行了比较与分析。

3.1 电子战无人机干扰方式概述

3.1.1 欺骗干扰

我们用 V 代表雷达对各种目标的检测空间,对于大部分能够进行四维(距离、方位、仰角、速度)检测的雷达,有^[54]:

$$V = \{[R_{\min}, R_{\max}], [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}], [\beta_{\min}, \beta_{\max}], [f_{d_{\min}}, f_{d_{\max}}], [S_{i_{\min}}, S_{i_{\max}}]\} \quad (3-1)$$

其中, R_{\min} 、 R_{\max} , α_{\min} 、 α_{\max} , β_{\min} 、 β_{\max} , $f_{d_{\min}}$ 、 $f_{d_{\max}}$, $S_{i_{\min}}$ 、 $S_{i_{\max}}$ 依次代表雷达检测距离的下限值与上限值,检测方位的下限值与上限值,检测仰角的下限值与上限值,检测多普勒频率的下限值与上限值,灵敏度以及饱和输入信号功率。在理想状况下,点目标 T 是包含在 V 内的某个确定点:

$$T = \{R, \alpha, \beta, f_d, S_i\} \in V \quad (3-2)$$

在上式(3-2)中, R 、 α 、 β 、 f_d 、 S_i 依次代表目标所在的距离、方位、仰角、多普勒频率和回波功率。

从欺骗参数的角度来看,欺骗干扰包括了如下四种类型:

(1)、距离欺骗干扰:

$$R_f \neq R, \alpha_f \approx \alpha, \beta_f \approx \beta, f_{d_f} \approx f_d, S_f > S \quad (3-3)$$

上式中, R_f , α_f , β_f , f_{d_f} , S_f 依次代表假目标 T_f 在 V 中的距离、方位角、俯仰角、多普勒频率以及功率。

(2)、速度欺骗干扰:

$$f_{d_f} \neq f_d, R_f \approx R, \alpha_f \approx \alpha, \beta_f \approx \beta, S_f > S \quad (3-4)$$

(3)、角度欺骗干扰:

$$\alpha_f \neq \alpha \text{或} \beta_f \neq \beta, R_f \approx R, f_{d_f} \approx f_d, S_f > S \quad (3-5)$$

(4)、AGC 欺骗干扰:

$$S_f \neq S \quad (3-6)$$

3.1.2 噪声压制干扰

噪声压制干扰是指通过运用噪声或与之类似的信号, 将有价值的信号遮盖起来, 从而使雷达无法准确的获取目标信息^[54]。其原理在于: 雷达的工作环境中, 总会存在各种大量的内部以及外部噪声, 雷达检测目标必然会受到噪声的影响, 同时也遵循一定的概率准则。通常情况下, 若目标信号能量 S 和噪声能量 N 的比值 (即信噪比 S/N) 高于检测门限 D , 那就能确保在虚警概率 P_{fa} 下实现一定的检测概率 P_d , 此时雷达可以检测到目标。但当遇到噪声压制干扰时, 人为的干扰功率会被雷达所接收, 信噪比 S/N 大幅减小, 雷达检测的成功率就会受到明显的影响。

从干扰信号中心频率 f_j 、谱宽 Δf_j 相对于雷达接收机中心频率 f_s 、带宽 Δf_r 的关系这一角度来看, 遮盖干扰包括了如下三种类型:

其一, 瞄准式干扰, 在这种干扰下, 式(3-7)成立:

$$f_j \approx f_s, \Delta f_j = (2 \sim 5)\Delta f_r \quad (3-7)$$

其二, 阻塞式干扰, 在这种干扰下, 式(3-8)成立:

$$\Delta f_j > 5\Delta f_r, f_s \in [f_j - \Delta f_j / 2, f_j + \Delta f_j / 2] \quad (3-8)$$

其三, 扫频式干扰, 在这种干扰下, 式(3-9)成立:

$$\Delta f_j = (2 \sim 5)\Delta f_r, f_s = f_j(t), t \in [0, T] \quad (3-9)$$

值得一提的是, 在实践中, 人们往往会在了解雷达载频调制后, 采用上述两种或三种方式予以组合性干扰。

3.2 电子战无人机干扰实现原理

3.2.1 航迹欺骗干扰技术原理

在理解这一原理之前,首先必须了解脉冲雷达是如何测量距离的。在介质满足均匀条件的情况下,无线电信号的传播轨迹为直线,且速度恒定(在自由空间中的速度接近为光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)^[55]。雷达获取的回波信号相对其发射信号的延迟为 t_R ,结合其他信息进行计算,就能够实现测距的目的,具体的计算公式为:

$$R = \frac{1}{2} c t_R \quad (3-10)$$

所以,只要精确测定延迟时间 t_R ,就能够测量出目标的距离,详见下图3.1。

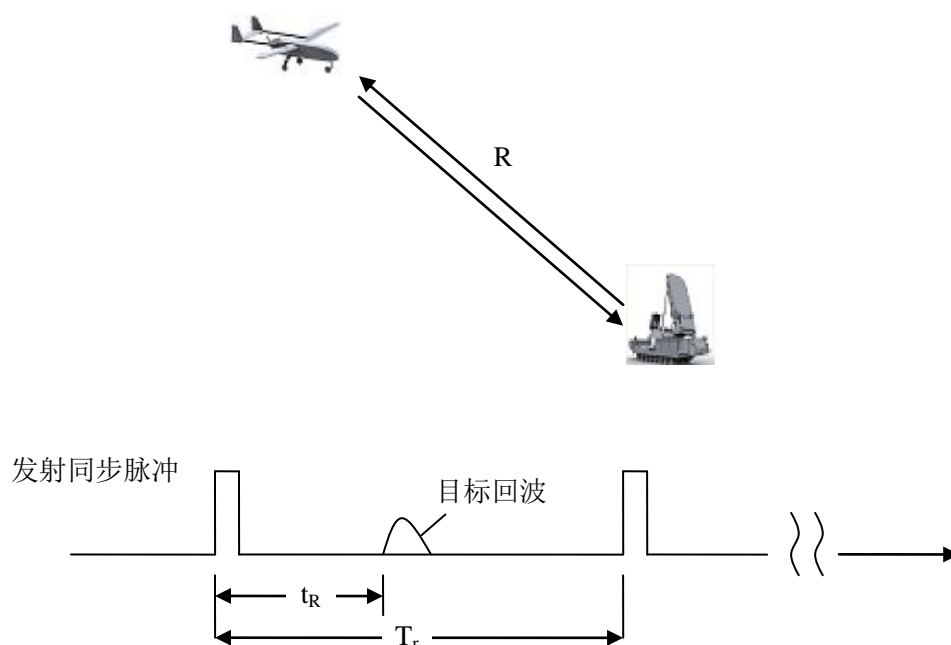


图 3.1 脉冲雷达测距原理示意图

在进行脉冲测距时,雷达会向各个方向释放脉冲信号,信号接触到目标物后即反射回波信号并被雷达接收,它相对于发射信号的时间延迟为 t_R ,据此计算就可以确定距离 R 的值。

航迹欺骗充分利用了测距原理,无人机接收来自雷达的脉冲,然后予以延时处理,按照某功率释放干扰信号,干扰信号被雷达接收,由此计算出错误的距离,此时敌方雷达就会提供假目标的判断结果。

接下来,笔者将对线性调频信号进行分析,据此探讨如何控制脉冲测距的延迟。假定在某一时刻,雷达和无人机相距 R_0 ,假目标航迹点和雷达相距 R_f ,如果有 $R_f < R_0$,则在信号时延中新增一个脉冲重复周期 T_p ,那么这一航迹点的延迟 Δt 就是:

$$\Delta t = \begin{cases} \frac{R_f - R_0}{0.5c}, & R_f > R_0 \\ \frac{R_f - R_0}{0.5c} + T_p, & R_f < R_0 \end{cases} \quad (3-11)$$

线性调频信号的常见形式是：

$$S(t) = A * s(t) = A * g(t) \exp(j\pi k t^2) * \exp(j2\pi f_0 t) \quad (3-12)$$

式(3-12)中， $g(t)$ 代表矩形信号， A 代表雷达发射信号的幅度， f_0 代表载频， k 代表线性调频信号的调频斜率。在这种情况下，电子战无人机的接收信号可以描述为：

$$\begin{aligned} S_j(t) &= A * s(t - \Delta t_0) \\ &= A * g(t - \Delta t_0) \exp(j\pi k (t - \Delta t_0)^2) * \exp(j2\pi (f_0 + f_d / s)(t - \Delta t_0)) \end{aligned} \quad (3-13)$$

上式中， $\Delta t_0 = 2R/c$ ， c 代表光速。那么此时的欺骗干扰信号可以描述为：

$$S_j(t) = B * g(t - \Delta t_0 - \Delta t) \exp(j\pi k (t - \Delta t_0 - \Delta t)^2) * \exp(j2\pi f_0 (t - \Delta t_0 - \Delta t)) \quad (3-14)$$

其中， B 为区别与 A 的干扰信号幅度。

对上式进行分析能够确定，以发射信号为基准，回波信号的延迟是 $\Delta t_0 + \Delta t$ ，雷达判断出的假目标距离为： $R_f = c(\Delta t_0 + \Delta t)/2$ 。所以，如果无人机能够在合理功率水平上释放干扰信号给雷达，后者就产生对目标物位置的错误判断，也就是发现假目标。

3.2.2 噪声压制干扰技术原理

如果是应用恒虚警检测的脉冲雷达，则：

$$P_{fa} = e^{-\frac{V_t^2}{2\psi^2}} \quad (3-15)$$

此时，它的信号检测门限电平的计算表达式为：

$$V_t = \sqrt{2\psi^2 \ln\left(\frac{1}{P_{fa}}\right)} \quad (3-16)$$

其中， V_t 为雷达信号检测的门限电平， ψ^2 为噪声平均功率， P_{fa} 为虚警概率。对上式进行分析能够确定：在虚警概率保持不变的情况下，决定门限电平的唯一因素是噪声平均功率。所以，若无人机能够释放特定功率的噪声信号，组网中雷达的检测门限会因此而提高，如此一来，就不能有效地检测目标回波信号，进而被无人机所欺骗。

根据学者们的研究能够确定,在虚警概率保持不变的前提下,目标检测概率和信噪比符合下式^[56]:

$$\chi \leq \frac{(P_d/P_{fa})^{1/N} - 1}{1 - P_d^{1/N}} \quad (3-17)$$

上式中, χ 代表目标信噪比, P_d 代表目标检测概率, N 代表雷达信号检测的参考单元长度。上式可以表明,在一定范围内改变噪声功率,目标信噪比就会随之而变化,目标检测概率 P_d 会被控制在一定区间内,低于期望值。据此可以充分证明,利用欺骗干扰无人机发射假目标干扰信号,同时利用噪声干扰无人机释放噪声干扰信号,就可以明显降低雷达识别的准确率,导致雷达组网不能通过无人机和假目标的运动关系对二者进行区分,成功实现欺骗的目的。

3.3 对组网雷达的多机协同复合干扰

3.3.1 组网雷达抗干扰能力

当前,战场上的电磁频谱空间受到了广泛的重视。一旦发生战争,即便要付出巨大的代价,作战双方也会激烈的争夺这一空间资源。雷达组网能够科学地部署各种雷达,并根据作战要求实时控制组网内雷达的运行状态,将各个雷达的性能和作用充分的挖掘和体现出来。如今,数据融合技术已经被引入到组网雷达中,如果在其覆盖范围内存在具有检测隐身飞机功能的雷达,然后将几部雷达的数据融合在一起并予以处理,组网雷达就可以基于处理后的信息找到假目标和电子战无人机的联系,进而导致干扰形成的假目标的可信度与有效性会显著降低。众多雷达集成在一起,就能够产生信息以及电磁方面的优势,从而实现更强的作战能力和对干扰的抗性。另外,组网雷达本身就具备抗干扰的能力,主要体现为:

(1)、大部分组网中的雷达,都能够基于多普勒滤波剔除掉回波所包含的杂波,如果连续假目标干扰信号分布在不同的滤波组中,雷达就会将其当作杂波并剔除掉,通过这种方式来应对干扰。

(2)、组网内的雷达采用频率捷变技术,从而将欺骗干扰的可实行距离控制在更低的范围内。如果距离太远,就无法施加持续的干扰信号,雷达会将其当作异步干扰,干扰效果就会受到限制;如果距离太近,雷达就能够确定电子战无人机的存在,完全排除假目标的干扰。

(3)、雷达天线具有抗干扰功能。在欺骗干扰过程中,干扰一般是从雷达旁瓣进入的,因此它需要具备很高的功率,同时无人机接收天线需要具备很高的灵敏度。所以,雷达的超低旁瓣技术以及旁瓣匿影技术都能够在一定程度上抵抗干扰的影响。

3.3.2 多机协同复合干扰优势

通过 3.3.1 节的分析可知,传统的假目标欺骗干扰已经基本上被组网雷达完全克服,其干扰作用是非常有限的。所以,当前最重要的是通过多无人机协同欺骗干扰将分布式干扰及空间航迹融合的优势充分发挥出来^{[57][58]},确保组网中的所有雷达都能够识别假目标,且其运动轨迹存在一定的关联;同时,通过噪声压制干扰来降低敌方组网中雷达的探测能力,保障执行欺骗干扰任务的无人机的安全性,从而提高假目标的可信度。这样一来就能够对组网雷达取得更好的“压制”效果,有利于我方后续的作战行动。多机协同复合干扰技术就是在这样的背景下诞生的。

对于组网雷达而言,多机协同复合干扰的效果是非常显著的,这主要得益于其具备以下优势:

(1)、欺骗干扰只需普通的电子设备就能够实现,为了使假目标更加可信,干扰信号和回波信号的功率不能够相差太远,所以,普通的电子设备,都能够释放出所需功率的干扰信号;

(2)、提高虚警概率。雷达检测到假目标后,会将其当作真实的目标,从而提供错误的情报,敌人根据这样的情报做出决策,会将兵力调往错误的方位,使我军获得兵力上的相对优势以及抢占战争先机。

(3)、如果制造出若干个假目标,由于敌方雷达系统会将其当作真实的目标,因此会立刻进行数据采集、处理,多个目标的数据处理工作量较大,甚至有可能导致雷达信息处理中心陷入到瘫痪中。

(4)、如果我方派出飞机执行作战任务,假目标就能够起到混淆的作用,从而避免我方飞机受到攻击。

(5)、迷惑对手,从而获取敌方的火力部署情报信息。如果敌方的作战系统被雷达错误预警所误导,并对假目标发动攻击,我方就能够趁机采集其火力分布信息,了解其火力部署情况。

(6)、配合压制干扰,有效地降低了敌方组网内雷达的探测能力,加强了假目标的混淆作用。

3.3.3 多机协同复合干扰要求

尽管多机协同复合干扰技术能够起到良好的干扰作用,但这种技术的应用本身比较困难,对组网中雷达参数的先验知识和无人机的性能有着较高的要求。

对敌方雷达的信息情报要求主要有^[59-61]:

(1)、位置坐标。若想要干扰到敌方雷达,首要前提是明确雷达的位置,尤其是面对雷达组时,必须根据其位置来调整电子战无人机的飞行,这样才能起到干扰效果。

(2)、工作频率。电子战无人机释放的欺骗干扰信号应该和雷达回波信号的载频

是相同的, 这样雷达才有可能将假目标当作真目标。

(3)、脉冲宽度。假目标干扰信号必须模拟敌方雷达回波信号运用线性调频机制, 因此需要基于脉冲宽度进行计算。

(4)、脉冲的重复频率。和工作频率类似, 干扰信号应该和回波信号的脉冲重复频率是相同的, 这样雷达才有可能将假目标当作真目标^[62]。

(5)、了解敌方雷达运行过程中天线是如何旋转的以及波束宽度的数值, 这样才能明确雷达运行的主瓣方位。

(6)、了解敌方雷达天线增益、平均发射功率和信噪比, 据此进一步计算出干扰信号的发射功率。

(7)、了解敌方雷达的接收机带宽。在进行假目标距离欺骗时, 需对干扰信号予以时延处理, 即在信号中添加频移, 所以需确保干扰信号始终处于接收机带宽区间内。

对电子战无人机的要求有:

(1)、无人机的隐身性能需要较为突出, 通常不会被组网雷达识别, 否则无人机和雷达的距离较短, 很有可能受到攻击。

(2)、无人机接收天线在分辨力、灵敏性方面需具备良好的表现。要达到欺骗干扰的目的, 最重要的是接收回波信号并予以分析, 从而为后续的干扰做好准备。

(3)、足够的发射功率。如果采用距离欺骗手段, 对干扰信号的功率并没有特别的要求; 如果采用距离+方位欺骗手段, 就必须具备足够的发射功率, 然后以雷达副瓣为切入点进行干扰。

(4)、辐射功率可改变。处在同一威胁网中的不同雷达, 其运行体制和频率往往存在差异, 因此对于不同的雷达, 应该采用相应功率的信号予以干扰, 所以, 无人机相关设备具有可控的辐射功率是非常关键的。

3.4 单机欺骗干扰单部雷达数学模型

3.4.1 假目标位置关系及运动模型

达到多机协同复合干扰敌方组网雷达这一目的前提是成功欺骗单部雷达, 产生任意期望的假目标航迹。为此, 笔者在这里创建了单架欺骗干扰无人机干扰单部敌方雷达的模型, 详见图 3.2, 该模型能够表征此时无人机、雷达和假目标三者之间的位置关系。下图 3.2 中, (x_p, y_p, z_p) 代表假目标的位置坐标, v_p 代表假目标的速度, β_p 代表假目标的航迹倾角, α_p 代表假目标的航迹偏角, u_{p1} 、 u_{p2} 和 u_{p3} 为假目标控制量, 依次代表假目标的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率(其数值基于操作人员设计的期望假目标运动航迹确定)。 (x_d, y_d, z_d) 代表欺骗干扰无人机的位置坐标, v_d 代表欺骗干扰无人机的速度, β_d 代表欺骗干扰无人机的航迹倾角, α_d 代表欺

骗干扰无人机的航迹偏角, u_{D1} 、 u_{D2} 和 u_{D3} 为欺骗干扰无人机的控制量, 三者依次代表欺骗干扰无人机的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率(其数值基于欺骗干扰任务确定)。 (x_o, y_o, z_o) 代表雷达的位置坐标, R 代表雷达到假目标的距离, r 代表雷达到无人机的距离, ϕ 代表雷达与假目标连线的方位角, θ 代表雷达与假目标连线的高低角。

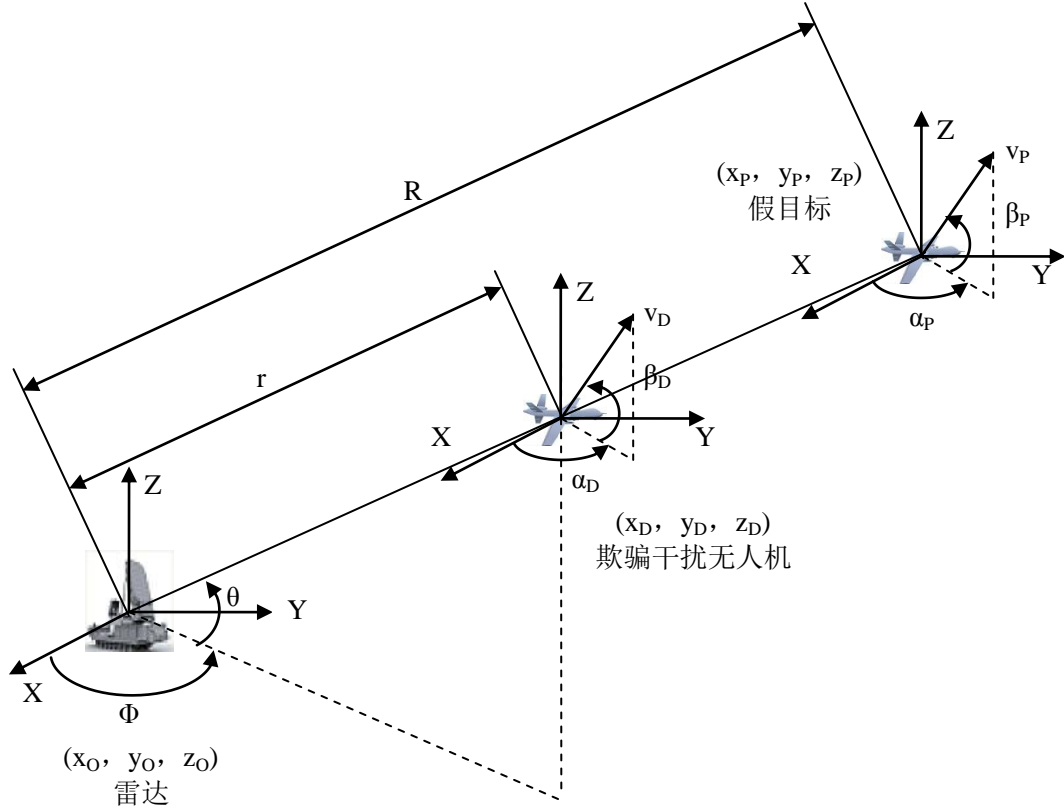


图 3.2 单欺骗干扰无人机干扰单部雷达位置关系示意图

在直角坐标系中, 假目标的运动学方程^[63]是:

$$\begin{cases} \dot{x}_P = v_P \cos \beta_P \cos \alpha_P \\ \dot{y}_P = v_P \cos \beta_P \sin \alpha_P \\ \dot{z}_P = v_P \sin \beta_P \\ \dot{v}_P = u_{P1} \\ \dot{\alpha}_P = u_{P2} \\ \dot{\beta}_P = u_{P3} \end{cases} \quad (3-18)$$

在球坐标体系中(原点和雷达位置重合), 假目标的位置满足:

$$\begin{cases} x_P = R \cos \theta \cos \phi \\ y_P = R \cos \theta \sin \phi \\ z_P = R \sin \theta \end{cases} \quad (3-19)$$

对式(3-19)求导, 有:

$$\begin{cases} \dot{x}_p = \dot{R} \cos \theta \cos \phi - R \sin \theta \cos \phi \dot{\theta} - R \cos \theta \sin \phi \dot{\phi} \\ \dot{y}_p = \dot{R} \cos \theta \sin \phi - R \sin \theta \sin \phi \dot{\theta} + R \cos \theta \cos \phi \dot{\phi} \\ \dot{z}_p = \dot{R} \sin \theta + R \cos \theta \dot{\theta} \end{cases} \quad (3-20)$$

转变为矩阵形式, 可以得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi & -\sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \cos \theta \dot{\phi} \\ R \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3-21)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{R} \\ R \cos \theta \dot{\phi} \\ R \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

联立式(3-18)和(3-22), 经过整理后有:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= v_p (\cos \theta \cos \phi \cos \beta_p \cos \alpha_p + \cos \theta \sin \phi \cos \beta_p \sin \alpha_p + \sin \theta \sin \beta_p) \\ &= v_p (\cos \theta \cos \beta_p \cos(\alpha_p - \phi) + \sin \theta \sin \beta_p) \end{aligned} \quad (3-23)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{v_p}{R \cos \theta} (-\sin \phi \cos \beta_p \cos \alpha_p + \cos \phi \cos \beta_p \sin \alpha_p) \\ &= \frac{v_p \cos \beta_p \sin(\alpha_p - \phi)}{R \cos \theta} \end{aligned} \quad (3-24)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{v_p}{R} (-\sin \theta \cos \phi \cos \beta_p \cos \alpha_p - \sin \theta \sin \phi \cos \beta_p \sin \alpha_p + \cos \theta \sin \beta_p) \\ &= \frac{v_p}{R} (-\sin \theta \cos \beta_p \cos(\alpha_p - \phi) + \cos \theta \sin \beta_p) \end{aligned} \quad (3-25)$$

式(3-23)~(3-25)就是假目标在球面坐标系中的位置微分方程组。

3.4.2 欺骗干扰无人机位置关系及运动模型

上一节推导了假目标的位置关系及运动模型, 最终得到了球坐标系下的假目标位置的微分方程组。本节将研究欺骗干扰无人机的位置关系及运动模型, 其推导与求解过程与上一节相类似。

在直角坐标系中, 欺骗干扰无人机的运动学方程具体如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_D = v_D \cos \beta_D \cos \alpha_D \\ \dot{y}_D = v_D \cos \beta_D \sin \alpha_D \\ \dot{z}_D = v_D \sin \beta_D \\ \dot{v}_D = u_{D1} \\ \dot{\alpha}_D = u_{D2} \\ \dot{\beta}_D = u_{D3} \end{cases} \quad (3-26)$$

转化为矩阵形式，可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ r \cos \theta \dot{\phi} \\ r \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{y}_D \\ \dot{z}_D \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

进一步整理可得：

$$\begin{aligned} \dot{r} &= v_D (\cos \theta \cos \phi \cos \beta_D \cos \alpha_D + \cos \theta \sin \phi \cos \beta_D \sin \alpha_D + \sin \theta \sin \beta_D) \\ &= v_D (\cos \theta \cos \beta_D \cos(\alpha_D - \phi) + \sin \theta \sin \beta_D) \end{aligned} \quad (3-28)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{v_D}{r \cos \theta} (-\sin \phi \cos \beta_D \cos \alpha_D + \cos \phi \cos \beta_D \sin \alpha_D) \\ &= \frac{v_D \cos \beta_D \sin(\alpha_D - \phi)}{r \cos \theta} \end{aligned} \quad (3-29)$$

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{v_D}{r} (-\sin \theta \cos \phi \cos \beta_D \cos \alpha_D - \sin \theta \sin \phi \cos \beta_D \sin \alpha_D + \cos \theta \sin \beta_D) \\ &= \frac{v_D}{r} (-\sin \theta \cos \beta_D \cos(\alpha_D - \phi) + \cos \theta \sin \beta_D) \end{aligned} \quad (3-30)$$

式(3-28)~(3-30)就是欺骗干扰无人机在球面坐标系中的位置微分方程组。

3.4.3 电子战无人机控制模型

在采取距离欺骗技术时，欺骗干扰无人机、雷达、假目标三者可以通过一条直线相连，受到假目标轨迹的限制，无人机的自由度可以降低到一维。此时对欺骗干扰无人机运动学方程予以简化处理，联立式(3-29)和(3-30)得到下式：

$$\tan \beta_D = \frac{\cos \theta \sin \theta \cos(\alpha_D - \phi) \dot{\phi} + \sin(\alpha_D - \phi) \dot{\theta}}{\cos^2 \theta \dot{\phi}} \quad (3-31)$$

联立式(3-29)、式(3-31)和(3-28)，此时有：

$$\dot{r} = r\dot{\phi} \left[\cos^2 \theta \cot(\alpha_D - \phi) + \tan \beta_D \frac{\cos \theta \sin \theta}{\sin(\alpha_D - \phi)} \right] \quad (3-32)$$

欺骗干扰无人机的控制方程是：

$$\dot{\alpha}_D = u_{D2} \quad (3-33)$$

基于式(3-29)可以确定欺骗干扰无人机的速度计算公式为：

$$v_D^2 = (\dot{r})^2 + (r \cos \theta \dot{\phi})^2 + (r \dot{\theta})^2 \quad (3-34)$$

此时，式(3-26)、式(3-28)~(3-34)即为单机欺骗干扰单部雷达的数学模型。

3.4.4 耦合方程

求解上节得到的系统模型方程，最重要的步骤是式(3-31)、(3-32)以及(3-34)的计算，三个式子的耦合因子是 θ ， ϕ ， $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\phi}$ ，根据图 3.2 可知，无人机、雷达和假目标处在同一条直线上，所以我们可以采用假目标的方位角、俯仰角来分别表示欺骗干扰无人机的方位角、俯仰角，基于图 3.2 得到下式：

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{z_P - z_O}{R} \right) \quad (3-35)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{y_P - y_O}{x_P - x_O} \right) \quad (3-36)$$

对上两式求导有：

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{z_P - z_O}{R} \right)^2}} \cdot \frac{\dot{z}_P R - \dot{R}(z_P - z_O)}{R^2} \\ &= \frac{\dot{z}_P \sqrt{(x_P - x_O)^2 + (y_P - y_O)^2}}{R^2} - \frac{(z_P - z_O)}{R^2} \left[\frac{(x_P - x_O)\dot{x}_P}{R_{xy}} + \frac{(y_P - y_O)\dot{y}_P}{R_{xy}} \right] \end{aligned} \quad (3-37)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{1}{1 + \left(\frac{y_P - y_O}{x_P - x_O} \right)^2} \cdot \frac{(x_P - x_O)\dot{y}_P - (y_P - y_O)\dot{x}_P}{(x_P - x_O)^2} \\ &= \frac{(x_P - x_O)\dot{y}_P - (y_P - y_O)\dot{x}_P}{R_{xy}^2} \end{aligned} \quad (3-38)$$

以上两式中, $R_{xy} = \sqrt{(x_p - x_o)^2 + (y_p - y_o)^2}$ 。上述推导表明, 将雷达位置 (x_o, y_o, z_o) 和根据实际情况提前设计的假目标运动轨迹 $(x_p(t), y_p(t), z_p(t), \dot{x}_p(t), \dot{y}_p(t), \dot{z}_p(t))$ 代入到式(3-35) ~ (3-38)中进行计算, 就能够得到式(3-31)、(3-32)以及(3-34)中的耦合因子 θ 、 ϕ 、 $\dot{\theta}$ 和 $\dot{\phi}$ 的值。

3.5 多机协同复合干扰组网雷达数学模型

3.5.1 多机协同复合干扰组网雷达任务想定

假定无人机获得了雷达探测性能的准确情报, 那它能够针对接收到的雷达辐射信号进行再处理并转发出去, 而雷达通过处理接收到的无人机发射的转发信号后将会在其目标监视器上显示一个我方期望的假目标。利用这一思路进行欺骗, 一个无人机仅可以让一部雷达做出错误的判断, 但组网内的雷达可以彼此共享数据, 并基于信息的关联成功识破我方假目标, 从而将其剔除掉, 使得假目标形成的航迹失去了作用。也就是说, 这种方法无法有效地干扰整个雷达网。要让整个雷达网都无法识别无人机的存在, 是很困难的, 主要体现为:

(1)、怎样才能欺骗雷达网, 导致若干雷达经过信息共享后, 识别到的假目标是同一个, 使其仅捕获一条满足运动特性的虚假目标航迹。要做到这一点, 可以考虑采用无人机组方式, 确保每一时刻所有雷达到对应的无人机的连线产生一个仅有的交点, 最终仅产生一条假目标航迹^[26];

(2)、怎样才能通过噪声压制干扰为无人机提供掩护, 避免无人机被其他雷达识别, 进而提升假目标轨迹的可信度。要做到这一点, 必须对压制干扰无人机进行协调的控制。

多机协同复合干扰作战任务模型详见下图 3.3。其中, $t(0)$ 和 $t(n)$ 均代表任务过程中的任意时刻。由下图可知, 按照一对一欺骗的方式, 采用多架欺骗干扰无人机对对应的雷达施加距离延迟欺骗技术, 达到每一部雷达判定出的假目标位于同一个位置的效果。任务过程中, 对所有无人机进行协同控制, 使其在特定的速度和航向下飞行, 从而有效的欺骗敌方组网雷达。另外, 为了实现掩护的目的, 还可以为所有的欺骗干扰无人机配备压制干扰无人机。压制干扰无人机在雷达和欺骗干扰无人机的视线方向上进行噪声压制干扰, 如此, 雷达组网内的其他雷达就不容易发现欺骗干扰无人机, 从而增加了欺骗干扰无人机的安全性, 提升了假目标轨迹的可信度。

当然, 虽然当前提出的多机协同复合干扰组网雷达是基于 2 部雷达进行讨论的, 但其实该构想适用于任意多部雷达组网的情况, 只需根据实际雷达数量改变欺骗干扰无人机与压制干扰无人机的数量即可。

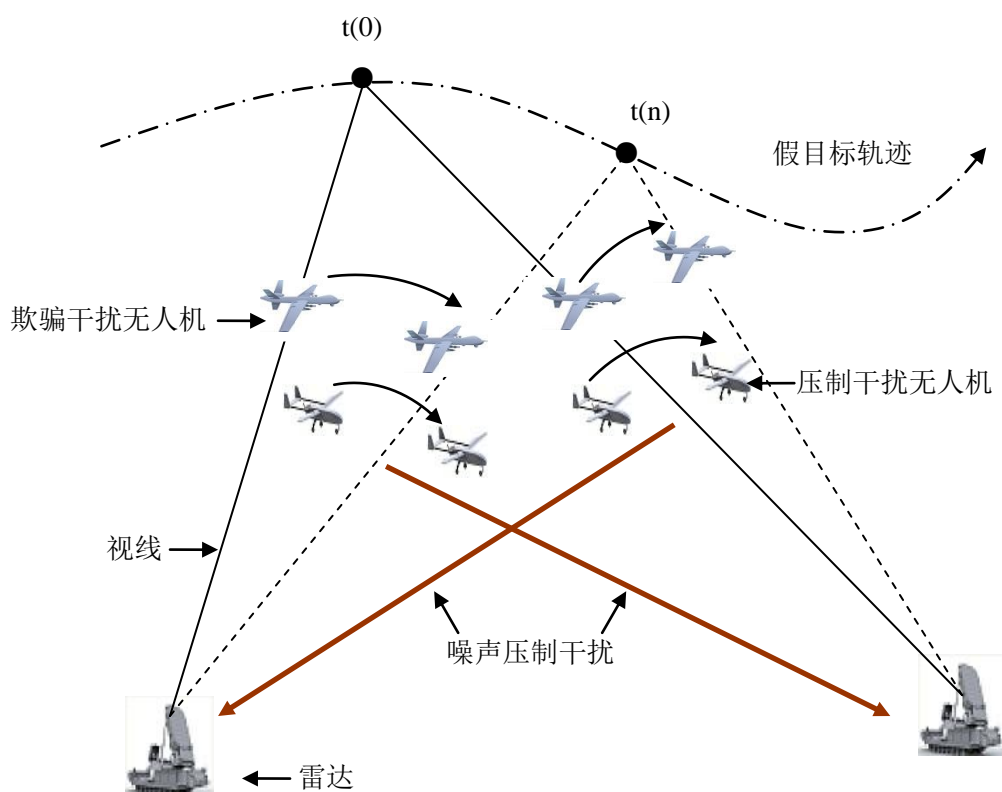


图 3.3 多机协同复合干扰作战任务模型

在利用多架无人机实施协同欺骗的过程中，单机的运动模型在前文 3.4 节中已经有所分析，但在协同状态下，必须将假目标的运动模型在以各个雷达为原点的坐标系里面反复切换，从而确保各个雷达识别到同一个假目标，具体矢量关系详见下图 3.4。

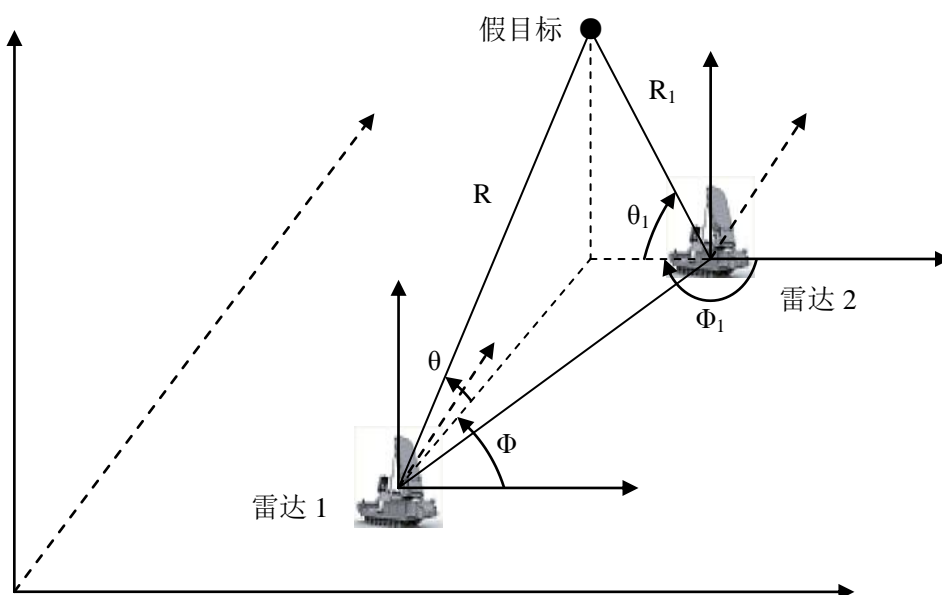


图 3.4 协同航迹欺骗时假目标状态转换

通过上述分析可知, 将前文所述的单机欺骗干扰单部雷达模型, 耦合关系式(3-35)~(3-38), 还有假目标位置公式(3-18)组合在一起, 就得到了多机协同欺骗多部雷达的系统模型。

3.5.2 压制干扰无人机位置关系及运动模型

由于压制干扰无人机在雷达和欺骗干扰无人机的视线方向上对敌方雷达进行噪声压制干扰, 据此可以确定三者之间的空间位置关系, 详见下图 3.5。

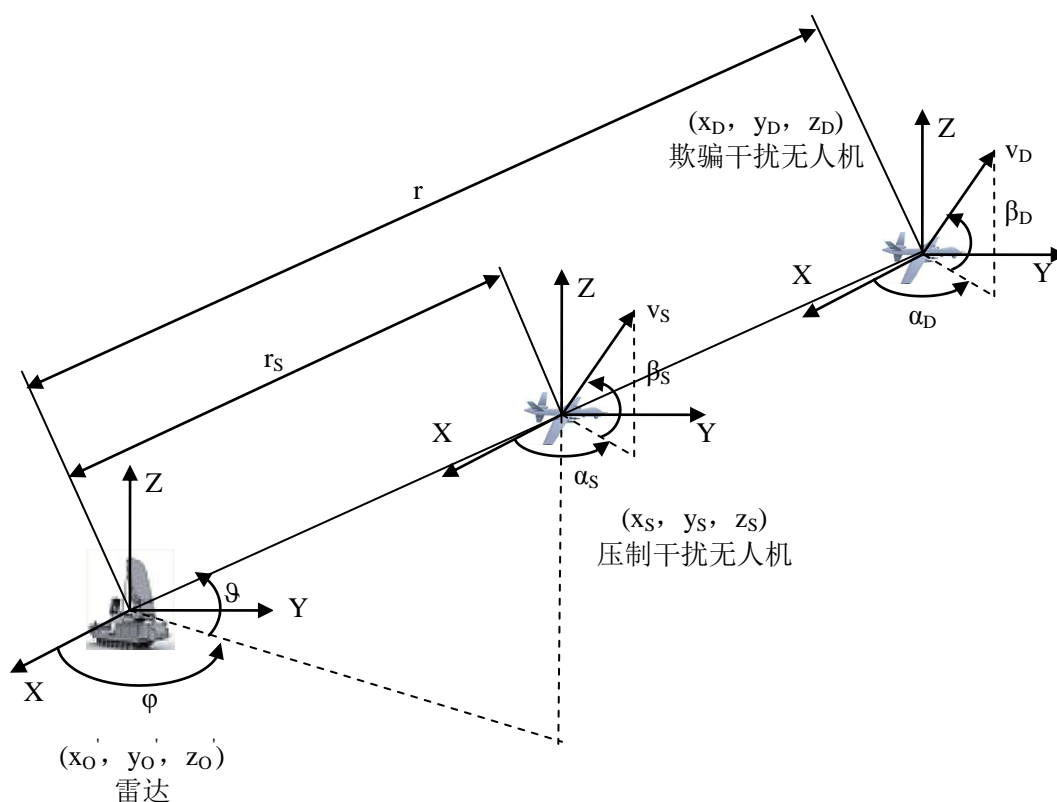


图 3.5 噪声压制干扰无人机位置关系示意图

上图 3.5 中, (x_D, y_D, z_D) 代表欺骗干扰无人机的位置坐标, v_D 代表欺骗干扰无人机的速度, β_D 代表欺骗干扰无人机的航迹倾角, α_D 代表欺骗干扰无人机的航迹偏角, u_{D1} 、 u_{D2} 和 u_{D3} 为欺骗干扰无人机的控制量, 依次代表欺骗干扰无人机的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率(其数值基于具体的欺骗干扰任务确定)。 (x_S, y_S, z_S) 代表压制干扰无人机的位置坐标, v_S 代表压制干扰无人机的速度, β_S 代表压制干扰无人机的航迹倾角, α_S 代表压制干扰无人机的航迹偏角, u_{S1} 、 u_{S2} 和 u_{S3} 为压制干扰无人机的控制量, 三者依次代表压制干扰无人机的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率(三者的数值是基于噪声压制干扰任务内容确定的)。 (x'_o, y'_o, z'_o) 代表被压制雷达的位置坐标, r 代表雷达到欺骗干扰无人机的距离(与 3.4 节统一), r_S

代表雷达到压制干扰无人机的距离， φ 代表雷达、压制干扰无人机、欺骗干扰无人机三者连线的方位角， θ 代表雷达、压制干扰无人机、欺骗干扰无人机三者连线的俯仰角。

在直角坐标系中，压制干扰无人机的运动学方程和欺骗干扰无人机比较接近，具体如下：

$$\begin{cases} \dot{x}_S = v_S \cos \beta_S \cos \alpha_S \\ \dot{y}_S = v_S \cos \beta_S \sin \alpha_S \\ \dot{z}_S = v_S \sin \beta_S \\ \dot{v}_S = u_{S1} \\ \dot{\alpha}_S = u_{S2} \\ \dot{\beta}_S = u_{S3} \end{cases} \quad (3-39)$$

同理于上文对于欺骗干扰无人机数学模型的推导，把式(3-39)转换到以被压制雷达位置坐标为原点的球坐标系中，此时有：

$$\begin{aligned} \dot{r}_S &= v_S (\cos \vartheta \cos \phi \cos \beta_S \cos \alpha_S + \cos \vartheta \sin \phi \cos \beta_S \sin \alpha_S + \sin \vartheta \sin \beta_S) \\ &= v_S (\cos \vartheta \cos \beta_S \cos(\alpha_S - \phi) + \sin \vartheta \sin \beta_S) \end{aligned} \quad (3-40)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \frac{v_S}{r_S \cos \vartheta} (-\sin \phi \cos \beta_S \cos \alpha_S + \cos \phi \cos \beta_S \sin \alpha_S) \\ &= \frac{v_S \cos \beta_S \sin(\alpha_S - \phi)}{r_S \cos \vartheta} \end{aligned} \quad (3-41)$$

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta} &= \frac{v_S}{r_S} (-\sin \vartheta \cos \phi \cos \beta_S \cos \alpha_S - \sin \vartheta \sin \phi \cos \beta_S \sin \alpha_S + \cos \vartheta \sin \beta_S) \\ &= \frac{v_S}{r_S} (-\sin \vartheta \cos \beta_S \cos(\alpha_S - \phi) + \cos \vartheta \sin \beta_S) \end{aligned} \quad (3-42)$$

压制干扰无人机不会离开雷达和欺骗干扰无人机的视线，它的运动被欺骗干扰无人机的轨迹所限制，简化其运动方程可以得到：

$$\tan \beta_S = \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta \cos(\alpha_S - \phi) \phi + \sin(\alpha_S - \phi) \vartheta}{\cos^2 \vartheta \phi} \quad (3-43)$$

$$\dot{r}_S = r_S \dot{\phi} \left[\cos^2 \vartheta \cot(\alpha_S - \phi) + \tan \beta_S \frac{\cos \vartheta \sin \vartheta}{\sin(\alpha_S - \phi)} \right] \quad (3-44)$$

压制干扰无人机的控制方程为:

$$\dot{\alpha}_s = u_{s2} \quad (3-45)$$

压制干扰无人机的速度为:

$$v_s^2 = (\dot{r}_s)^2 + (r_s \cos \vartheta \dot{\varphi})^2 + (r_s \dot{\vartheta})^2 \quad (3-46)$$

式(3-39)~(3-46)共同构成了压制干扰过程中该无人机的数学模型。

3.5.3 最优控制模型

通过上述分析可知,上文探讨的多电子战无人机协同复合干扰方法需要通过欺骗干扰与压制干扰来共同实现。而对电子战无人机干扰过程中的航路规划,则可以通过不同的代价函数来完成。当然,相同情况下,不同的代价函数会导致最终规划出的无人机飞行航路与相应的运动参数不尽相同。

若从干扰实施的稳定性这一角度出发,就应使电子战无人机的轨迹曲率尽可能较小,此时可以用如下代价函数来进行航路规划^[64]:

$$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt \quad (3-47)$$

式(3-47)中, t_0 代表任务的起始时间, t_f 代表任务的终止时间, u_{E2} 代表电子战无人机(包括本文所述的欺骗干扰无人机与压制干扰无人机)的航迹偏角变化率。

若当前执行任务的电子战无人机体积较小,导致其能够携带的燃料较少,那么规划航路时就应该以使无人机在飞行过程中能耗尽可能小为出发点和主要考虑因素,因此引入代价函数:

$$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt \quad (3-48)$$

其中, v_E 代表电子战无人机的速度。

在实际规划航路时,还可以利用文献[65]给出的飞行器飞行过程中推力的表达式作为代价函数,其它常见的用于无人机航路规划的代价函数还有从过载角度出发的

$J = \left(\frac{\dot{r}}{v_E} \right)^2 [1 + (\ddot{\varphi})^2]$ 等, 本文就不再一一讨论与仿真。

为了规划出相对真实可靠的电子战无人机飞行航路,本文在 7 种飞行参数限制下对无人机航路进行了最优化求解,飞行参数约束如下:

加速度约束:

$$u_{E1\min} \leq u_{E1} \leq u_{E1\max} \quad (3-49)$$

式中, u_{E1} 代表电子战无人机的加速度, $u_{E1\min}$ 代表电子战无人机的最小加速度, $u_{E1\max}$ 代表电子战无人机的最大加速度。

航迹偏角变化率约束:

$$u_{E2\min} \leq u_{E2} \leq u_{E2\max} \quad (3-50)$$

式中, $u_{E2\min}$ 表示电子战无人机的最小航迹偏角变化率; $u_{E2\max}$ 表示电子战无人机的最大航迹偏角变化率。

航迹倾角变化率约束:

$$u_{E3\min} \leq u_{E3} \leq u_{E3\max} \quad (3-51)$$

式中, u_{E3} 表示电子战无人机的航迹倾角变化率, $u_{E3\min}$ 表示电子战无人机的最小航迹倾角变化率, $u_{E3\max}$ 表示电子战无人机的最大航迹倾角变化率。

航迹倾角约束:

$$\beta_{E\min} \leq \beta_E \leq \beta_{E\max} \quad (3-52)$$

式中, β_E 表示电子战无人机的航迹倾角, $\beta_{E\min}$ 表示电子战无人机的最小航迹倾角, $\beta_{E\max}$ 表示电子战无人机的最大航迹倾角。

速度约束:

$$v_{E\min} \leq v_E \leq v_{E\max} \quad (3-53)$$

式中, $v_{E\min}$ 代表电子战无人机的最小速度, $v_{E\max}$ 代表电子战无人机的最大速度。

升降速度约束:

$$v_{z\min} \leq \dot{z}_E \leq v_{z\max} \quad (3-54)$$

式中, \dot{z}_E 代表电子战无人机的升降速度, $v_{z\min}$ 代表电子战无人机的最小升降速度, $v_{z\max}$ 代表电子战无人机的最大升降速度。

另外, 如果电子战无人机和雷达过于靠近, 则很有可能会被雷达识别; 如果电子战无人机和假目标或其它无人机过于接近, 则容易被敌方雷达同时发现并一并打击^[24]。所以, 它和另外二者的距离必须满足下式:

$$\lambda_{\min} \leq \frac{r_E}{R_E} \leq \lambda_{\max} \quad (3-55)$$

式(3-55)中, r_E 代表当前进行航路规划的电子战无人机距被其干扰的敌方雷达的距离。当规划欺骗干扰无人机航路时, R_E 代表雷达距假目标的距离; 当规划压制干扰无人机航路时, R_E 代表雷达距相应的欺骗干扰无人机的距离。

综上, 多机协同复合干扰航路规划的最优控制模型如下:

$$\begin{aligned} \min J &= \int_{t_0}^{t_f} \left(\sum_{i=1}^N u_{E2,i}^2 \right) dt \\ \text{s.t. } \dot{\alpha}_{E,i} &= u_{E2,i} \\ \dot{r}_{E,i} &= r_{E,i} \dot{\phi}_{E,i} \left[\cos^2 \theta_{E,i} \cot(\alpha_{E,i} - \varphi_{E,i}) + \tan \beta_{E,i} \frac{\cos \theta_{E,i} \sin \theta_{E,i}}{\sin(\alpha_{E,i} - \varphi_{E,i})} \right] \\ \tan \beta_{E,i} &= \frac{\cos \theta_{E,i} \sin \theta_{E,i} \cos(\alpha_{E,i} - \varphi_{E,i}) \dot{\phi}_{E,i} + \sin(\alpha_{E,i} - \varphi_{E,i}) \dot{\theta}_{E,i}}{\cos^2 \theta_{E,i} \dot{\phi}_{E,i}} \\ v_{E,i}^2 &= (\dot{r}_{E,i})^2 + (r_{E,i} \cos \theta_{E,i} \dot{\phi}_{E,i})^2 + (r_{E,i} \dot{\theta}_{E,i})^2 \\ \dot{z}_{E,i} &= v_{E,i} \sin \beta_{E,i} \\ \dot{v}_{E,i} &= u_{E1,i} \\ \dot{\beta}_{E,i} &= u_{E3,i} \\ v_{E \min} &\leq v_{E,i} \leq v_{E \max} \\ v_{z \min} &\leq \dot{z}_{E,i} \leq v_{z \max} \\ u_{E1 \min} &\leq u_{E1,i} \leq u_{E1 \max} \\ u_{E2 \min} &\leq u_{E2,i} \leq u_{E2 \max} \\ u_{E3 \min} &\leq u_{E3,i} \leq u_{E3 \max} \\ \beta_{E \min} &\leq \beta_{E,i} \leq \beta_{E \max} \\ \lambda_{\min} &\leq \frac{r_{E,i}}{R_{E,i}} \leq \lambda_{\max} \end{aligned} \quad (3-56)$$

其中, N 代表电子战无人机的架数, 下表 i 代表第 i 架电子战无人机, $\theta_{E,i}$ 代表球坐标系下第 i 架电子战无人机的俯仰角, $\varphi_{E,i}$ 代表第 i 架电子战无人机的方位角。

本文如(3-56)所示的对组网雷达的无人机干扰航路规划模型与文献[14]提出的模型相比, 考虑了更多的无人机飞行参数限制, 加入了更多的不等限制条件, 使得所规划出的无人机飞行航路与状态更贴合实际情况。

通过计算式(3-56), 可以确定电子战无人机的最优状态 $v_{E,i}^*(t)$ 、 $\alpha_{E,i}^*(t)$ 、 $\beta_{E,i}^*(t)$ 、 $r_{E,i}^*(t)$ 和最优控制量 $u_{E2,i}^*(t)$, 然后利用式(3-57)进行计算, 确定无人机的最优航迹。

$$\begin{cases} x_{E,i}^* = r_{E,i}^* \cos \theta_{E,i} \cos \varphi_{E,i} \\ y_{E,i}^* = r_{E,i}^* \cos \theta_{E,i} \sin \varphi_{E,i} \\ z_{E,i}^* = r_{E,i}^* \sin \theta_{E,i} \end{cases} \quad (3-57)$$

当然,规划航路时,先根据组网中每部雷达位置与期望的假目标轨迹规划出全部欺骗干扰无人机的航路;然后再根据规划出的每架欺骗干扰无人机的航路与对应雷达的位置来进一步规划出相应的压制干扰无人机的航路。

针对上述最优控制问题,可以用最优式算法(如穷举法)或启发式算法(如粒子群算法)进行求解。文献[14]基于梯度法的一般步骤提出了多机协同复合干扰最优航迹规划算法,下面给出该算法的执行流程:

- (1)、给定期望假目标航迹的控制量 $u_{p1}(t)$ 、 $u_{p2}(t)$ 和 $u_{p3}(t)$ 以及相应的假目标航迹;
- (2)、在雷达位置 (x_o, y_o, z_o) 和假目标运动轨迹 $(x_p(t), y_p(t), z_p(t), \dot{x}_p(t), \dot{y}_p(t), \dot{z}_p(t))$ 已知的情况下,利用式(3-35)~(3-38)进行计算,由此得到耦合因子 $\phi_E(t)$ 、 $\theta_E(t)$ 、 $\dot{\phi}_E(t)$ 和 $\dot{\theta}_E(t)$;
- (3)、选择初始控制量 $U_{E2}^i(t) = u_{E2}^0$, 令 $i = 0$;
- (4)、哈密尔顿函数为:

$$H = u_{E2}^2 + \lambda_1 r_E \dot{\phi}_E \left[\cos^2 \theta_E \cot(\alpha_E - \phi_E) + \tan \beta_E \frac{\cos \theta_E \sin \theta_E}{\sin(\alpha_E - \phi_E)} \right] + \lambda_2 u_{E2} \quad (3-58)$$

将 $U^i(t)$ 代入状态方程 $\dot{X} = \frac{\partial H}{\partial \lambda}$, 整理可得:

$$\begin{cases} \dot{r}_E = r_E \dot{\phi}_E \left[\cos^2 \theta_E \cot(\alpha_E - \phi_E) + \tan \beta_E \frac{\cos \theta_E \sin \theta_E}{\sin(\alpha_E - \phi_E)} \right] \\ \dot{\alpha}_E = u_{E2} \\ \tan \beta_E = \frac{\cos \theta_E \sin \theta_E \cos(\alpha_E - \phi_E) \dot{\phi}_E + \sin(\alpha_E - \phi_E) \dot{\theta}_E}{\cos^2 \theta_E \dot{\phi}_E} \end{cases} \quad (3-59)$$

将状态方程在初始条件 $X(t_0) = [r_{E0}, \alpha_{E0}]^T$ 下,从 t_0 到 t_f 对 t 来积分,由此确定 $X^i(t) = [r_E^i, \alpha_E^i]^T$;

- (5)、基于下式计算性能指标 $J(U^i(t))$

$$J(U^i(t)) = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt \quad (3-60)$$

- (6)、判断 $\left| (J^i - J^{i-1}) / J^{i-1} \right| \leq \text{Err}$? (Err 代表误差精度,其值非常小,每当程序完成

一次迭代后, 就会判断 $\left| (J^i - J^{i-1}) / J^{i-1} \right| \leq Err$? 是否成立。如果成立, 就证明性能指标 J^i 距离最优值非常接近, 是可接受的, 结束迭代过程。由此可见, Err 的作用是描述迭代有没有达到可接受的程度。)

如果是, 令 $U^*(t) = U^i(t)$, $X^*(t) = X^i(t)$, 跳到步骤(12);

如果不是, 继续下一步骤;

(7)、协态方程 $\dot{\lambda} = -\partial H / \partial X$ 的展开形式如下:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_1 = -\lambda_1 \dot{\phi}_E \left[\cos^2 \theta_E \cot(\alpha_E - \phi_E) + \tan \beta_E \frac{\cos \theta_E \sin \theta_E}{\sin(\alpha_E - \phi_E)} \right] \\ \dot{\lambda}_2 = \frac{\lambda_1 r_E \dot{\theta}_E}{\sin^2(\alpha_E - \phi_E)} \end{cases} \quad (3-61)$$

在终端条件 $\lambda(t_f) = 0$ 下, 将上式(3-61)从 t_f 到 t_0 对 t 进行反向积分, 由此确定 $\lambda^i(t) = [\lambda_1^i(t), \lambda_2^i(t)]^T$;

(8)、计算梯度向量 $g^i = [\partial H / \partial U(t)]_i = [\partial H / \partial U(t)]_{\substack{U(t)=U^i(t) \\ X(t)=X^i(t) \\ \lambda(t)=\lambda^i(t)}}$, 经整理后得到:

$$g^i = \lambda_2^i + 2u_{E2} \quad (3-62)$$

(9)、如果有 $g^i = 0$, 那么 $U^*(t) = U^i(t)$, $X^*(t) = X^i(t)$, 跳到步骤(12)。

否则, 跳至步骤(10)。

(10)、进行一维搜索, 通过计算得到 $\alpha_i > 0$, 令

$$J(U^i(t) - \alpha_i g^i) = \min_{\alpha > 0} J(U(t) - \alpha g^i) \quad (3-63)$$

(11)、置 $i = i + 1$, 令

$$U^{i+1}(t) = U^i(t) - \alpha_i g^i \quad (3-64)$$

跳到步骤(4)重新迭代计算。

(12)、跳到步骤(2), 基于其他雷达位置展开计算, 直到确定组内针对全部雷达的欺骗干扰无人机航迹;

(13)、跳到步(2), 代入已经确定的欺骗干扰无人机最优航迹, 以此替换假目标航迹, 直到得到全部压制干扰无人机最优航迹, 算法完成。

3.6 仿真与分析

本节在 Matlab 环境下对本章所介绍的航路规划算法的有效性进行验证。假设在 3.6.1 节对欺骗单部雷达的无人机进行航路规划算法仿真时, 雷达的坐标为 $(0,0,0)m$;

在 3.6.2 节与 3.6.3 节对组网雷达进行多机协同复合干扰航路规划时, 2 部组网雷达的坐标分别为 $(0,15000,0)m$ 、 $(5000,0,0)m$ 。仿真总时长为 60s, 单步时间步长为 0.1s。无人机飞行参数约束如表 3.1 所示:

表 3.1 无人机干扰雷达时飞行参数约束

参数	数值	参数	数值
最小加速度 $u_{E1\min}$ (m/s^2)	-30	最大加速度 $u_{E1\max}$ (m/s^2)	30
最小航迹偏角变化率 $u_{E2\min}$ ($^\circ/s$)	-20	最大航迹偏角变化率 $u_{E2\max}$ ($^\circ/s$)	20
最小航迹倾角变化率 $u_{E3\min}$ ($^\circ/s$)	-15	最大航迹倾角变化率 $u_{E3\max}$ ($^\circ/s$)	15
最小速度 $v_{E\min}$ (m/s)	60	最大速度 $v_{E\max}$ (m/s)	300
最小航迹倾角 $\beta_{E\min}$ ($^\circ$)	-30	最大航迹倾角 $\beta_{E\max}$ ($^\circ$)	30
最小升降速度 $v_{z\min}$ (m/s)	-30	最大升降速度 $v_{z\max}$ (m/s)	40
最小距离约束 λ_{\min}	0.2	最大距离约束 λ_{\max}	0.8

3.6.1 单机欺骗单部雷达仿真与分析

本小节对传统的单架无人机欺骗干扰单部敌方雷达时无人机飞行航路与飞行参数进行规划仿真, 这同时也是多电子战无人机协同复合干扰敌方组网雷达仿真实验的基础。本小节仿真时欺骗干扰所形成的假目标轨迹为(单位为 m):

$$\begin{cases} x(t) = 300t + 20000 \\ y(t) = 800\cos(\pi t/60) - 300t + 38000 \\ z(t) = 1000\sin(\pi t/30) + 19000 \end{cases} \quad (3-65)$$

下图 3.6 是基于本文最优控制模型所规划出的单机欺骗干扰单部雷达的示意图。

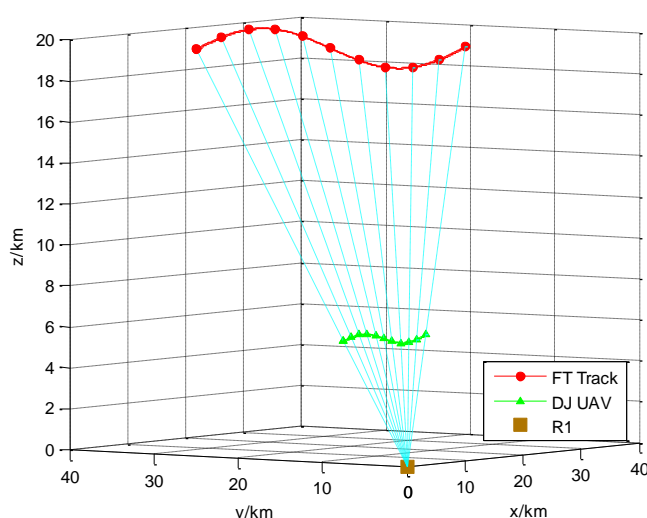


图 3.6 单机欺骗干扰单部雷达示意图

图中, “FT Track” 代表假目标轨迹, “DJ UAV” 代表欺骗干扰无人机。从图 3.6

中可以看出, 每一个时刻, 我方欺骗干扰无人机均处于敌方雷达与我方期望的假目标轨迹点联结所得的线段之上, 截获敌方雷达信号并对其进行欺骗干扰, 从而形成如图 3.7 中红色线段所示的具有真实目标特性的期望假目标运动轨迹。

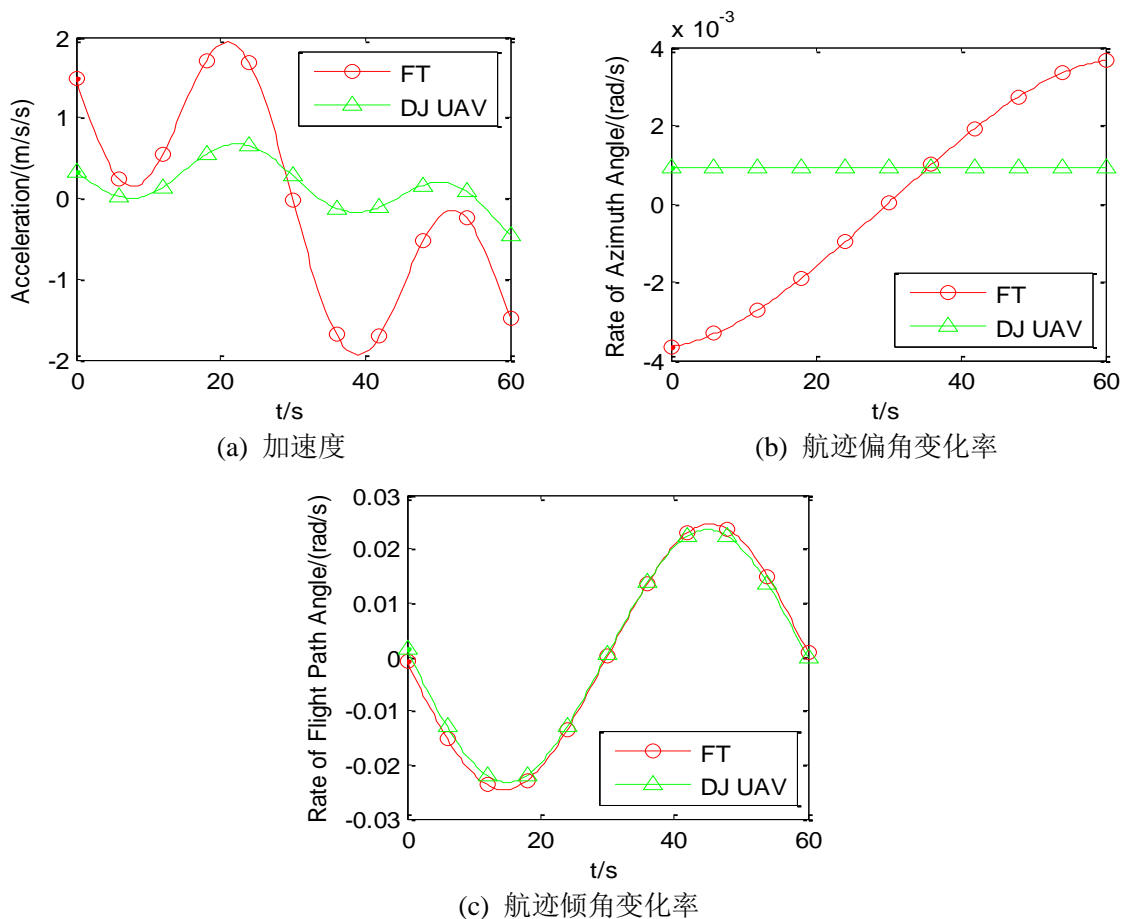
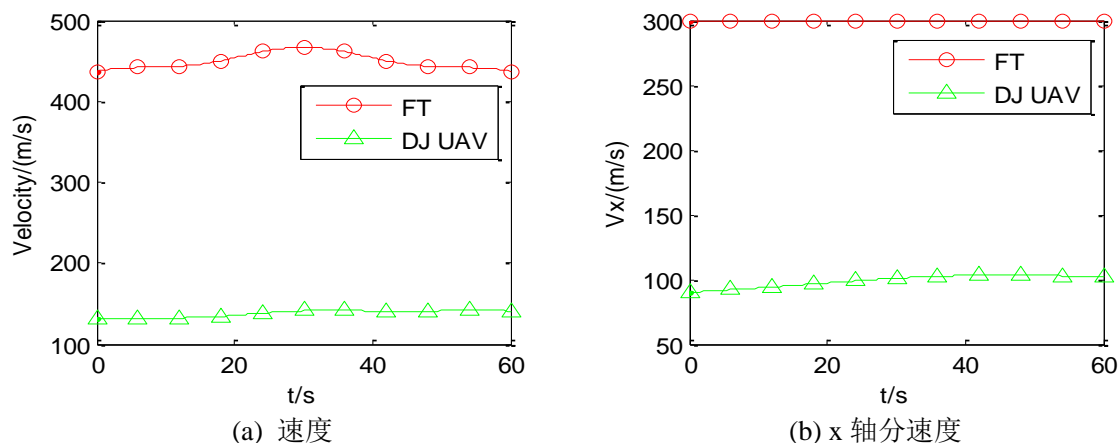


图 3.7 电子战无人机控制量变化曲线

图 3.7 为在当前单机欺骗干扰单部雷达这一任务下规划出的电子战无人机控制量变化曲线。从图中可以看出, 按照图 3.6 所示的无人机航迹飞行时, 相应的无人机加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 3.1 中的无人机参数约束。



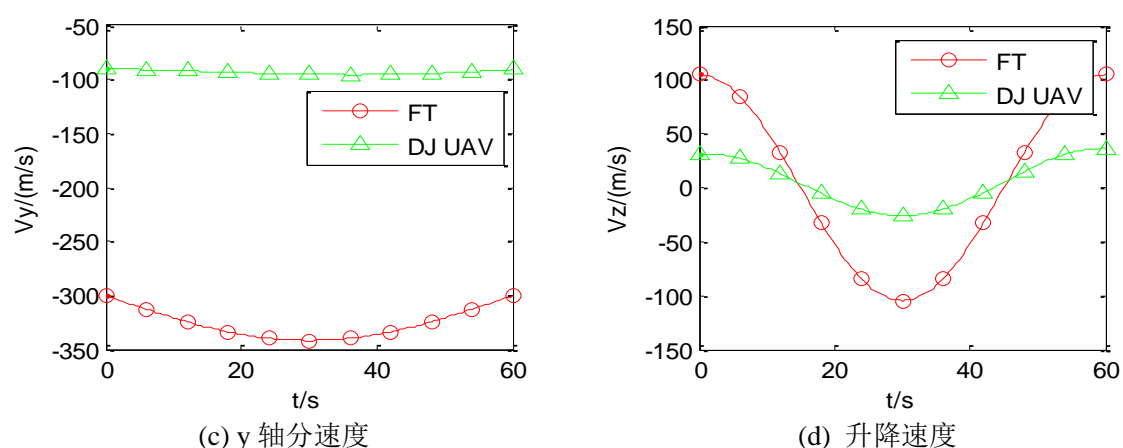


图 3.8 电子战无人机速度变化曲线

图 3.8 为任务过程中电子战无人机速度变化曲线，满足表 3.1 中的参数限制。

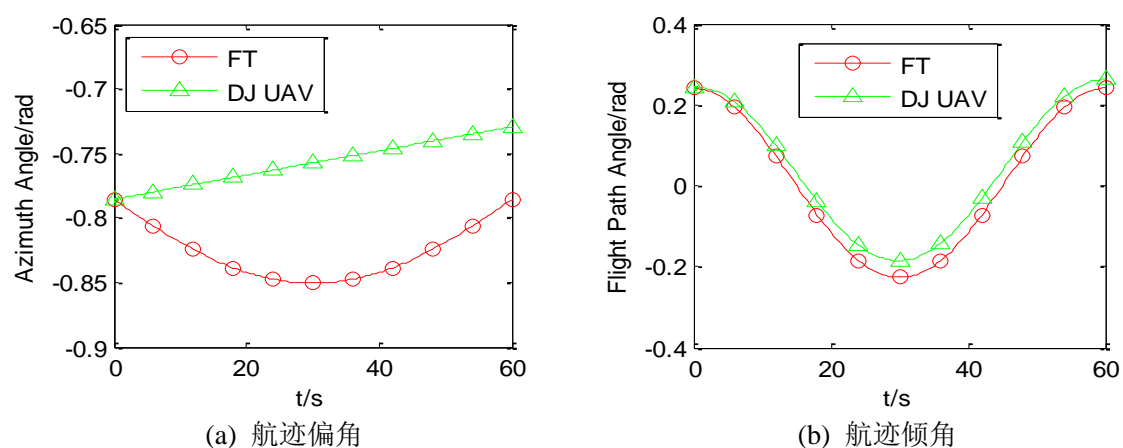
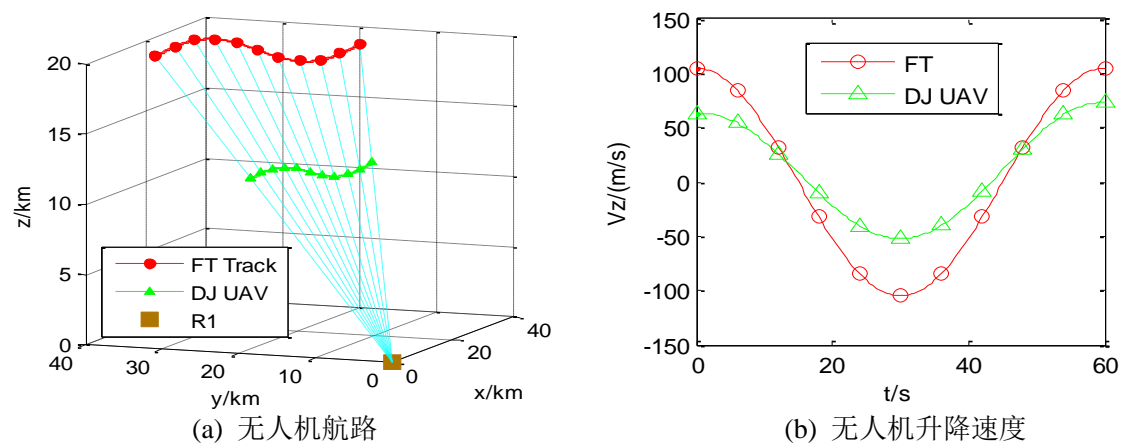


图 3.9 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 3.9 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出，在整个任务过程中，无人机速度方向变化较小，且始终符合相应的约束限制。

本文所提出的无人机欺骗干扰航迹规划最优控制模型与文献[14]相比，多了升降速度、航迹倾角变化率与加速度三个飞行参数限制条件。在相同的条件下，根据文献[14]中的最优控制模型规划出的航路与上述三个飞行参数示意图如下图所示。



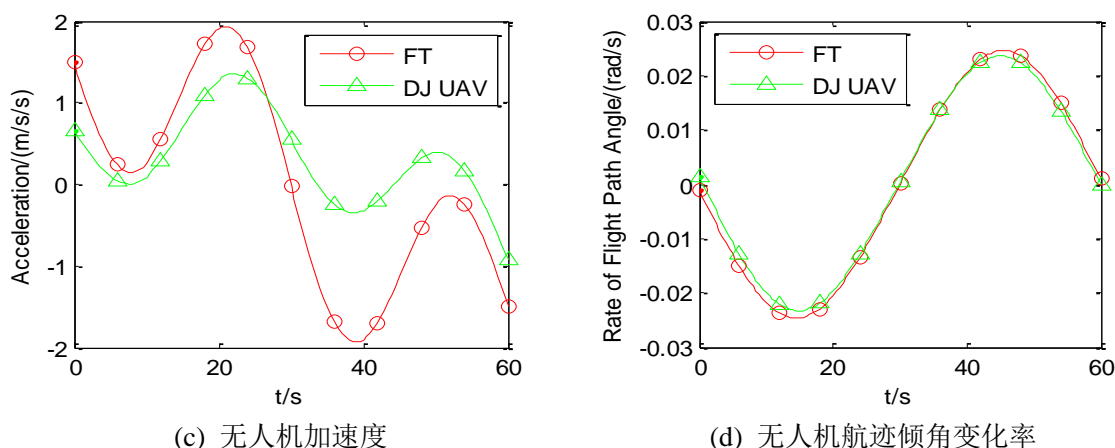


图 3.10 文献[14]模型航路规划示意图

上图(b)与本文模型所规划的图 3.8(d)中的升降速度相比, 文献[14]所规划出的升降速度波动更大, 甚至已经超过了表 3.1 中的飞行参数限制范围。上图(c)与本文模型所规划的图 3.7(a)中的加速度相比, 根据本文模型所规划出的无人机的加速度波动相对较小。两种模型所规划出的无人机航路相较, 本文的航路飞行高度相对较低, 这是因为相同情况下, 无人机航路离假目标越近, 其相同时间间隔下所需飞行的距离就越远, 相应的各种飞行参数就越大, 而本文航路规划模型在文献[14]的基础上又在升降速度、航迹倾角变化率与加速度三个维度上加入了限制, 所以为了满足相应条件, 搜索最优解过程中在合理范围内降低了无人机的初始飞行高度。由上述分析与比较可以看出, 在模型中加入新的参数限制后, 求得的相应无人机飞行参数波动更小且更加贴合实际。

3.6.2 单机欺骗-单机压制仿真与分析

当传统的单架无人机欺骗干扰单部雷达模型面对敌方雷达组网时, 无人机对组网中某部雷达进行干扰所形成的假目标将会被组网内其他雷达识破, 此时可以对组网内没有被欺骗干扰的雷达进行噪声压制干扰, 从而达到降低其探测距离、掩护我方欺骗干扰无人机的效果。

本小节对单机欺骗干扰敌方组网内某部雷达, 另一架无人机压制干扰组网内的另一部雷达时无人机的飞行航路与飞行参数进行规划仿真。仿真时欺骗干扰所形成的假目标轨迹为(单位为 m):

$$\begin{cases} x(t) = 300t + 20000 \\ y(t) = 800 \cos\left(\frac{1}{60} \pi \cdot t\right) - 300t + 38000 \\ z(t) = -20t + 20000 \end{cases} \quad (3-66)$$

下图 3.11 是仿真所得的示意图。

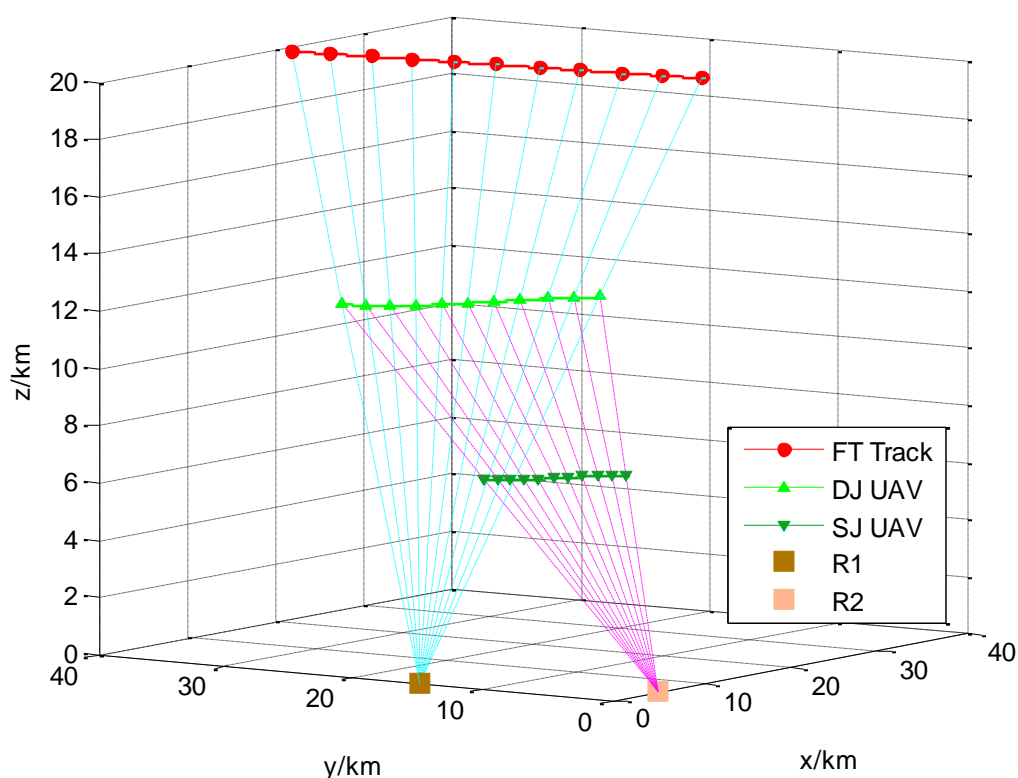
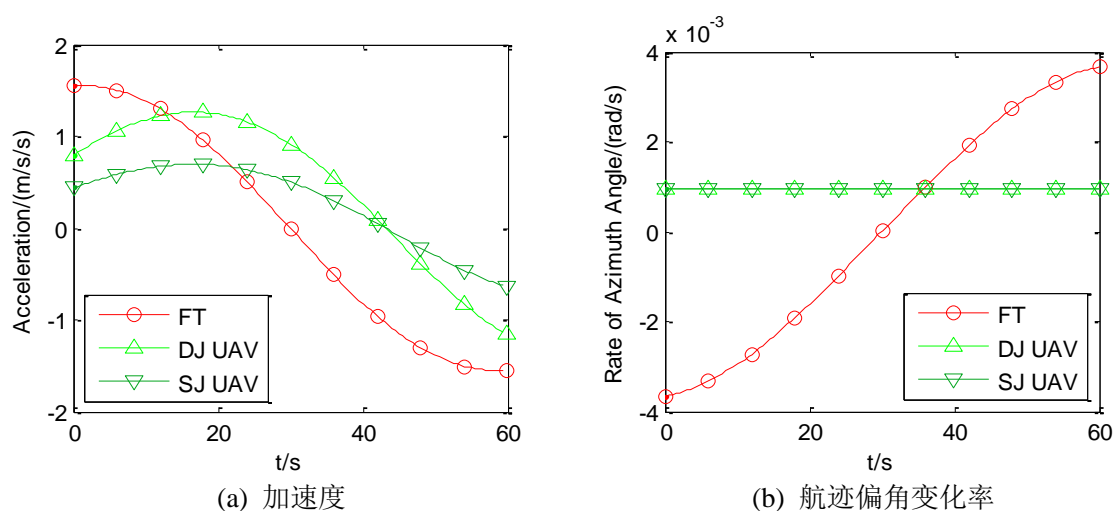
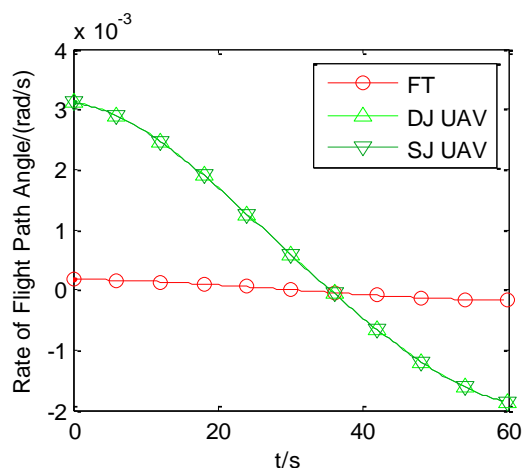


图 3.11 单机欺骗-单机压制示意图

图中，“SJ UAV”代表压制干扰无人机。从上图中可以看出，在整个任务过程中，欺骗干扰无人机一直对雷达 1 进行欺骗干扰，形成一条具有真实目标特性的假目标运动轨迹；与此同时，压制干扰无人机始终处于欺骗干扰无人机轨迹点与雷达 2 所联结的线段上，保持对雷达 2 的噪声压制干扰，起到缩短雷达 2 探测距离、保护我方欺骗干扰无人机的作用。

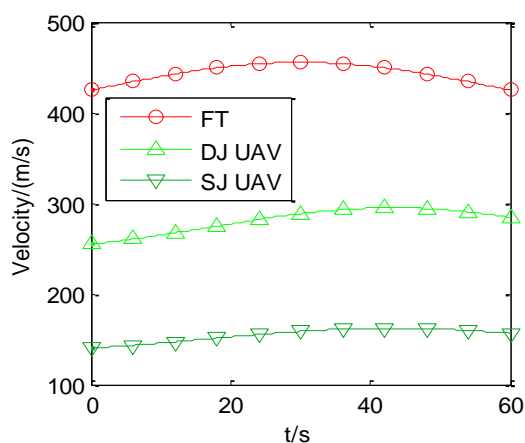




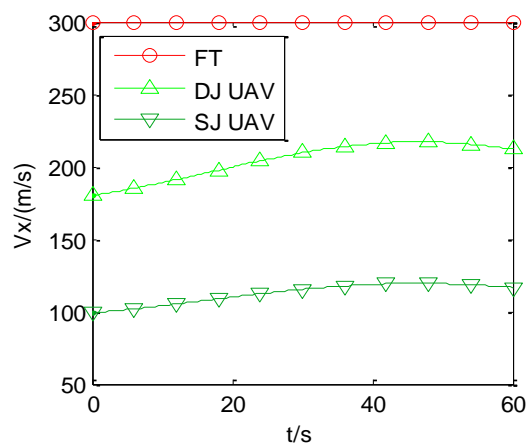
(c) 航迹倾角变化率

图 3.12 电子战无人机控制量变化曲线

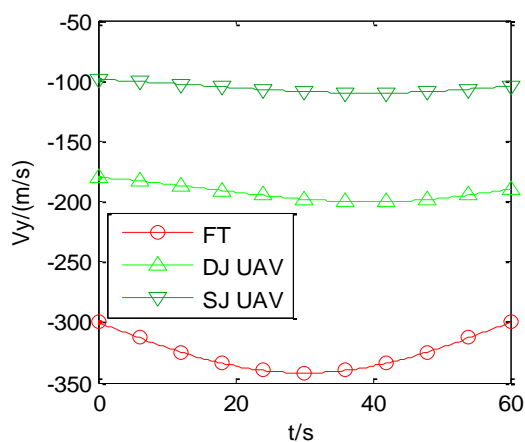
图 3.12 为在当前对敌方两部组网雷达实施单机欺骗-单机压制这一任务下仿真所得的电子战无人机控制量变化曲线。从图中可以看出，在任务过程中两架无人机的加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 3.1 中的无人机参数约束。



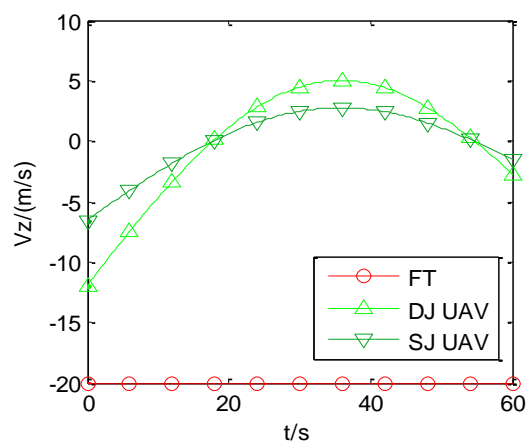
(a) 速度



(b) x 轴分速度



(c) y 轴分速度



(d) 升降速度

图 3.13 电子战无人机速度变化曲线

图 3.13 为在当前任务下电子战无人机速度变化曲线。其中，图(a)与图(d)中的无人机速度与升降速度均满足表 3.1 中的参数限制。

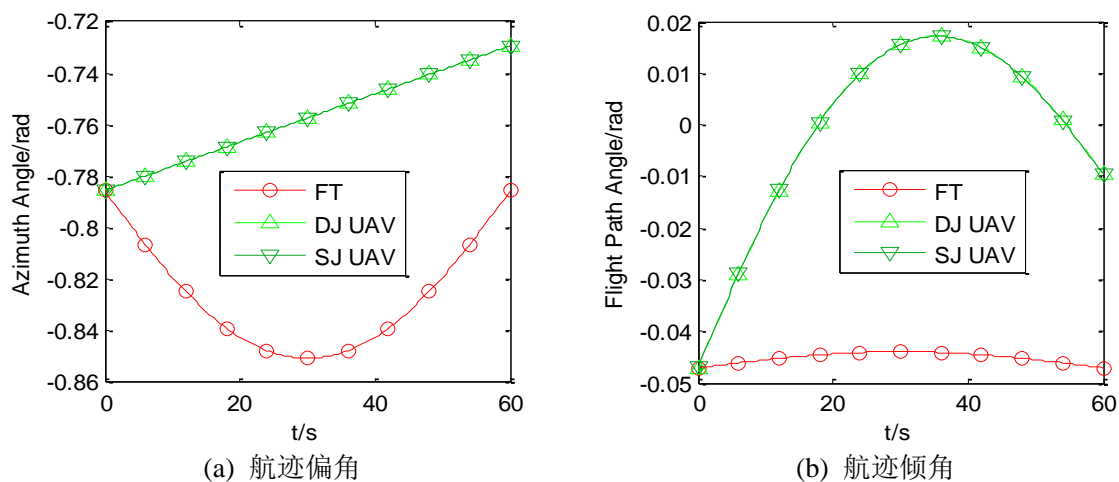


图 3.14 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 3.14 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出，反映无人机速度方向的航迹偏角与航迹倾角变化幅度不大，且航迹倾角始终符合相应的约束限制。

综上，两架分别执行欺骗干扰任务与压制干扰任务的电子战无人机的各个运动参数均满足相应的约束范围，这说明了本文算法的合理性与可行性。

3.6.3 多机协同复合干扰组网雷达仿真与分析

针对敌方组网雷达的威胁，现考虑多机协同复合干扰。以 2 部雷达组网为例，令我方 2 架欺骗干扰无人机分别对敌方这 2 部雷达进行假目标欺骗干扰，形成一条重合的假目标轨迹；与此同时，2 架压制干扰无人机分对这 2 部雷达进行噪声压制干扰，起到在每架欺骗干扰无人机对相应雷达进行干扰时掩护其不被另一部雷达发现的作用，从而增加了假目标轨迹的可信度，提升了干扰成功率。

本节分别在 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 和 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 两种代价函数下对多机协同复合干扰敌方组网雷达时的电子战无人机航路及运动参数进行了规划仿真。仿真时假目标轨迹方程同 3.6.2 节。

(1)、代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时电子战无人机航路及运动参数仿真与分析

当选取代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时，多机协同复合干扰组网雷达示意图如下图 3.15 所示。

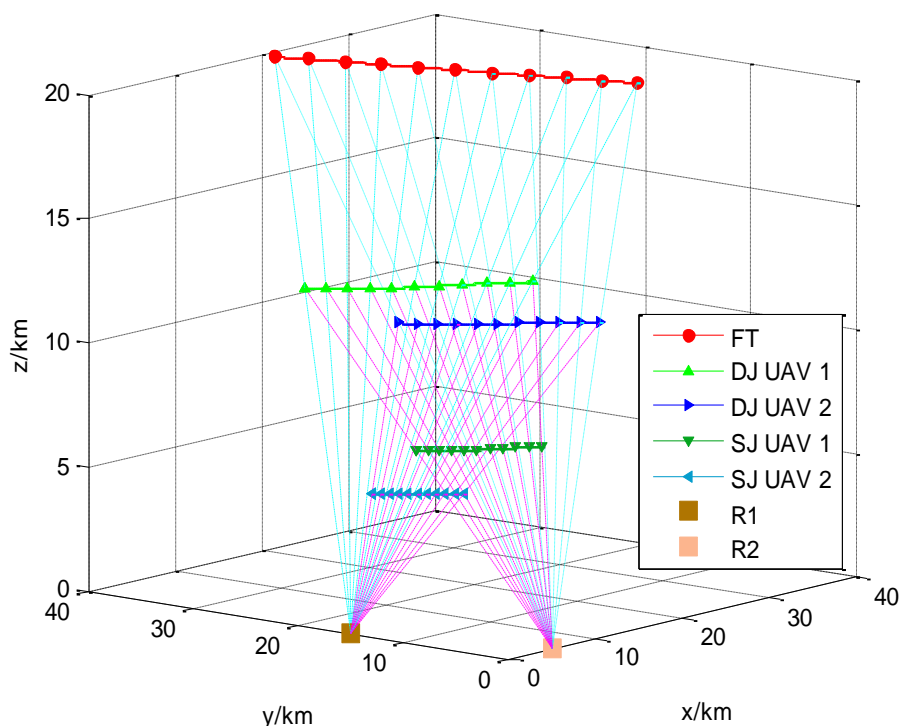
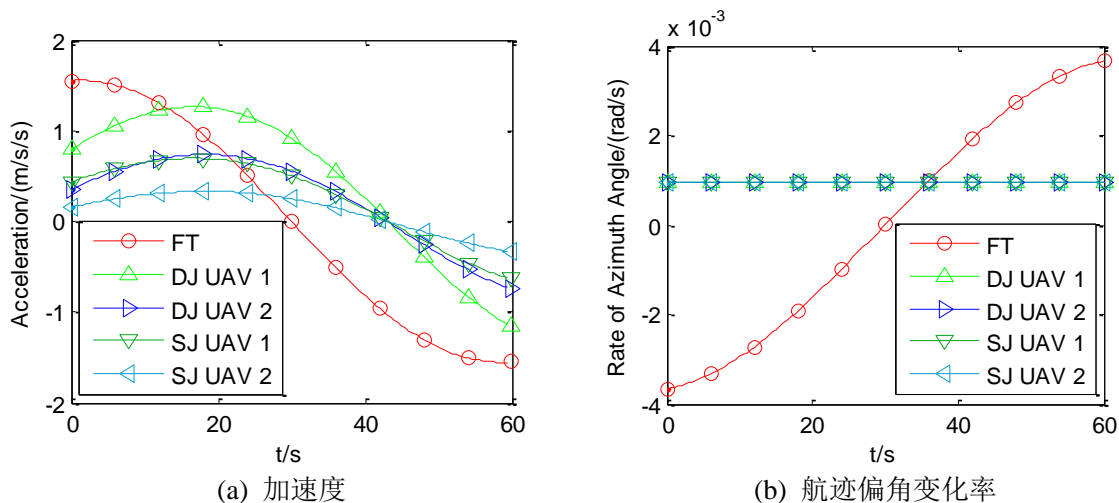
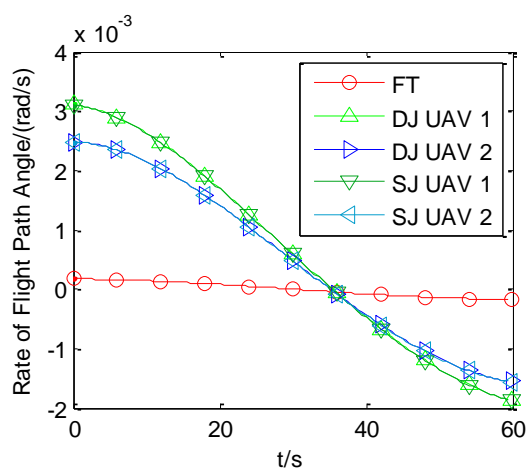


图 3.15 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时多机协同复合干扰组网雷达示意图

从上图中可以看出,在整个任务过程中,欺骗干扰无人机 1 始终在雷达 1 与假目标轨迹点的连线上对雷达 1 进行欺骗干扰,欺骗干扰无人机 2 始终在雷达 2 与假目标轨迹点的连线上对雷达 2 进行欺骗干扰,两者形成一条重合的具有真实目标特性的假目标运动轨迹;与此同时,压制干扰无人机 1 始终在欺骗干扰无人机 1 轨迹点与雷达 2 的连线上对雷达 2 进行噪声压制干扰,压制干扰无人机 2 始终在欺骗干扰无人机 2 轨迹点与雷达 1 的连线上对雷达 1 进行噪声压制干扰,两者均起到缩短对应雷达探测距离、保护相应的我方欺骗干扰无人机的作用。

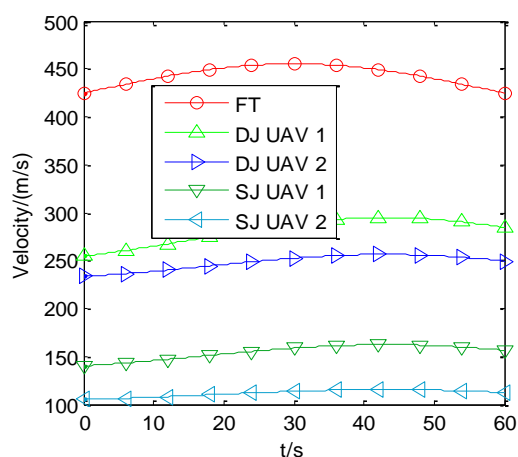




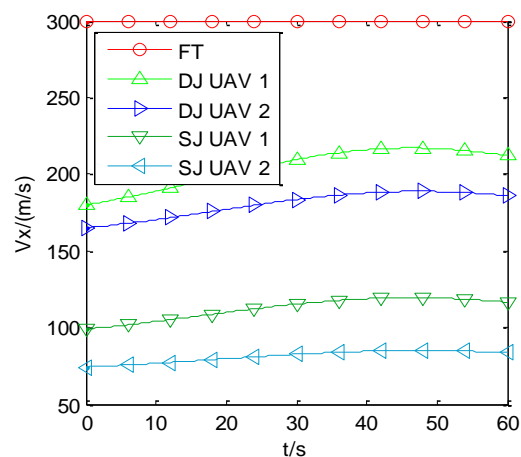
(c) 航迹倾角变化率

图 3.16 电子战无人机控制量变化曲线

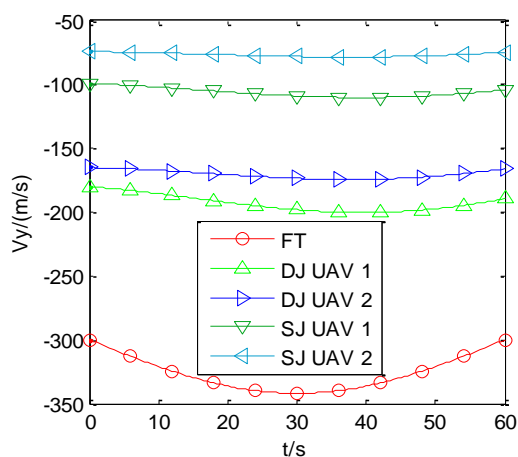
图 3.16 为当代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时仿真所得的电子战无人机控制量变化曲线。从图中可以看出，在任务过程中两架无人机的加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 3.1 中的无人机参数约束。而且 4 架无人机的航迹偏角变化率都很小，符合我们对于当前代价函数的期望。



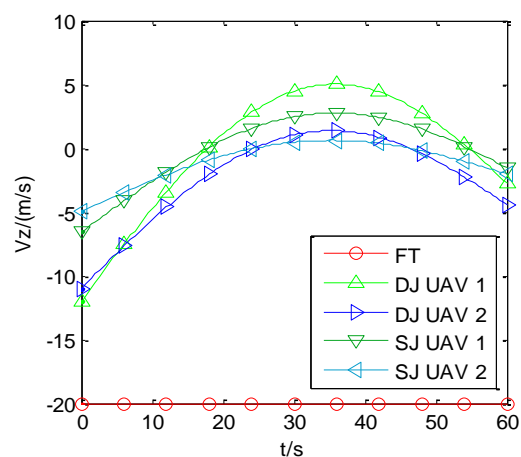
(a) 速度



(b) x 轴分速度



(c) y 轴分速度



(d) 升降速度

图 3.17 电子战无人机速度变化曲线

图 3.17 为当前任务下电子战无人机速度变化曲线。其中，图(a)与图(d)中的无人机速度与升降速度均满足表 3.1 中的参数限制。而且从上图(a)中可以看出，我方当前形成的假目标是以超过 400m/s 的速度高速飞行的，在实际对战中可以佯装攻击。

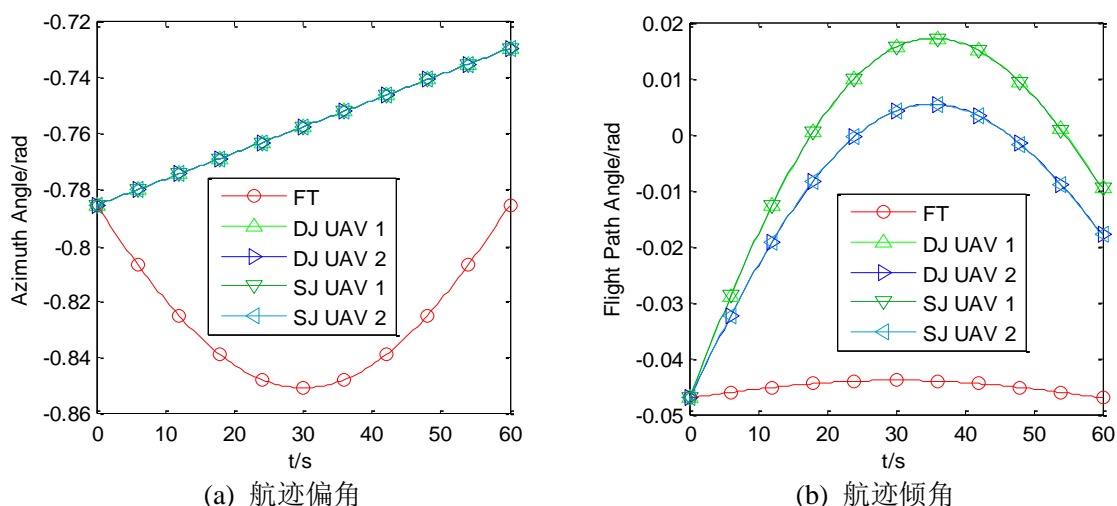


图 3.18 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 3.18 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出，反映无人机速度方向的航迹偏角与航迹倾角变化幅度不大，且始终符合相应的约束限制。

综上，4 架分别进行欺骗干扰与压制干扰的电子战无人机的各个运动参数均满足相应的约束范围，且控制量较小，飞行稳定，这说明了本文算法的合理性与可行性。

(2)、代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时电子战无人机航路及运动参数仿真与分析

代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰组网雷达示意图如图 3.19 所示。

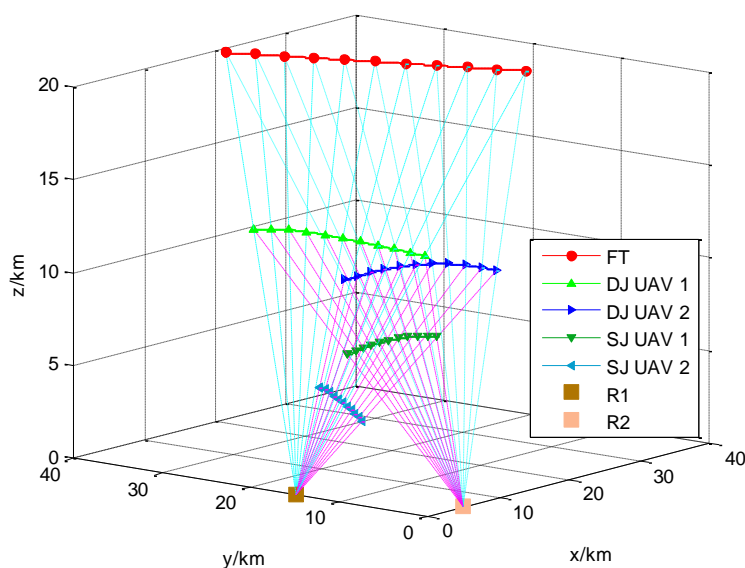


图 3.19 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰组网雷达示意图

从上图可以看出,随着电子战无人机的运动,雷达 1、欺骗干扰无人机 1 与假目标轨迹点一直可以连成一条直线,雷达 2、欺骗干扰无人机 2 与假目标轨迹点一直可以连成一条直线,进而通过欺骗干扰对敌方组网雷达形成且仅形成一条假目标航迹;同时,雷达 2、压制干扰无人机 1 与欺骗干扰无人机 1 一直可以连成一条直线,雷达 1、压制干扰无人机 2 与欺骗干扰无人机 2 一直可以连成一条直线,两者均起到缩短对应雷达探测距离、保护相应的我方欺骗干扰无人机的作用。

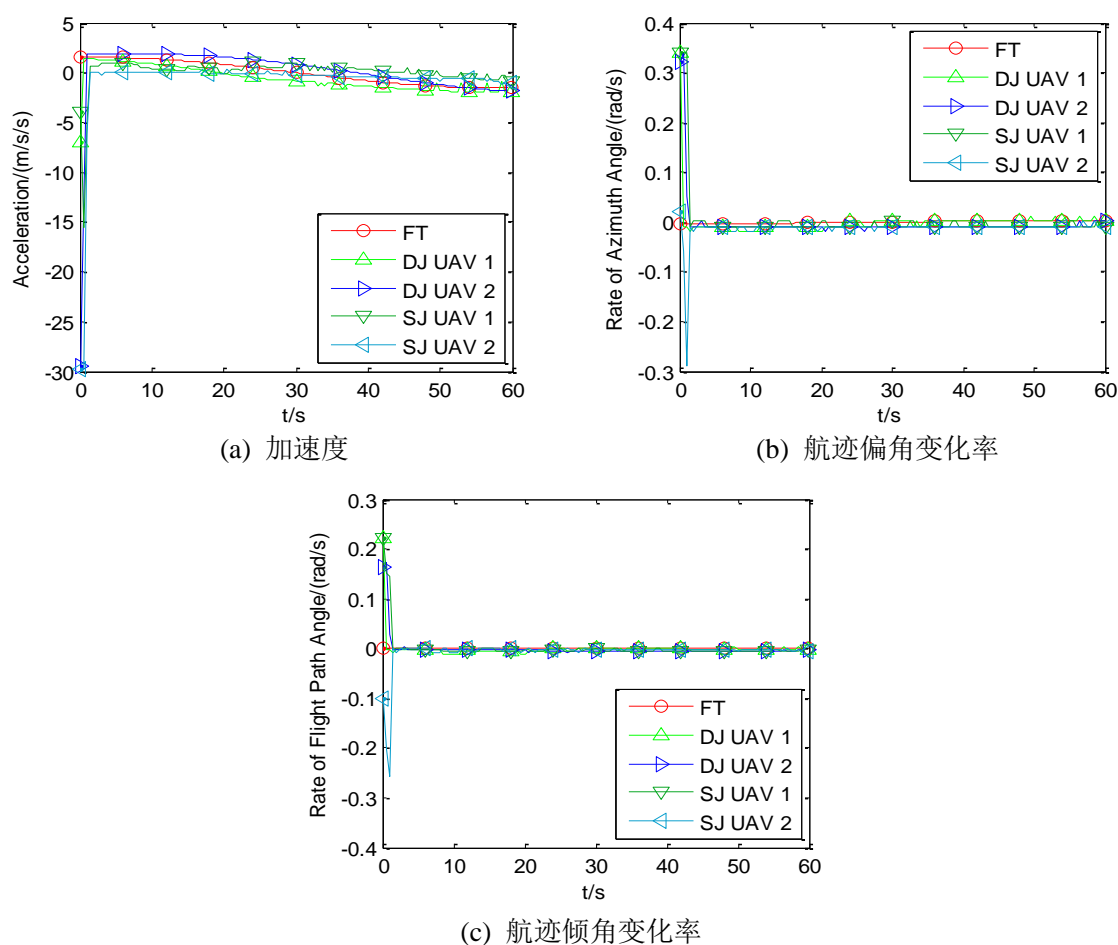


图 3.20 电子战无人机控制量变化曲线

图 3.20 为在当前多机协同复合干扰敌方组网雷达这一任务下,代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时仿真所得的电子战无人机控制量变化曲线。

从上图可以看出,在任务过程中 4 架无人机的加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 3.1 中的无人机参数约束。图中起始部分的波动与 4 架电子战无人机的初始状态设置有关,而且可以看出后续任务过程中 4 架无人机的控制量都比较小,飞行的相对平稳。

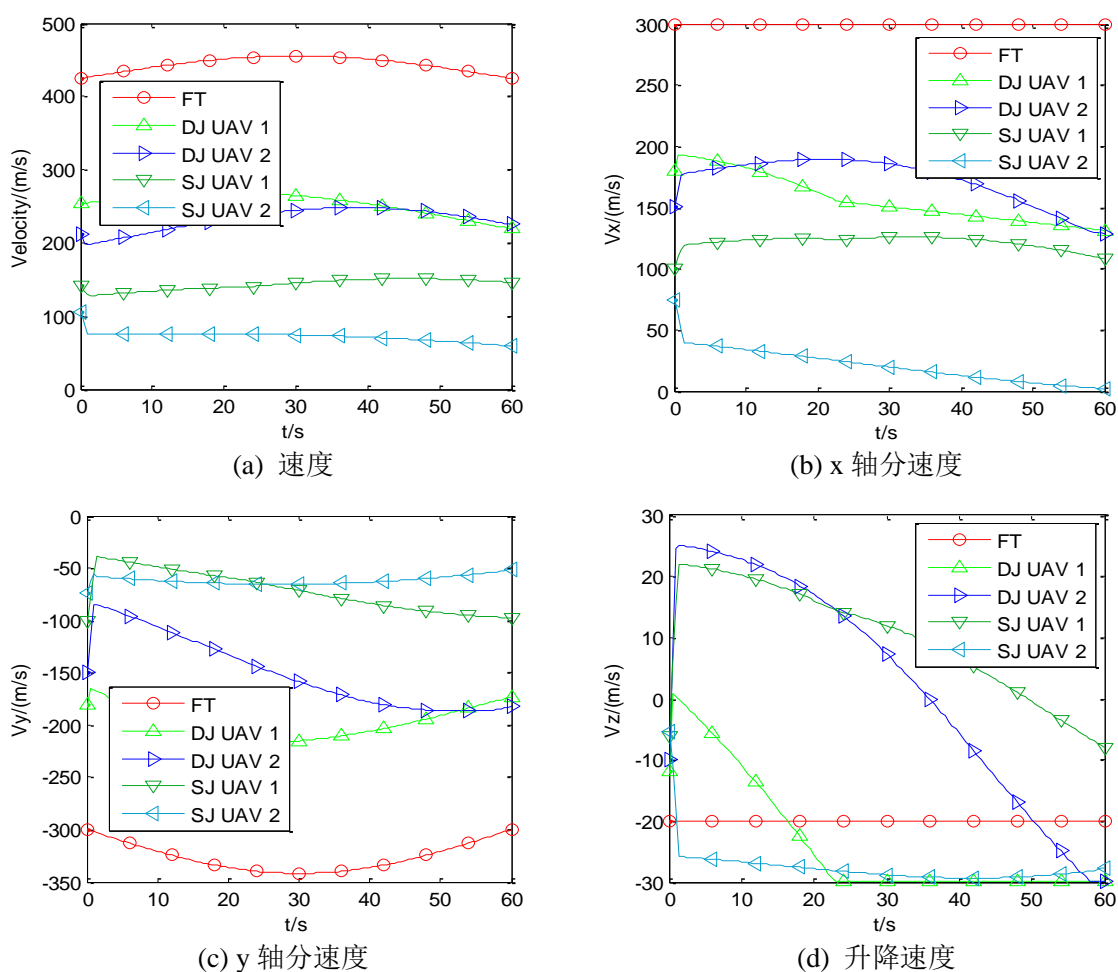


图 3.21 电子战无人机速度变化曲线

图 3.21 为在当前任务下电子战无人机速度变化曲线。其中，图(a)与图(d)中的无人机速度与升降速度均满足表 3.1 中的参数限制。而且上图(a)中显示的 4 架无人机的速度比图 3.17(a)中对应无人机的速度更小，这符合我们对代价函数 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 的期望。

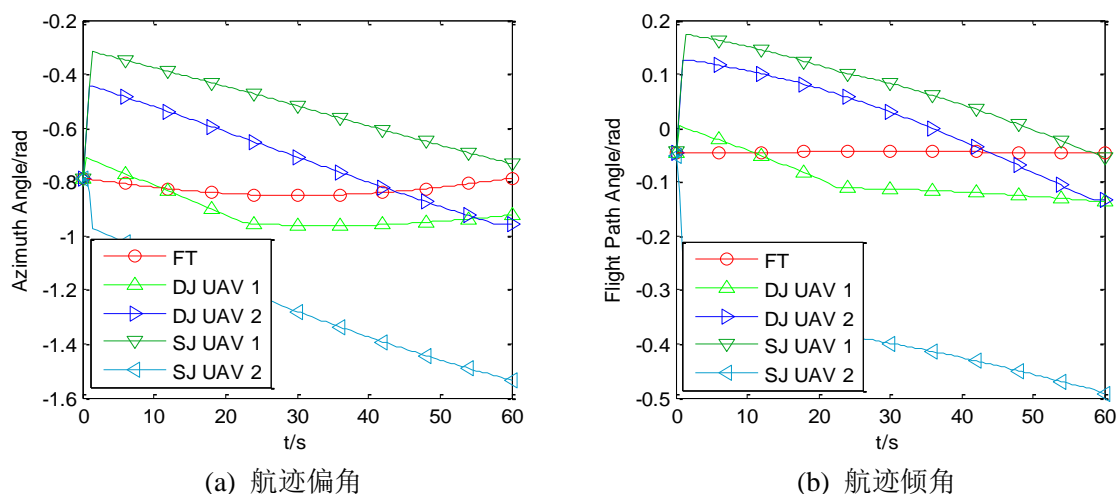


图 3.22 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 3.22 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出, 航迹倾角始终符合相应的约束限制。但与图 3.18 相比, 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时航迹偏角与航迹倾角的变化幅度更大, 这表明相同任务下, 当我们期望无人机速度较小时, 它就需要在航迹偏角与航迹倾角上做出相对较大的调整。

2 种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率如表 3.2 所示。

表 3.2 两种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率

电子战无人机	$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 \bar{u}_{E2} (rad/s)	$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 \bar{u}_{E2} (rad/s)
欺骗干扰无人机 1	9.3415×10^{-4}	6.6×10^{-3}
欺骗干扰无人机 2	9.3415×10^{-4}	1.44×10^{-2}
压制干扰无人机 1	9.3415×10^{-4}	1.51×10^{-2}
压制干扰无人机 2	9.3415×10^{-4}	1.27×10^{-2}

由表 3.2 可以看出, 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 4 架无人机的平均航迹偏角变化率确实均小于代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时的对应数值。

2 种代价函数下电子战无人机的平均速度如表 3.3 所示。

表 3.3 两种代价函数下电子战无人机的平均速度

电子战无人机	$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 \bar{v}_E (m/s)	$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 \bar{v}_E (m/s)
欺骗干扰无人机 1	281.6	254.8
欺骗干扰无人机 2	248.5	232.2
压制干扰无人机 1	154.9	142.8
压制干扰无人机 2	111.8	71.9

由表 3.3 可以看出, 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 4 架无人机的平均速度确实均小于代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时的对应数值。

由以上 2 表可以看出, 在实际对电子战无人机航路进行规划时, 根据当前作战环境、作战任务、无人机型号、性能、状况的不同, 可以按需制定不同的代价函数, 然后再结合上文所描述的多机协同复合干扰航路规划数学模型, 对每架电子战无人机的航路与相应的运动状态分别进行合理、可行地规划。

3.7 本章小结

本章对雷达组网环境下多机协同复合干扰航路规划进行了研究与分析。首先,介绍了传统的假目标欺骗干扰与噪声压制干扰。其次,分析了敌方雷达组网环境下多机协同复合干扰的优势与要求。随后,研究并推导了单机欺骗干扰单部雷达的数学模型。接着,为了保障进行协同欺骗干扰时无人机的安全性、提高假目标轨迹的可信度,本章将欺骗干扰与噪声压制干扰相结合,引入了多机协同复合干扰方法,并分别推导了欺骗干扰无人机与压制干扰无人机在任务过程中的最优控制数学模型。本章所给出的最优控制模型包含 7 种无人机飞行参数限制,规划出的航迹相比以往更加贴近无人机的实际飞行情况。而且,本章介绍了多种不同的规划航路时所需的代价函数,认为在不同作战任务要求、无人机型号等情况下,可以灵活构造、选取不同的代价函数对航路进行求解。最后,分别对单机欺骗干扰单部雷达、单机欺骗-单机压制以及多机协同复合干扰组网雷达这三种情况下我方无人机的航路进行了 Matlab 仿真求解,证明了本章航路规划方法的可行性。其中,对第三种情况分别基于 2 种不同的代价函数进行了无人机的航路规划,并对结果进行了分析与比较。

第四章 多场景无人机干扰航路规划

本章重点研究了多场景下电子战无人机进行干扰任务时的航路规划问题。首先，在敌方雷达组网环境下，设计了多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰模型，提高了无人机在巡弋与搜索阶段的安全性，同时这也是具有实际意义的。接着，以欺骗敌方预警机进而掩护我方作战舰船为目的，研究并推导了单机欺骗干扰单架预警机的数学模型，并推导了无人机发射干扰信号的频率公式及时延公式。最后，在单机欺骗干扰单架预警机的基础上设计了多机协同复合干扰敌方多架预警机的方法，并推导出其无人机航路规划最优控制模型。本章还分别对三种情况下的无人机航路规划进行了仿真验证。

4.1 多机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰

4.1.1 假目标和无人机的运动模型

由于无人机具有体积小，飞行高度低，很难被侦测到等特点，所以其在电子干扰方面具有显著的优势。无人机在飞行中需要爬升、巡弋才能抵达目标位置，通过导引头搜寻目标，找到目标后立即实施干扰。无人机获取的情报信息，大部分都是在巡弋、搜索环节采集到的，如果此时被敌方雷达侦测到，便会立刻成为攻击靶子。在这两个环节，无人机一般在额定的高度上进行定高飞行^[66]，此时其对敌方组网雷达的多机协同复合干扰任务设想如下图 4-1 所示。

由下图 4.1 可以看出，以地面为基准，期望形成的假目标轨迹高度为 h_p ，处于巡弋、搜索阶段的欺骗干扰无人机 1、欺骗干扰无人机 2、压制干扰无人机 1、压制干扰无人机 2 分别在 h_{D1} 、 h_{D2} 、 h_{S1} 、 h_{S2} 高度上做定高飞行。欺骗干扰无人机 1 始终位于假目标点与雷达 1 的连线之上，对雷达 1 进行欺骗干扰；欺骗干扰无人机 2 始终位于假目标点与雷达 2 的连线之上，对雷达 2 进行欺骗干扰。同时，压制干扰无人机 1 始终位于欺骗干扰无人机 1 与雷达 2 的连线之上，对雷达 2 进行噪声压制干扰；压制干扰无人机 2 始终位于欺骗干扰无人机 2 与雷达 1 的连线之上，对雷达 1 进行噪声压制干扰。这样，由于 2 架欺骗干扰无人机的共同作用，敌方组网雷达会误认为在高度 h_p 存在正在做定高飞行的目标。而 2 架压制干扰无人机不仅起到了对相应的欺骗干扰无人机进行保护的作用，还提高了假目标的可信度。

值得一提的是，虽然当前提出的多无人机巡弋与搜索阶段对敌方组网雷达的复合干扰任务想定是基于 2 部雷达进行讨论的，但其实该构想适用于任意多部雷达组网的情况，只需根据实际雷达数量改变欺骗干扰无人机与压制干扰无人机的数量即可。

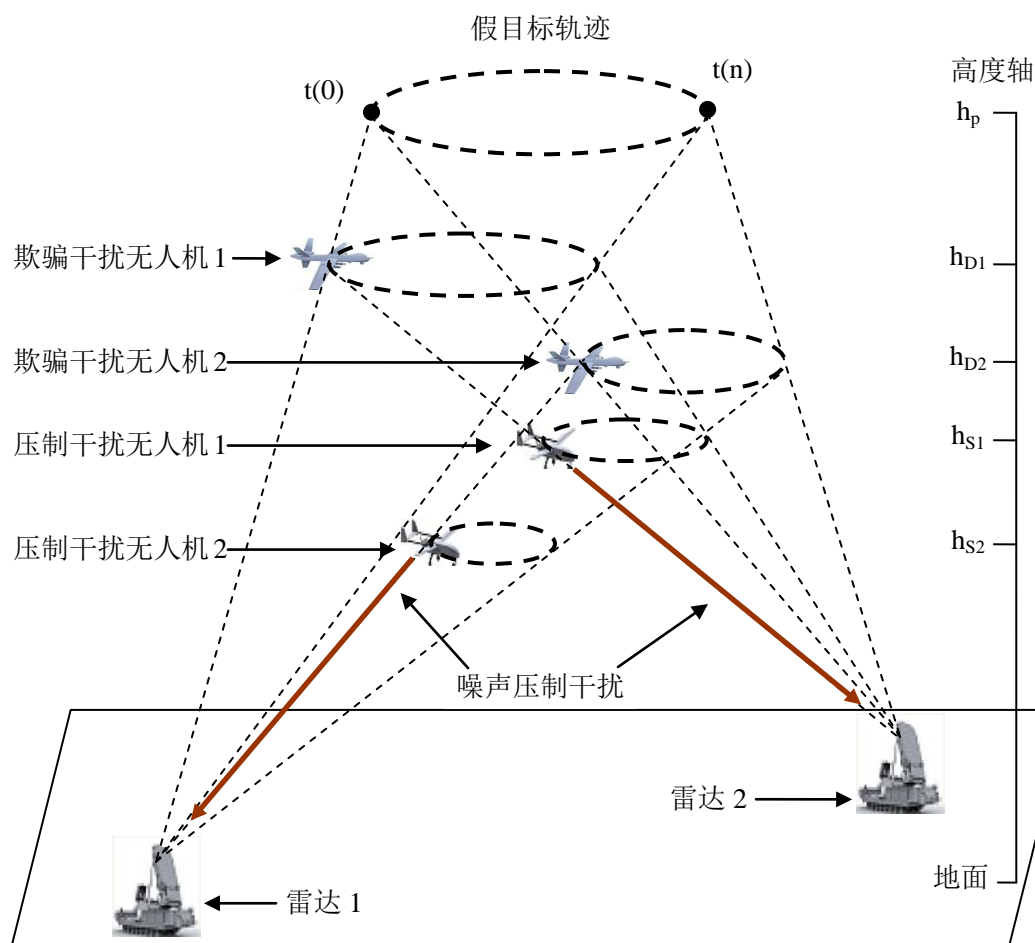


图 4.1 多无人机定高飞行下对组网雷达的复合干扰示意图

通过第三章的研究与分析我们已经知道,在本文所设计的干扰任务过程中,欺骗干扰无人机与压制干扰无人机两者具有类似的数学模型,所以接下来本节将着重探讨欺骗干扰无人机在巡弋、搜索阶段中的数学模型,而压制干扰无人机的数学模型则与其具有相似的形式。

在直角坐标系中,欺骗干扰无人机和假目标在额定高度上飞行的运动关系详见下图 4.2。

下图中,雷达坐标为 (x_o, y_o, z_o) ,欺骗干扰无人机坐标为 (x_D, y_D, z_D) ,假目标轨迹点坐标为 (x_p, y_p, z_p) , r_D 代表欺骗干扰无人机到任务中它所欺骗的雷达的径向距离, r_p 代表假目标轨迹点到相应雷达的距离, θ 代表欺骗干扰无人机的俯仰角, ϕ 代表欺骗干扰无人机的方位角, v_D 、 v_p 分别代表欺骗干扰无人机与假目标的速度, α_D 、 α_p 分别代表欺骗干扰无人机与假目标的航迹偏角, h_D 、 h_p 分别代表欺骗干扰无人机与假目标的飞行高度。值得一提的是,由图中可以看出,此时假目标与欺骗干扰无人机的航迹倾角均为 0。

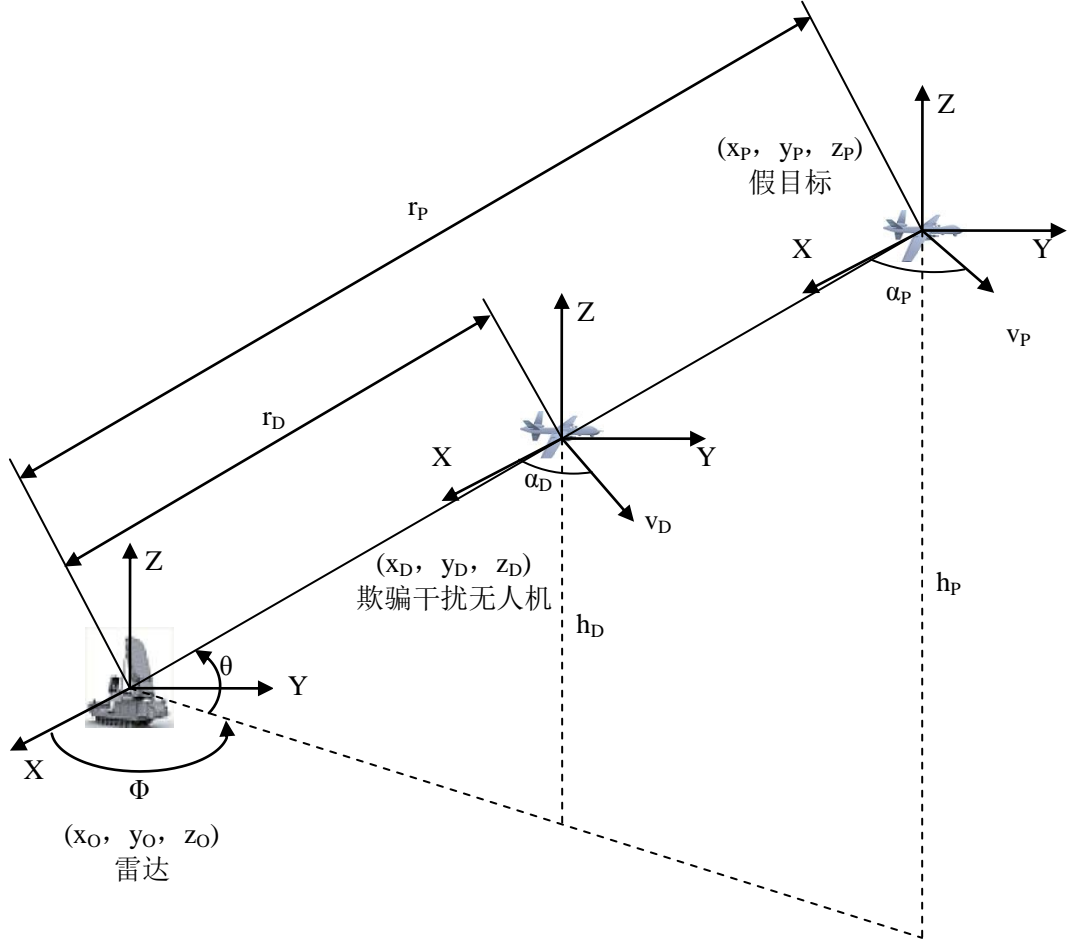


图 4.2 无人机和假目标做定高飞行的运动关系

此时欺骗干扰无人机的运动模型为：

$$\begin{cases} \dot{x}_D = v_D \cos \alpha_D \\ \dot{y}_D = v_D \sin \alpha_D \\ \dot{z}_D = 0 \end{cases} \quad (4-1)$$

球坐标系下，已知：

$$\begin{cases} x_D = r_D \cos \theta \cos \phi \\ y_D = r_D \cos \theta \sin \phi \\ z_D = r_D \sin \theta \end{cases} \quad (4-2)$$

对上式求导有：

$$\begin{cases} \dot{x}_D = \dot{r}_D \cos \theta \cos \phi - r_D \dot{\theta} \sin \theta \cos \phi - r_D \dot{\phi} \cos \theta \sin \phi \\ \dot{y}_D = \dot{r}_D \cos \theta \sin \phi - r_D \dot{\theta} \sin \theta \sin \phi + r_D \dot{\phi} \cos \theta \cos \phi \\ \dot{z}_D = \dot{r}_D \sin \theta + r_D \dot{\theta} \cos \theta \end{cases} \quad (4-3)$$

转化为矩阵即：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{y}_D \\ \dot{z}_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & -\sin \phi & -\sin \theta \cos \phi \\ \cos \theta \sin \phi & \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_D \\ r_D \dot{\phi} \cos \theta \\ r_D \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

由(4-4)可以进一步推得在以当前被欺骗雷达为原点的球坐标系下欺骗干扰无人机的运动模型为：

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_D \\ r_D \dot{\phi} \cos \theta \\ r_D \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & \sin \theta \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_D \\ \dot{y}_D \\ \dot{z}_D \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

联立式(4-1)和(4-5)，有：

$$\begin{cases} \dot{r}_D = v_D \cos \theta \cos \phi \sin \alpha_D + v_D \cos \theta \sin \phi \cos \alpha_D \\ r_D \dot{\phi} \cos \theta = -v_D \sin \phi \sin \alpha_D + v_D \cos \phi \cos \alpha_D \\ r_D \dot{\theta} = -v_D \sin \theta \cos \phi \sin \alpha_D - v_D \sin \theta \sin \phi \cos \alpha_D \end{cases} \quad (4-6)$$

解得欺骗干扰无人机的运动参数：

$$\begin{cases} \cos \alpha_D = r_D (\dot{\phi} \cos \theta \sin \theta \cos \phi - \dot{\theta} \sin \phi) / (v_D \sin \theta) \\ v_D = \left(\dot{r}_D^2 + (r_D \dot{\phi} \cos \theta)^2 + (r_D \dot{\theta})^2 \right)^{1/2} \end{cases} \quad (4-7)$$

同理，假目标与压制干扰无人机在以对应雷达为原点的球坐标系下的运动模型分别为：

$$\begin{cases} \dot{r}_P = v_P \cos \theta \cos \varphi \sin \alpha_P + v_P \cos \theta \sin \varphi \cos \alpha_P \\ r_P \dot{\phi} \cos \theta = -v_P \sin \varphi \sin \alpha_P + v_P \cos \varphi \cos \alpha_P \\ r_P \dot{\theta} = -v_P \sin \theta \cos \varphi \sin \alpha_P - v_P \sin \theta \sin \varphi \cos \alpha_P \end{cases} \quad (4-8)$$

$$\begin{cases} \dot{r}_S = v_S \cos \vartheta \cos \varphi \sin \alpha_S + v_S \cos \vartheta \sin \varphi \cos \alpha_S \\ r_S \dot{\phi} \cos \vartheta = -v_S \sin \varphi \sin \alpha_S + v_S \cos \varphi \cos \alpha_S \\ r_S \dot{\vartheta} = -v_S \sin \vartheta \cos \varphi \sin \alpha_S - v_S \sin \vartheta \sin \varphi \cos \alpha_S \end{cases} \quad (4-9)$$

式(4-9)中， r_S 代表压制干扰无人机到任务中它所压制的雷达的径向距离， ϑ 、 φ 分别代表压制干扰无人机在以被其压制的雷达为原点的球坐标系下的俯仰角和方位角，

v_s 代表压制干扰无人机的速度, α_s 代表压制干扰无人机的航迹偏角。

进一步可以解得假目标与压制干扰无人机的运动参数分别为:

$$\begin{cases} \cos \alpha_p = r_p (\dot{\phi} \cos \theta \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \sin \varphi) / (v_p \sin \theta) \\ v_p = \left(\dot{r}_p^2 + (r_p \dot{\phi} \cos \theta)^2 + (r_p \dot{\theta})^2 \right)^{1/2} \end{cases} \quad (4-10)$$

$$\begin{cases} \cos \alpha_s = r_s (\dot{\phi} \cos \vartheta \sin \vartheta \cos \varphi - \dot{\vartheta} \sin \varphi) / (v_s \sin \vartheta) \\ v_s = \left(\dot{r}_s^2 + (r_s \dot{\phi} \cos \vartheta)^2 + (r_s \dot{\vartheta})^2 \right)^{1/2} \end{cases} \quad (4-11)$$

令所有的电子战无人机在特定的速度和航迹偏角下飞行, 即有大概率可使雷达错误地把假目标当作真目标, 从而使得处于巡弋、搜索阶段的无人机的安全性得到保障。

4.1.2 模型求解

首先讨论如何求解欺骗干扰无人机的航迹与运动参数。

雷达坐标 (x_o, y_o, z_o) 与假目标坐标 (x_p, y_p, z_p) 所处的直线的方程是:

$$\frac{x - x_p}{x_p - x_o} = \frac{y - y_p}{y_p - y_o} = \frac{z - z_p}{z_p - z_o} \quad (4-12)$$

式(4-12)直线与平面 $z = h_D$ 的交点为:

$$\begin{cases} x_D = (h_D - z_p)(x_p - x_o)/(z_p - z_o) + x_p \\ y_D = (h_D - z_p)(y_p - y_o)/(z_p - z_o) + y_p \\ z_D = h_D \end{cases} \quad (4-13)$$

观察式(4-7)可以发现, θ 、 ϕ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\phi}$ 将假目标和欺骗干扰无人机的运动状态耦合了起来。根据图 4.2 几何关系分析确定:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin[(z_D - z_o)/r_D] \\ \phi = \arctan[(y_D - y_o)/(x_D - x_o)] \\ \dot{\theta} = \frac{\left((x_D - x_o)^2 + (y_D - y_o)^2 \right)^{1/2} \dot{z}_D}{r_D^2} - \frac{(z_D - z_o)}{r_D^2} \left[\frac{(x_D - x_o)\dot{x}_D + (y_D - y_o)\dot{y}_D}{\left((x_D - x_o)^2 + (y_D - y_o)^2 \right)^{1/2}} \right] \\ \dot{\phi} = \frac{(x_D - x_o)\dot{y}_D - (y_D - y_o)\dot{x}_D}{\left((x_D - x_o)^2 + (y_D - y_o)^2 \right)^{1/2}} \end{cases} \quad (4-14)$$

确定了 θ 、 ϕ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\phi}$ 的值后, 即可根据式(4-7)计算出欺骗干扰无人机相应的运

动参数。

然后求解压制干扰无人机的轨迹与运动参数。

当位于 (x_o, y_o, z_o) 的雷达被无人机欺骗干扰时，为了保护无人机、提高假目标的可信度，需对组网中的其它雷达实施噪声压制干扰。

假设被噪声压制干扰的雷达的坐标为 (x'_o, y'_o, z'_o) ，其与欺骗干扰无人机坐标 (x_D, y_D, z_D) 所处的直线的方程是：

$$\frac{x - x_D}{x_D - x'_o} = \frac{y - y_D}{y_D - y'_o} = \frac{z - z_D}{z_D - z'_o} \quad (4-15)$$

式(4-15)直线与平面 $z = h_s$ 的交点为：

$$\begin{cases} x_s = (h_s - z_D)(x_D - x'_o)/(z_D - z'_o) + x_D \\ y_s = (h_s - z_D)(y_D - y'_o)/(z_D - z'_o) + y_D \\ z_s = h_s \end{cases} \quad (4-16)$$

观察式(4-11)可以发现， ϑ 、 φ 、 $\dot{\vartheta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 将欺骗干扰无人机和压制干扰无人机的运动状态耦合了起来。由于被压制雷达 (x'_o, y'_o, z'_o) 、压制干扰无人机与欺骗干扰无人机三者始终应该在一条直线上，故

$$\begin{cases} \vartheta = \arcsin[(z_s - z'_o)/r_s] \\ \varphi = \arctan[(y_s - y'_o)/(x_s - x'_o)] \\ \dot{\vartheta} = \frac{((x_s - x'_o)^2 + (y_s - y'_o)^2)^{1/2} \dot{z}_s}{r_s^2} - \frac{(z_s - z'_o)}{r_s^2} \left[\frac{(x_s - x'_o)\dot{x}_s + (y_s - y'_o)\dot{y}_s}{((x_s - x'_o)^2 + (y_s - y'_o)^2)^{1/2}} \right] \\ \dot{\varphi} = \frac{(x_s - x'_o)\dot{y}_s - (y_s - y'_o)\dot{x}_s}{((x_s - x'_o)^2 + (y_s - y'_o)^2)^{1/2}} \end{cases} \quad (4-17)$$

其中， (x_s, y_s, z_s) 代表压制干扰无人机的坐标。

确定了 ϑ 、 φ 、 $\dot{\vartheta}$ 、 $\dot{\varphi}$ 的值后，即可根据式(4-11)计算出压制干扰无人机的运动参数。

4.1.3 仿真分析

已知敌方2部雷达的位置坐标分别为 $(0,0,0)\text{m}$ 、 $(0,1000,0)\text{m}$ ，由4架无人机在巡弋、搜索阶段做定高飞行的情况下对其实施协同复合干扰。设2架欺骗干扰无人机做定高飞行的高度分别为 $h_{D1} = 6000\text{m}$ ， $h_{D2} = 5000\text{m}$ ，2架压制干扰无人机做定高飞行的高度分别为 $h_{S1} = 3600\text{m}$ ， $h_{S2} = 3000\text{m}$ ，假目标起始位置为 $(300, 2089, 10000)\text{m}$ ，飞行航迹为：

$$\begin{cases} x = 300 + 300t \\ y = 100\cos(0.15\pi(t+1)) + 2000 \\ z = 10000 \end{cases} \quad (4-18)$$

上式中单位为 m，总时间为 20s，仿真单步时间为 0.1s。

图 4.3 是 4 架无人机干扰 2 部雷达示意图，给定假目标的航迹和无人机的飞行高度后，即可确定 4 架无人机的运动轨迹。

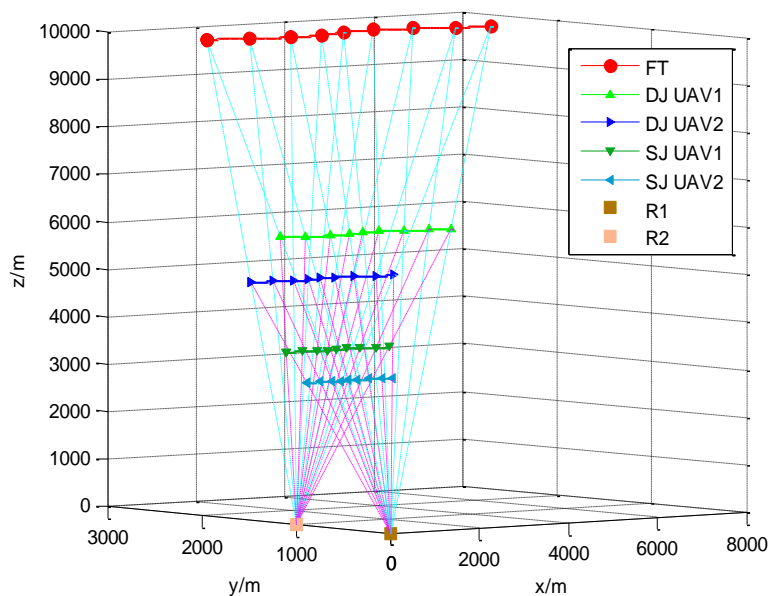


图 4.3 巡弋与搜索阶段多机协同复合干扰多部雷达

继而可求解出无人机的速度和航迹偏角，分别如图 4.4 和图 4.5 所示。

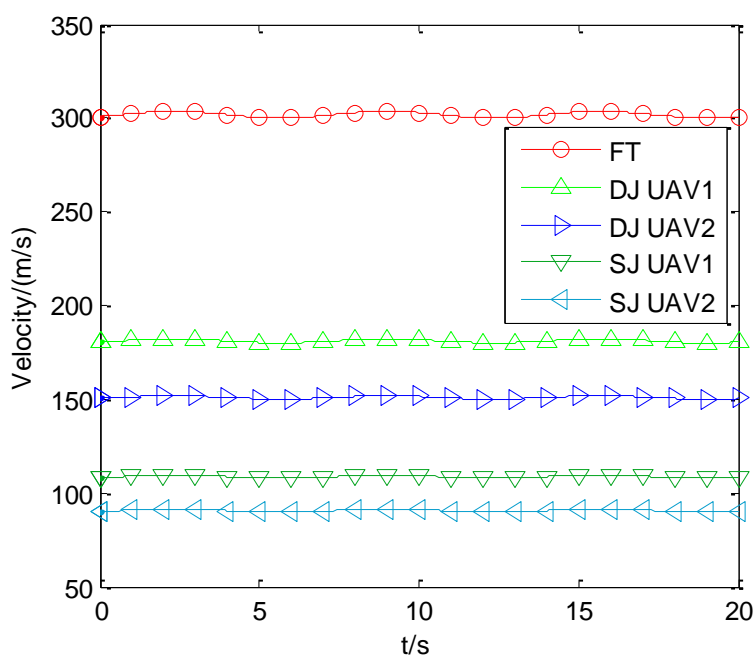


图 4.4 假目标和 4 架无人机速度

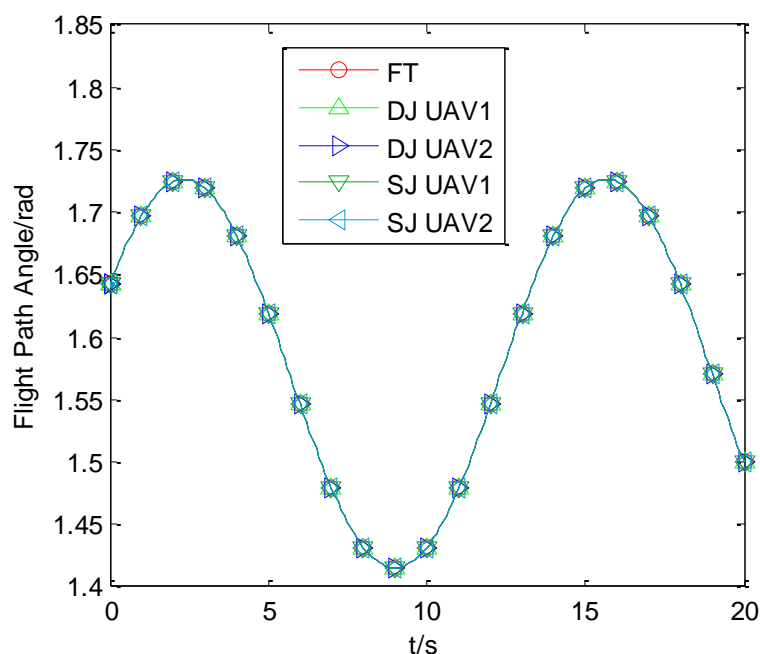


图 4.5 假目标和 4 架无人机航迹偏角

由以上二图可以看出, 4 架电子战无人机的速度和航向偏角的变化趋势均与假目标相似, 这说明形成的假目标具有类似实际目标的运动特征, 难以被敌方雷达识别。2 架欺骗干扰无人机以预先规划的速度和姿态角飞行, 每一时间点都飞到指定的位置, 通过欺骗干扰形成重合的假目标轨迹点, 就能够对组网雷达达成欺骗的目的; 同时 2 架压制干扰无人机分别对 2 部雷达实施噪声压制干扰, 确保对应欺骗干扰无人机的安全性, 提高假目标轨迹的可信度。这样, 4 架电子战无人机相互配合, 就完成了在自身巡弋、搜索阶段定高飞行情况下对敌方 2 部组网雷达的协同复合干扰。

4.2 单机欺骗干扰单架预警机

4.2.1 单机欺骗干扰单架预警机数学模型

在现代战争中, 预警机(Early Warning Aircraft, EWA)大大提高了空中作战编队的作战能力, 成为高威胁度目标。战时对预警机实施有效的综合干扰, 从而降低其探测性能, 延误其对战场情报信息的传递, 使其不能有效发挥预警、指挥等功能, 进而掩护己方作战行动是当前需要考虑的一个重要课题。鉴于此, 本章将研究如何利用电子战无人机对敌方运动中的预警机实施电子干扰来分散、吸引敌方注意力, 进而掩护我方作战舰船。

首先, 分析单机欺骗干扰无人机干扰敌方单架预警机的情况, 其任务想定示意图如下图 4.6 所示。

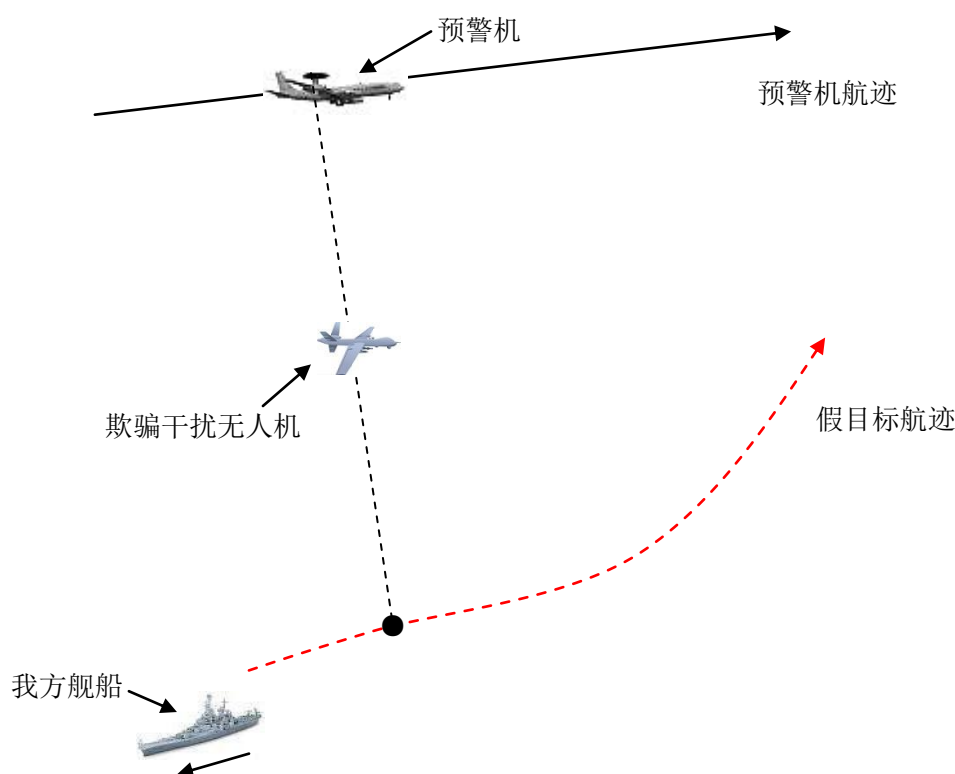


图 4.6 单机欺骗干扰敌方单架预警机

如上图所示，我方欺骗干扰无人机根据探测到的敌方预警机位置及其运动参数，并结合期望形成的假目标轨迹点坐标，合理地向预警机发射欺骗干扰信号，使预警机接收到该信号后错误地判定在海面上存在正在运动的目标，从而有效地掩护了我方作战舰船。

在直角坐标系下，设敌方预警机的轨迹坐标为 $(x_T(t), y_T(t), z_T(t))$ ，我方欺骗干扰无人机的轨迹坐标为 $(x_D(t), y_D(t), z_D(t))$ ，期望的假目标轨迹坐标为 $(x_F(t), y_F(t), z_F(t))$ 。根据本节的作战任务设想，欺骗干扰无人机需要在海面上形成合理的假目标运动轨迹，所以令 $z_F(t)=0$ ，即当前的假目标运动轨迹坐标为 $(x_F(t), y_F(t), 0)$ 。

直角坐标系下，欺骗干扰无人机的运动学方程为：

$$\begin{cases} \dot{x}_D = v_D \cos \beta_D \cos \alpha_D \\ \dot{y}_D = v_D \cos \beta_D \sin \alpha_D \\ \dot{z}_D = v_D \sin \beta_D \end{cases} \quad (4-19)$$

式中， v_D 为欺骗干扰无人机的速度， β_D 为欺骗干扰无人机的航迹倾角， α_D 为欺骗干扰无人机的航迹偏角， \dot{x}_D 为欺骗干扰无人机在 x 轴方向的分速度， \dot{y}_D 为欺骗干扰无人机

在 y 轴方向的分速度, \dot{z}_D 为欺骗干扰无人机在 z 轴方向的分速度(即升降速度)。

任意时刻下, 预警机、欺骗干扰无人机、假目标点三者之间都有如下位置关系:

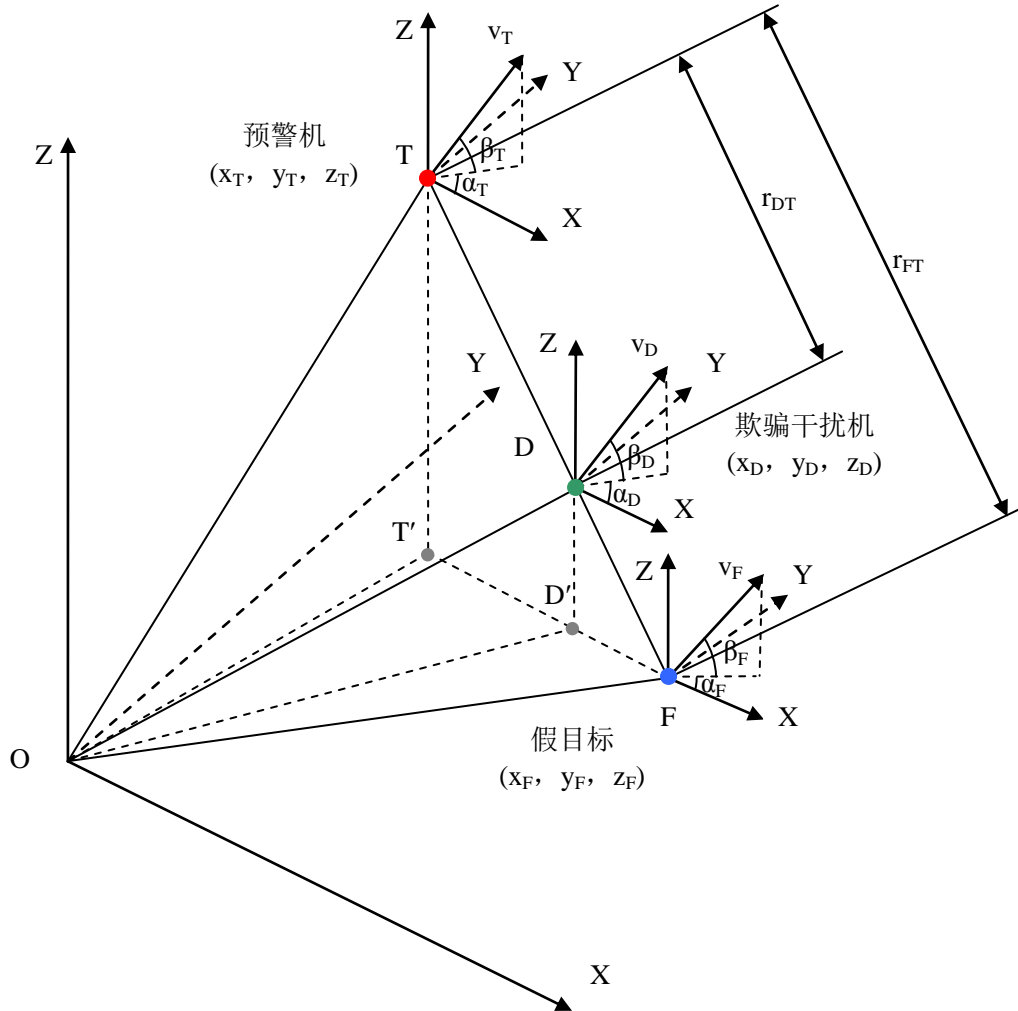


图 4.7 某时刻预警机、欺骗干扰无人机与假目标位置关系示意图

由图 4.7 可以发现, 在任务过程中, 欺骗干扰无人机始终处于预警机与假目标的连线之上, 即:

$$\frac{x_D - x_T}{x_T - x_F} = \frac{y_D - y_T}{y_T - y_F} = \frac{z_D - z_T}{z_T - z_F} \quad (4-20)$$

令 $z_F = 0$, 有:

$$\frac{x_D - x_T}{x_T - x_F} = \frac{y_D - y_T}{y_T - y_F} = \frac{z_D - z_T}{z_T} \quad (4-21)$$

由式(4-21)可得 x_D 、 y_D 表达式分别为:

$$x_D = \left(\frac{z_D}{z_T} - 1 \right) \cdot (x_T - x_F) + x_T \quad (4-22)$$

$$y_D = \left(\frac{z_D}{z_T} - 1 \right) \cdot (y_T - y_F) + y_T \quad (4-23)$$

其中, z_D 需满足不等式约束:

$$0 < z_D < z_T \quad (4-24)$$

对(4-22)求导可得:

$$\dot{x}_D = \left(\frac{z_D}{z_T} - 1 \right) \cdot (\dot{x}_T - \dot{x}_F) + \frac{z_T \cdot \dot{z}_D - \dot{z}_T \cdot z_D}{z_T^2} \cdot (x_T - x_F) + \dot{x}_T \quad (4-25)$$

对(4-23)求导可得:

$$\dot{y}_D = \left(\frac{z_D}{z_T} - 1 \right) \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}_F) + \frac{z_T \cdot \dot{z}_D - \dot{z}_T \cdot z_D}{z_T^2} \cdot (y_T - y_F) + \dot{y}_T \quad (4-26)$$

进一步可得欺骗干扰无人机的速度为:

$$v_D = \sqrt{(\dot{x}_D^2 + \dot{y}_D^2 + \dot{z}_D^2)} \quad (4-27)$$

欺骗干扰无人机的航迹偏角表达式为:

$$\alpha_D = \arctan \left(\frac{\dot{y}_D}{\dot{x}_D} \right) \quad (4-28)$$

欺骗干扰无人机的航迹倾角表达式为:

$$\beta_D = \arcsin \left(\frac{\dot{z}_D}{v_D} \right) \quad (4-29)$$

欺骗干扰无人机与它所欺骗的预警机之间的距离可由下式(4-30)进行计算:

$$r_{DT} = \sqrt{((x_D - x_T)^2 + (y_D - y_T)^2 + (z_D - z_T)^2)} \quad (4-30)$$

设欺骗干扰无人机的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率分别为 u_{D1} 、 u_{D2} 、 u_{D3} ，则：

$$\dot{v}_D = u_{D1} \quad (4-31)$$

$$\dot{\alpha}_D = u_{D2} \quad (4-32)$$

$$\dot{\beta}_D = u_{D3} \quad (4-33)$$

以上三式中的 u_{D1} 、 u_{D2} 和 u_{D3} 即欺骗干扰无人机的控制量。

综上所述，在本节的作战任务设想下，欺骗干扰无人机干扰预警机的系统模型可由式(4-19)以及式(4-22)~式(4-33)共同描述。

为了规划出尽可能真实可靠的无人机飞行航路，考虑基于预警机到无人机和假目标距离之比、无人机飞行速度、航迹倾角、航迹偏角变化率、航迹倾角变化率、加速度、升降速度这 7 种参数限制对欺骗干扰无人机的飞行轨迹进行最优化求解。同时为了所形成假目标轨迹的稳定性，从令欺骗干扰无人机自身的运动轨迹曲率尽可能小这一角度出发，建立最优控制模型：

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \int_{t_0}^{t_f} u_{D2}^2 dt \\ \text{s.t. } \dot{v}_D &= u_{D1} \\ \dot{\alpha}_D &= u_{D2} \\ \dot{\beta}_D &= u_{D3} \\ \alpha_D &= \arctan\left(\frac{\dot{y}_D}{\dot{x}_D}\right) \\ \beta_D &= \arcsin\left(\frac{\dot{z}_D}{v_D}\right) \\ x_D &= \left(\frac{z_D}{z_T} - 1\right) \cdot (x_T - x_F) + x_T \\ y_D &= \left(\frac{z_D}{z_T} - 1\right) \cdot (y_T - y_F) + y_T \\ \dot{x}_D &= \left(\frac{z_D}{z_T} - 1\right) \cdot (\dot{x}_T - \dot{x}_F) + \frac{z_T \cdot \dot{z}_D - \dot{z}_T \cdot z_D}{z_T^2} \cdot (x_T - x_F) + \dot{x}_T \\ \dot{y}_D &= \left(\frac{z_D}{z_T} - 1\right) \cdot (\dot{y}_T - \dot{y}_F) + \frac{z_T \cdot \dot{z}_D - \dot{z}_T \cdot z_D}{z_T^2} \cdot (y_T - y_F) + \dot{y}_T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_D &= \sqrt{(\dot{x}_D^2 + \dot{y}_D^2 + \dot{z}_D^2)} \\
r_{DT} &= \sqrt{((x_D - x_T)^2 + (y_D - y_T)^2 + (z_D - z_T)^2)} \\
u_{D1\min} &\leq u_{D1} \leq u_{D1\max} \\
u_{D2\min} &\leq u_{D2} \leq u_{D2\max} \\
u_{D3\min} &\leq u_{D3} \leq u_{D3\max} \\
\beta_{D\min} &\leq \beta_D \leq \beta_{D\max} \\
v_{D\min} &\leq v_D \leq v_{D\max} \\
v_{z\min} &\leq \dot{z}_D \leq v_{z\max} \\
\lambda_{\min} &\leq \frac{r_{DT}}{r_{FT}} \leq \lambda_{\max}
\end{aligned} \tag{4-34}$$

式中： $u_{D1\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小加速度；
 $u_{D1\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大加速度；
 $u_{D2\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小航迹偏角变化率；
 $u_{D2\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大航迹偏角变化率；
 $u_{D3\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小航迹倾角变化率；
 $u_{D3\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大航迹倾角变化率；
 $\beta_{D\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小航迹倾角；
 $\beta_{D\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大航迹倾角；
 $v_{D\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小速率；
 $v_{D\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大速率；
 $v_{z\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小升降速率；
 $v_{z\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大升降速率；
 r_{DT} 表示欺骗干扰无人机与预警机之间的距离；
 r_{FT} 表示假目标点与预警机之间的距离。

求解上述最优控制问题即可求得欺骗干扰机的最优航迹以及相应的运动参数，具体求解方法与第三章中所介绍的方法相类似，这里就再不多加赘述。

4.2.2 无人机干扰信号控制参数

敌方预警机的发射信号辐射到我方欺骗干扰无人机时，除了会发生反射以外，还会被我方无人机上的接收机所截获，并且按需经过一定处理后再进行转发，从而达到欺骗敌方预警机的效果。针对不同的战场情况与作战任务，干扰信号的控制参数将会有不同的求解方法。本节将在上一节所规划出的欺骗干扰无人机航迹及运动参数的基础上，对无人机所发射的干扰信号的发射频率与时延进行研究与求解。

任意时刻无人机欺骗干扰预警机的示意图如下图所示。

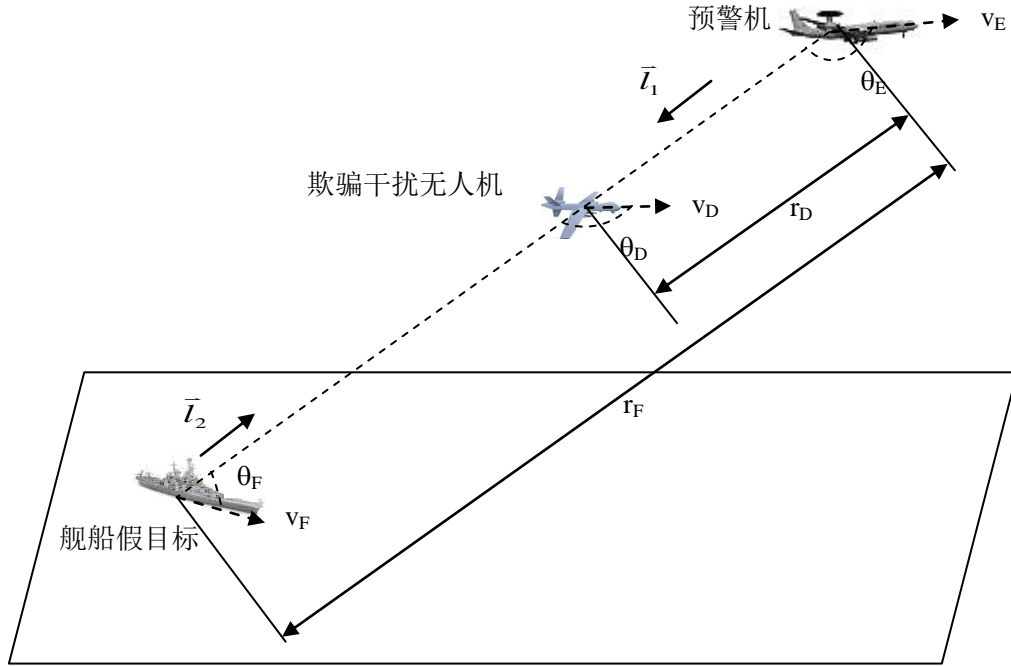


图 4.8 任意时刻无人机欺骗干扰预警机示意图

设预警机发射信号的载频为 f_c ，波长为 λ_c 。对预警机进行欺骗干扰时，任意时刻，假目标点、欺骗干扰无人机与预警机三者始终在一条直线上，设敌方预警机的速度大小为 v_E ，制定的舰船假目标运动速度大小为 v_F ，规划出的欺骗干扰无人机的速度大小为 v_D 。为了方便推导，设从预警机指向欺骗干扰无人机的方向向量为 \bar{l}_1 ，从假目标指向欺骗干扰无人机的方向向量为 \bar{l}_2 。

若假目标“真实存在”，预警机发射信号“接触”到假目标后反射的回波信号频率为：

$$f_F = f_c + f_{dE} + f_{dF} \quad (4-35)$$

其中， f_{dE} 、 f_{dF} 分别代表预警机、假目标运动产生的多普勒频移：

$$f_{dE} = \frac{v_E \cos \theta_E}{\lambda_c} \quad (4-36)$$

$$f_{dF} = \frac{v_F \cos \theta_F}{\lambda_c} \quad (4-37)$$

式(4-36)中， θ_E 为预警机速度方向与 \bar{l}_1 的夹角；式(4-37)中， θ_F 为假目标速度方向与 \bar{l}_2 的夹角。

我方欺骗干扰无人机期望敌方预警机接收到的信号频率为:

$$\begin{aligned} f_R &= f_F + f_{dE} \\ &= f_c + 2f_{dE} + f_{dF} \end{aligned} \quad (4-38)$$

欺骗干扰无人机以 v_D 的速度运动时其发射信号产生的多普勒频移为:

$$f_{dD} = \frac{v_D \cos \theta_D}{\lambda_T} \quad (4-39)$$

其中, θ_D 为欺骗干扰无人机速度方向与 \bar{l}_1 的夹角, λ_T 为欺骗干扰无人机发射信号的波长。

所以欺骗干扰无人机为了使敌方预警机最终接收到的信号频率为 f_R , 其发射信号的频率为:

$$\begin{aligned} f_T &= f_R + f_{dD} - f_{dE} \\ &= f_c + f_{dE} + f_{dF} + f_{dD} \end{aligned} \quad (4-40)$$

由于:

$$\lambda_T = \frac{c}{f_T} \quad (4-41)$$

其中, c 代表光速。

所以, 将式(4-41)代入式(4-39)可得:

$$f_{dD} = \frac{v_D \cos \theta_D f_T}{c} \quad (4-42)$$

将式(4-42)代入式(4-40)可得关于欺骗干扰无人机发射信号频率 f_T 的方程:

$$f_T = f_c + f_{dE} + f_{dF} + \frac{v_D \cos \theta_D}{c} f_T \quad (4-43)$$

解方程(4-43)可得:

$$f_T = \frac{f_c + f_{dE} + f_{dF}}{1 - \frac{v_D \cos \theta_D}{c}} \quad (4-44)$$

分别将式(4-36)与式(4-37)代入式(4-44)可得:

$$f_T = \frac{f_c + \frac{v_E \cos \theta_E}{\lambda_c} + \frac{v_F \cos \theta_F}{\lambda_c}}{1 - \frac{v_D \cos \theta_D}{c}} \quad (4-45)$$

根据 $\lambda_c = \frac{c}{f_c}$ 将式(27)进一步化简为:

$$f_T = \frac{cf_c + v_E \cos \theta_E f_c + v_F \cos \theta_F f_c}{c - v_D \cos \theta_D} \quad (4-46)$$

欺骗干扰无人机进行存储转发时, 其发射信号相对于接收信号的频移为:

$$\Delta f = f_T - f_R \quad (4-47)$$

要在预警机上产生假目标的航迹点, 必须知道产生的有源假目标点相对于预警机

的距离,进而计算出该假目标点相对于预警机的时延 $\Delta\tau$ 。对无人机所截获的信号延时 $\Delta\tau$ 后发出,即可产生一个距离欺骗的假目标点。任意时刻欺骗干扰无人机与预警机的距离为 r_D ,假目标与预警机的距离为 r_F ,则 $r_F > r_D$ 时,无人机发射信号的延时量为:

$$\Delta\tau = \frac{2(r_F - r_D)}{c} \quad (4-48)$$

4.2.3 单机欺骗干扰单架预警机仿真与分析

本节将在 Matlab 环境下,对前文所介绍的单机欺骗干扰单架预警机时的航路规划方法及干扰信号控制参数求解方法的可行性与有效性进行验证。

通常,预警机的机动幅度较小,巡航速度较慢,一般为 600km/h(即 166.7m/s)左右,飞行高度约为 8000~10000m,且其活动区域和飞行诸元相对稳定;常规航母、导弹舰等军舰的速度一般在 30 节(即 15.4m/s)左右。据此,假定探测到的敌方预警机运动航迹为:

$$\begin{cases} x(t) = 1000 + 140t \\ y(t) = 2000 + 150t \\ z(t) = 9000 + 20t \end{cases} \quad (4-49)$$

期望假目标运动航迹为:

$$\begin{cases} x(t) = 1500 + 400\cos(0.01\pi \cdot t + 1.5\pi) \\ y(t) = 1500 + 400\sin(0.01\pi \cdot t) \\ z(t) = 0 \end{cases} \quad (4-50)$$

上述 2 式航迹的单位均为 m。我方欺骗干扰无人机对敌方预警机实施距离欺骗干扰,运行时间为 20s,仿真时间步长为 0.1s。

另外需要在此赘述的是,实际中,可根据战略战术需求,将假目标轨迹与敌方预警机之间的距离在合理的前提下变得足够远。而由于所形成的军舰假目标的速度与电子战无人机和与预警机相比相差较大,这就使得在相同时间下,假目标运动所形成的轨迹长度与电子战无人机和预警机运动所形成的轨迹长度相比相差较大。所以,本节仿真时为了更好地凸显假目标、无人机、预警机三者每一时刻的位置关系,特意将假目标与预警机之间的距离拉近。

在执行本章作战任务时,无人机的相关仿真约束参数如下表 4.1 所示:

表 4.1 无人机干扰预警机时飞行参数约束

参数	数值	参数	数值
最小加速度 $u_{E1\min}$ (m/s^2)	-30	最大加速度 $u_{E1\max}$ (m/s^2)	30
最小航迹偏角变化率 $u_{E2\min}$ ($^\circ/\text{s}$)	-20	最大航迹偏角变化率 $u_{E2\max}$ ($^\circ/\text{s}$)	20
最小航迹倾角变化率 $u_{E3\min}$ ($^\circ/\text{s}$)	-15	最大航迹倾角变化率 $u_{E3\max}$ ($^\circ/\text{s}$)	15
最小速度 $v_{E\min}$ (m/s)	0	最大速度 $v_{E\max}$ (m/s)	300
最小航迹倾角 $\beta_{E\min}$ ($^\circ$)	-30	最大航迹倾角 $\beta_{E\max}$ ($^\circ$)	30
最小升降速度 $v_{z\min}$ (m/s)	-20	最大升降速度 $v_{z\max}$ (m/s)	30
最小距离约束 λ_{\min}	0.2	最大距离约束 λ_{\max}	0.8

图 4.9 是单架欺骗干扰无人机对单架敌方预警机实施欺骗干扰的示意图。给定探测到的预警机位置信息、期望的假目标航迹和初始条件后,即可按照上文所述最优控制模型来确定我方欺骗干扰无人机的运动轨迹以及运动参数。

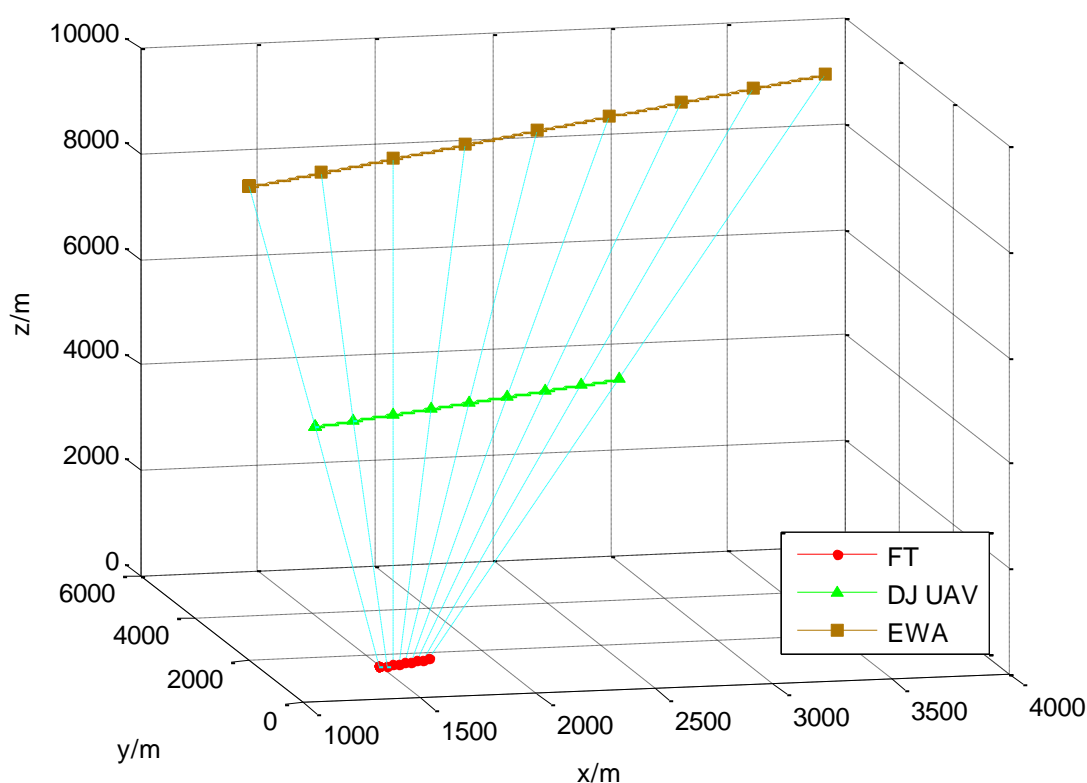


图 4.9 单机欺骗干扰单架预警机

由图 4.9 中无人机和假目标的运动轨迹可以看出,在无人机飞行过程中,持续对敌方预警机进行欺骗干扰,从而在海面上形成了一条符合实际舰船运动特征的假目标轨迹。

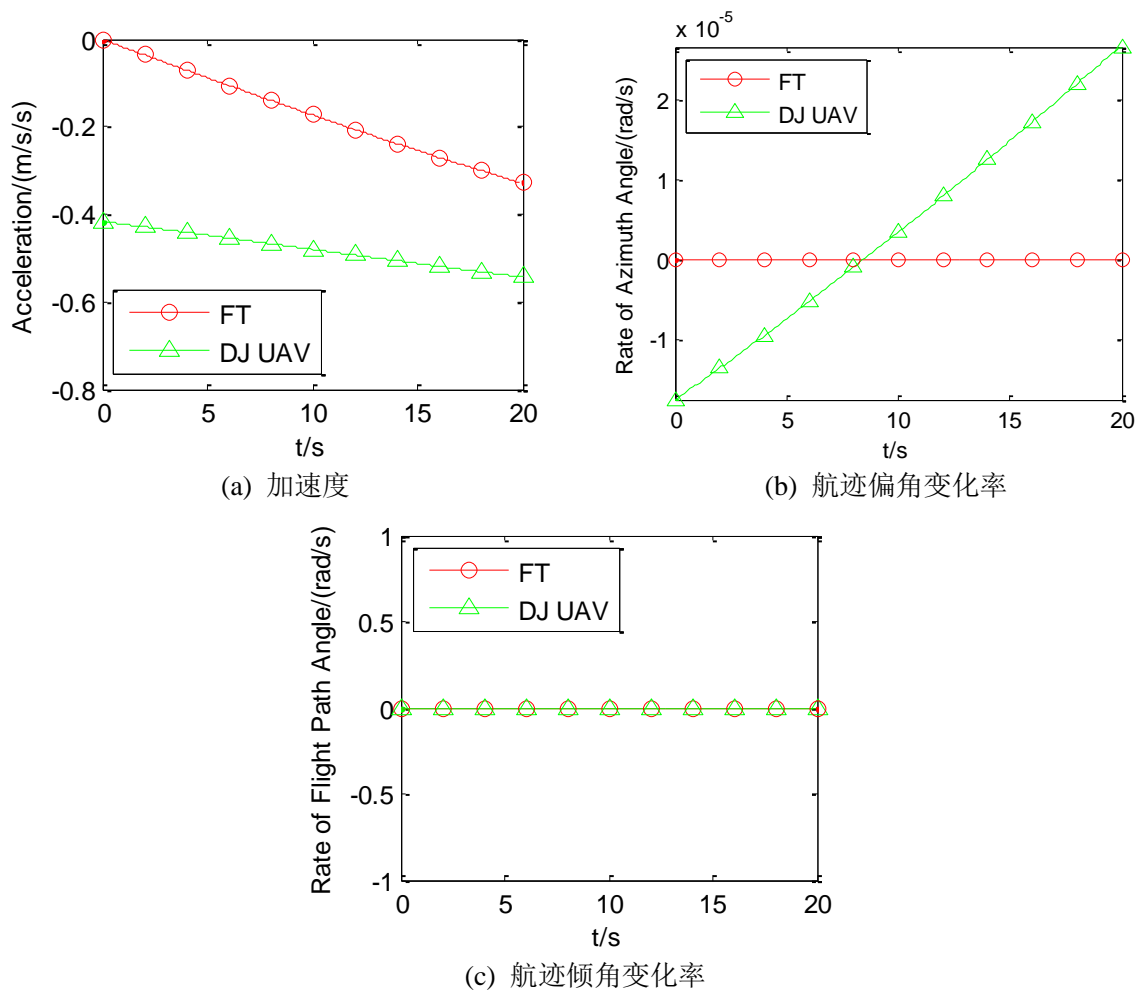
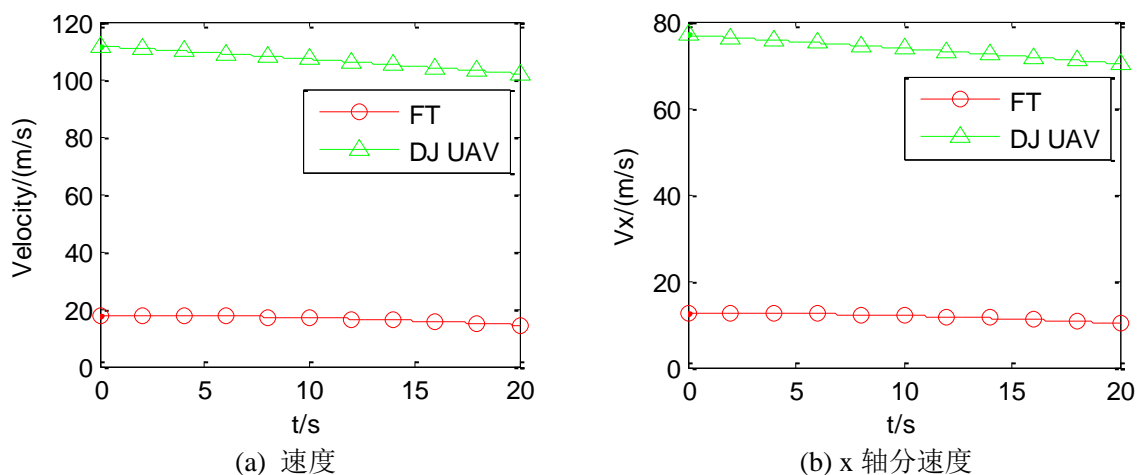


图 4.10 电子战无人机控制量变化曲线

图 4.10 为在当前单机欺骗干扰单架预警机这一任务下规划出的电子战无人机控制量变化曲线。由图中可以看出，我方欺骗干扰无人机具有较小的航迹偏角变化率，显然这符合 4.2.1 节构筑最优控制模型是所运用的代价函数 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{D2}^2 dt$ 。而且较小的控制量保证了无人机执行任务过程中飞行的平稳性。



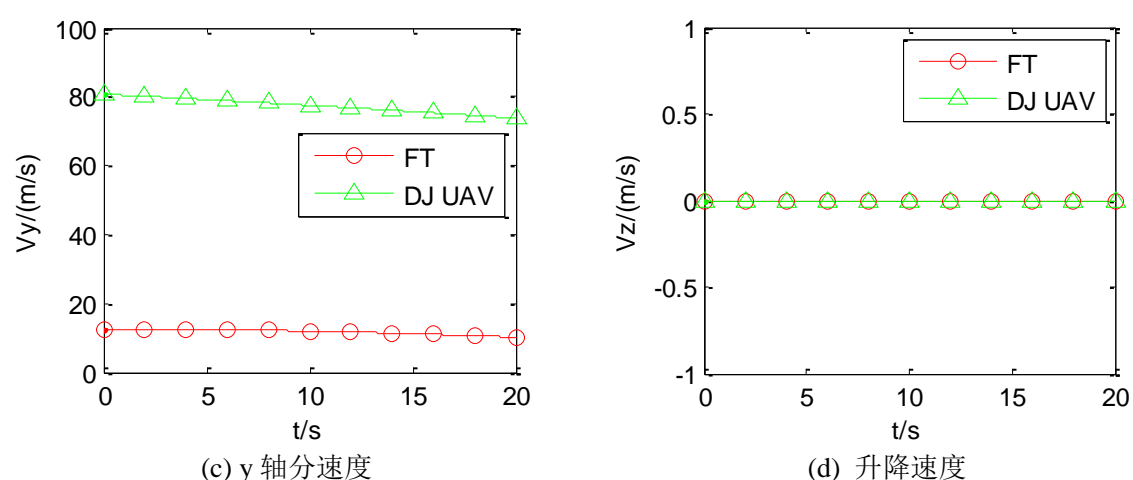


图 4.11 电子战无人机速度变化曲线

图 4.11 为任务过程中电子战无人机速度变化曲线。显而易见，上图(a)与(d)中的速度与升降速度均满足表 4-1 中的参数限制。而且当前场景下规划出的欺骗干扰无人机的升降速度为 0，即 z 轴分速度为 0。

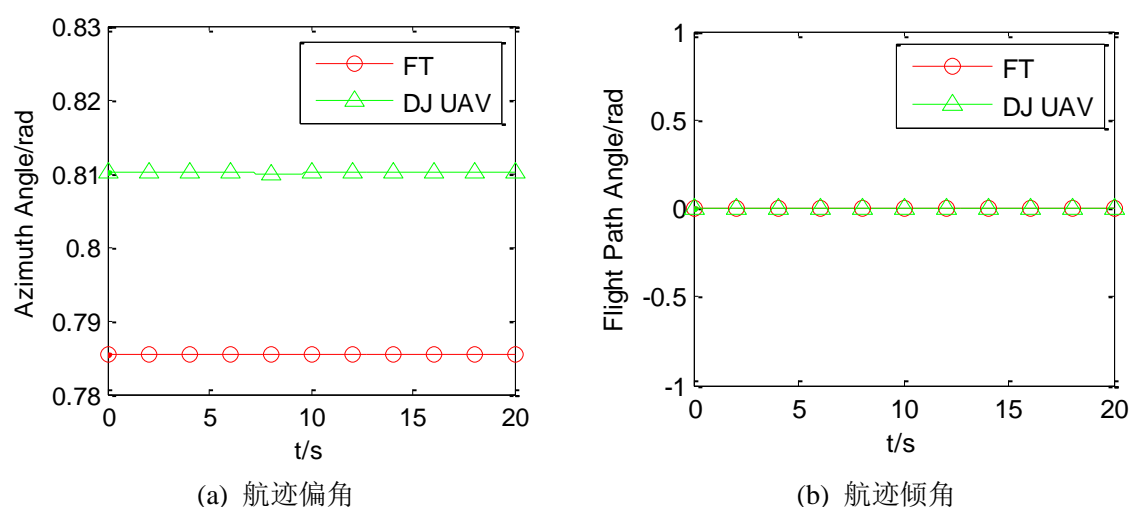
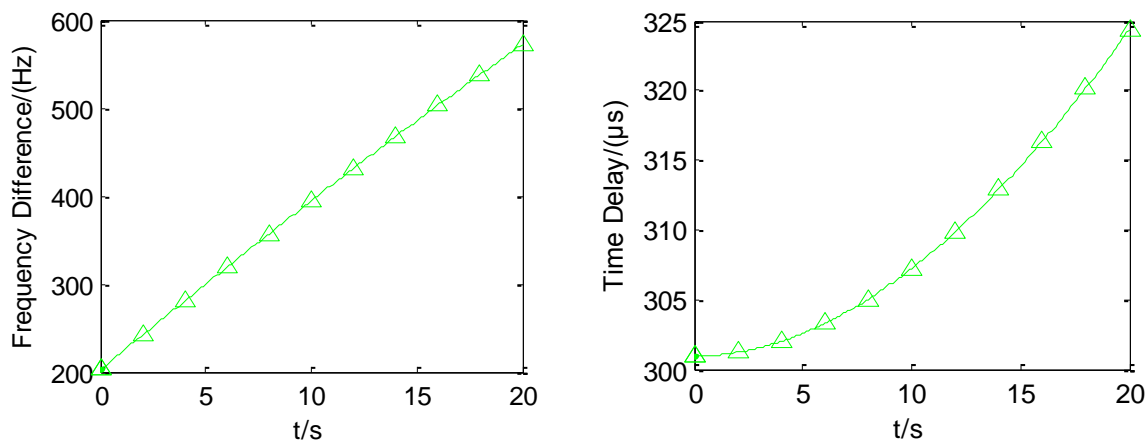


图 4.12 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 4.12 为欺骗干扰无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出，在整个任务过程中，无人机速度方向变化较小，且始终符合相应的约束限制。而且图(b)中欺骗干扰无人机的航迹倾角始终为 0 也与图 4.11(d)中的升降速度为 0 这一情况相吻合。

下图 4.13 为无人机干扰信号控制参数演化曲线。其中，图(a)为欺骗干扰无人机所发射的干扰信号与其所截获到的预警机发射信号之间的频差演化曲线。由于欺骗干扰无人机、预警机、假目标都在运动，所以无人机需要在其截获信号的基础上加入频差并进行转发，使得敌方预警机误认为存在正在以速度 v_p 运动的假目标。图(b)为无

人机发射信号相对于截获信号的时延演化曲线。欺骗干扰无人机为了使飞行于高空的预警机错误地判定海面上存在舰船假目标,所以其对预警机发射的干扰信号相对于其截获的预警机发射信号需存在一定的时间延迟。通过观察图 4.9 可知,图 4.13 中的时延越来越大是因为规划出的无人机航迹与期望形成的海面上的舰船假目标之间的距离越来越远。



(a) 无人机发射信号相对截获信号的频差

(b) 无人机发射信号相对截获信号的时延

图 4.13 无人机干扰信号控制参数

综上所述,本文所提出的单机欺骗干扰单架预警机航路规划与干扰信号控制参数求解方法具有一定的可行性,通过该方法可以形成一条在海面上运动的具有军舰运动特性的假目标航迹。

4.3 多机协同复合干扰多架预警机

4.3.1 多机协同复合干扰多架预警机数学模型

多架电子战无人机协同干扰互联的多架预警机时,其关键点在于:

(1)、怎样才能欺骗当前任务区域内的多架预警机,使得多架预警机经过信息共享后识别到同一条具备真实目标运动特征的假目标轨迹。这需要我方多架欺骗干扰无人机合理地规划飞行航迹,使得任意时刻从每架预警机与其对应的欺骗干扰无人机之间的连线都汇聚于同一个点上,从而就形成了一条连续的假目标航迹。

(2)、怎样才能通过压制干扰无人机对欺骗干扰无人机实施掩护,保证欺骗干扰无人机在对某架预警机实施距离欺骗干扰时不被其他预警机发现。这就需要我方合理有效地控制压制干扰无人机对敌方预警机实施噪声压制干扰,从而减小欺骗干扰无人机的暴露概率。

多机协同欺骗干扰多架敌方预警机的任务想定如图 4.14 所示。

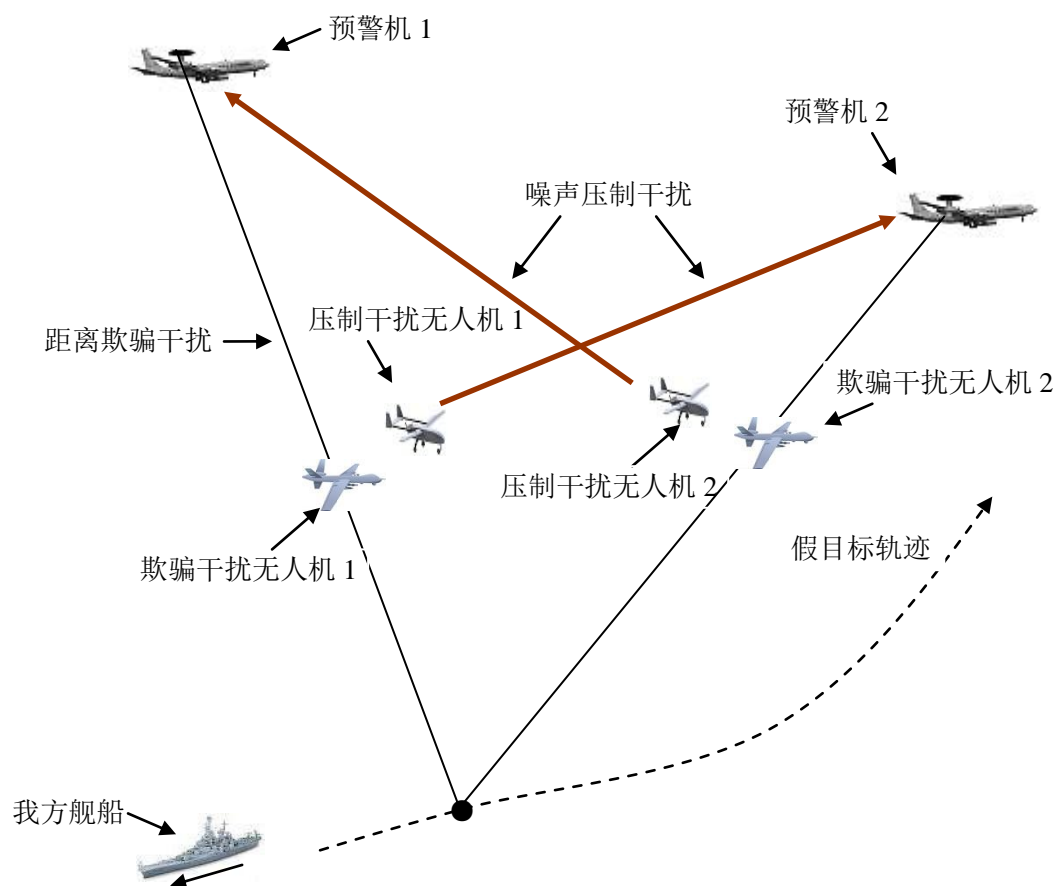


图 4.14 多机协同复合干扰敌方多架预警机

从图 4.14 中可以看出,通过对每架电子战无人机进行准确的控制,令多机协同欺骗干扰产生的假目标具备真实目标的运动特性,敌方预警机不易鉴别,就起到了航迹欺骗干扰的效果;同时,每架欺骗干扰无人机配备一架压制干扰无人机,组成多机编队实施复合干扰,为了尽可能地起到掩护的作用,控制压制干扰无人机在预警机和欺骗干扰无人机的视线方向上进行噪声压制干扰,从而对欺骗干扰无人机起到保护作用,进一步提高欺骗干扰的有效性和成功率。从图中可以看出,欺骗干扰无人机 1 对预警机 1 实施欺骗干扰,欺骗干扰无人机 2 对预警机 2 实施欺骗干扰,使得敌方两架预警机接收到同一条假目标航迹;与此同时,为了降低欺骗干扰无人机 1 被敌方预警机 2 探测到的概率,令压制干扰无人机 1 合理地对预警机 2 实施噪声压制干扰;为了降低欺骗干扰无人机 2 被敌方预警机 1 探测到的概率,令压制干扰无人机 2 合理地对预警机 1 实施噪声压制干扰。通过四架电子战无人机对敌方两架预警机的有效干扰,我方作战舰船完成预定任务的概率得以提高。

当然,虽然当前提出的多机协同复合干扰多架预警机是基于 2 部雷达进行讨论的,但其实该构想适用于任意多部雷达组网的情况,只需根据实际雷达数量改变欺骗干扰无人机与压制干扰无人机的数量即可。

多架电子战无人机协同干扰多架预警机时,其中每架欺骗干扰无人机的航迹规划

模型如前文 4.2.1 节所述，所以本节主要讨论压制干扰无人机的航迹规划模型。预警机、压制干扰无人机与欺骗干扰无人机之间的空间位置关系如下图 4.15 所示。

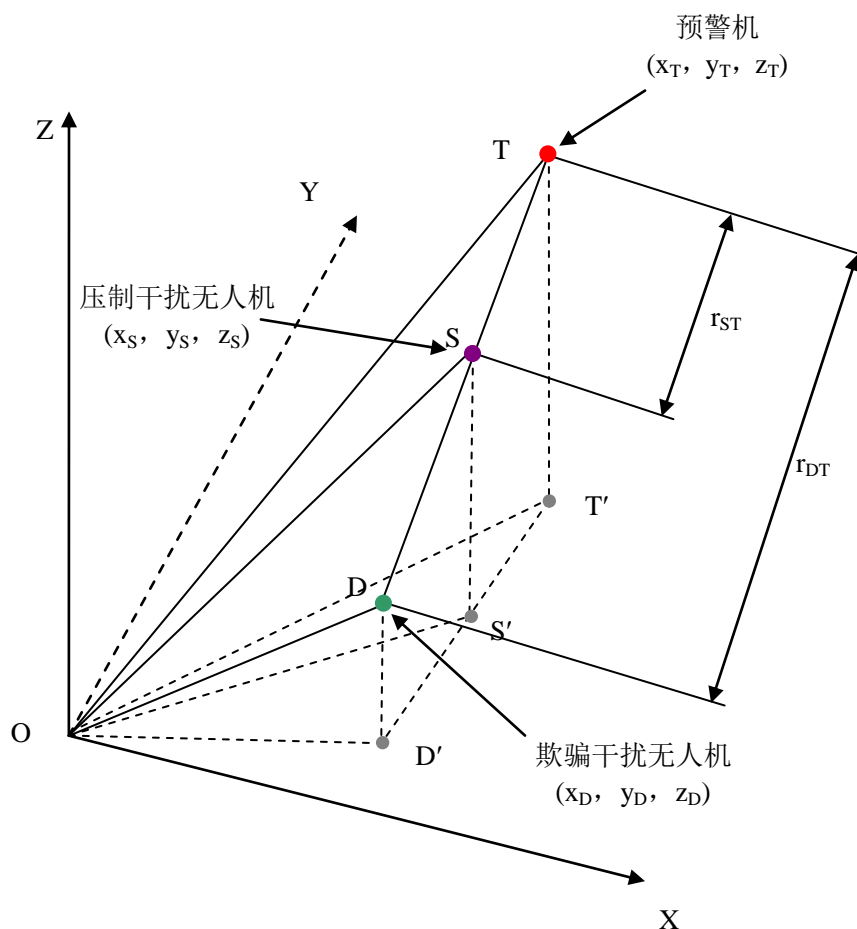


图 4.15 某时刻预警机、压制干扰无人机与欺骗干扰无人机位置关系示意图

直角坐标系中，压制干扰无人机的运动方程与欺骗干扰无人机相类似，为：

$$\begin{cases} \dot{x}_s = v_s \cos \beta_s \cos \alpha_s \\ \dot{y}_s = v_s \cos \beta_s \sin \alpha_s \\ \dot{z}_s = v_s \sin \beta_s \\ \dot{v}_s = u_{s1} \\ \dot{\alpha}_s = u_{s2} \\ \dot{\beta}_s = u_{s3} \end{cases} \quad (4-51)$$

式中， (x_s, y_s, z_s) 表示压制干扰无人机的位置坐标， v_s 为压制干扰无人机的速度， β_s 为压制干扰无人机的航迹倾角， α_s 为压制干扰无人机的航迹偏角， u_{s1} 、 u_{s2} 和 u_{s3} 为控制量，分别表示压制干扰无人机的加速度、航迹偏角变化率和航迹倾角变化率。

从上图中可以看出，任意时刻，预警机、压制干扰无人机与欺骗干扰无人机始终

在一条直线上,而与上一节不同之处在于三者的 z 轴坐标都在随时间不断变化,并没有恒等于 0 的情况存在,即:

$$\frac{x_S - x_D}{x_D - x_T} = \frac{y_S - y_D}{y_D - y_T} = \frac{z_S - z_D}{z_D - z_T} \quad (4-52)$$

通过(4-52)可以推导出 x_S 、 y_S 表达式分别为:

$$x_S = \frac{z_S - z_D}{z_D - z_T} \cdot (x_D - x_T) + x_D \quad (4-53)$$

$$y_S = \frac{z_S - z_D}{z_D - z_T} \cdot (y_D - y_T) + y_D \quad (4-54)$$

区别于 z_D 的不等式约束条件, z_S 需满足的不等式约束为:

$$z_D < z_S < z_T \quad (4-55)$$

对(4-53)求导可得:

$$\dot{x}_S = \frac{z_S - z_D}{z_D - z_T} \cdot (\dot{x}_D - \dot{x}_T) + \frac{(z_D - z_T) \cdot (\dot{z}_S - \dot{z}_D) - (\dot{z}_D - \dot{z}_T) \cdot (z_S - z_D)}{(z_D - z_T)^2} \cdot (x_D - x_T) + \dot{x}_D \quad (4-56)$$

对(4-54)求导可得:

$$\dot{y}_S = \frac{z_S - z_D}{z_D - z_T} \cdot (\dot{y}_D - \dot{y}_T) + \frac{(z_D - z_T) \cdot (\dot{z}_S - \dot{z}_D) - (\dot{z}_D - \dot{z}_T) \cdot (z_S - z_D)}{(z_D - z_T)^2} \cdot (y_D - y_T) + \dot{y}_D \quad (4-57)$$

进一步可以求得压制干扰无人机的速度表达式为:

$$v_S = \sqrt{(\dot{x}_S^2 + \dot{y}_S^2 + \dot{z}_S^2)} \quad (4-58)$$

压制干扰无人机的航迹偏角表达式为:

$$\alpha_s = \arctan\left(\frac{\dot{y}_S}{\dot{x}_S}\right) \quad (4-59)$$

压制干扰无人机的航迹倾角表达式为:

$$\beta_s = \arcsin\left(\frac{\dot{z}_s}{v_s}\right) \quad (4-60)$$

压制干扰无人机与它所干扰的预警机之间的距离可由下式(4-61)进行计算:

$$r_{ST} = \sqrt{((x_s - x_T)^2 + (y_s - y_T)^2 + (z_s - z_T)^2)} \quad (4-61)$$

综上所述, 压制干扰无人机对敌方预警机实施干扰的系统模型可由式(4-51)以及式(4-53)~式(4-61)共同描述。

如同 4.2.1 节对于欺骗干扰无人机的航路规划数学模型一样, 本节基于预警机到压制干扰无人机和欺骗干扰无人机距离之比、无人机飞行速度、航迹倾角、航迹偏角变化率、航迹倾角变化率、加速度、升降速度这 7 种参数限制对压制干扰无人机的飞行轨迹进行了最优化求解。同时从令压制干扰无人机自身的运动轨迹曲率尽可能小这一角度出发, 建立最优控制模型:

$$\begin{aligned} \min J_1 &= \int_{t_0}^{t_f} u_{s2}^2 dt \\ \text{s.t. } \dot{v}_s &= u_{s1} \\ \dot{\alpha}_s &= u_{s2} \\ \dot{\beta}_s &= u_{s3} \\ \alpha_s &= \arctan\left(\frac{\dot{y}_s}{\dot{x}_s}\right) \\ \beta_s &= \arcsin\left(\frac{\dot{z}_s}{v_s}\right) \\ x_s &= \frac{z_s - z_D}{z_D - z_T} \cdot (x_D - x_T) + x_D \\ y_s &= \frac{z_s - z_D}{z_D - z_T} \cdot (y_D - y_T) + y_D \\ \dot{x}_s &= \frac{z_s - z_D}{z_D - z_T} \cdot (\dot{x}_D - \dot{x}_T) \\ &\quad + \frac{(z_D - z_T) \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_D) - (\dot{z}_D - \dot{z}_T) \cdot (z_s - z_D)}{(z_D - z_T)^2} \cdot (x_D - x_T) + \dot{x}_D \\ \dot{y}_s &= \frac{z_s - z_D}{z_D - z_T} \cdot (\dot{y}_D - \dot{y}_T) \\ &\quad + \frac{(z_D - z_T) \cdot (\dot{z}_s - \dot{z}_D) - (\dot{z}_D - \dot{z}_T) \cdot (z_s - z_D)}{(z_D - z_T)^2} \cdot (y_D - y_T) + \dot{y}_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
v_S &= \sqrt{(\dot{x}_S^2 + \dot{y}_S^2 + \dot{z}_S^2)} \\
r_{ST} &= \sqrt{((x_S - x_T)^2 + (y_S - y_T)^2 + (z_S - z_T)^2)} \\
u_{S1\min} &\leq u_{S1} \leq u_{S1\max} \\
u_{S2\min} &\leq u_{S2} \leq u_{S2\max} \\
u_{S3\min} &\leq u_{S3} \leq u_{S3\max} \\
\beta_{S\min} &\leq \beta_S \leq \beta_{S\max} \\
v_{S\min} &\leq v_S \leq v_{S\max} \\
v_{z\min} &\leq \dot{z}_S \leq v_{z\max} \\
\lambda_{\min} &\leq \frac{r_{ST}}{r_{DT}} \leq \lambda_{\max}
\end{aligned} \tag{4-62}$$

式中, $u_{S1\min}$ 表示压制干扰无人机的最小加速度;

$u_{S1\max}$ 表示压制干扰无人机的最大加速度;

$u_{S2\min}$ 表示压制干扰无人机的最小航迹偏角变化率;

$u_{S2\max}$ 表示压制干扰无人机的最大航迹偏角变化率;

$u_{S3\min}$ 表示欺骗干扰无人机的最小航迹倾角变化率;

$u_{S3\max}$ 表示欺骗干扰无人机的最大航迹倾角变化率;

$\beta_{S\min}$ 表示压制干扰无人机的最小航迹倾角;

$\beta_{S\max}$ 表示压制干扰无人机的最大航迹倾角;

$v_{S\min}$ 表示压制干扰无人机的最小速度;

$v_{S\max}$ 表示压制干扰无人机的最大速度;

$v_{z\min}$ 表示压制干扰无人机的最小升降速度;

$v_{z\max}$ 表示压制干扰无人机的最大升降速度;

r_{ST} 表示压制干扰无人机与预警机之间的距离;

r_{DT} 表示欺骗干扰无人机与预警机之间的距离。

求解(4-62)最优控制问题即可求得压制干扰无人机的最优化航迹以及相应的运动参数, 类似问题的求解方法详见第三章。

4.3.2 多机协同复合干扰多架预警机仿真与分析

为了验证本文多机协同干扰多架联网预警机算法的有效性, 在 Matlab 环境下进行相应的无人机干扰仿真。由 4 架电子战无人机构成的多机编队对敌方 2 架预警机执行协同干扰任务, 其中我方 2 架为欺骗干扰无人机, 2 架为压制干扰无人机。假定探测到的敌方预警机 1 运动轨迹为:

$$\begin{cases} x(t) = 1000 + 140t \\ y(t) = 2000 + 150t \\ z(t) = 9000 + 10t \end{cases} \quad (4-63)$$

敌方预警机 2 运动轨迹为:

$$\begin{cases} x(t) = 2000 + 120t \\ y(t) = 1000 + 130t \\ z(t) = 8000 + 20t \end{cases} \quad (4-64)$$

期望的假目标航迹为:

$$\begin{cases} x(t) = 1500 + 400 \cos(0.01\pi \cdot t + 1.5\pi) \\ y(t) = 1500 + 400 \sin(0.01\pi \cdot t) \\ z(t) = 0 \end{cases} \quad (4-65)$$

上述 3 式的单位为 m, 运行时间为 20s, 仿真时间间隔为 0.1s。

电子战无人机的相关飞行参数约束依旧如表 4-1 所示。

另外需要在此赘述的是, 与 4.2.2 节一样, 实际中, 可根据战略战术需求, 将假目标与敌方预警机之间的距离在合理的前提下变得足够远, 而本节仿真时为了更好地凸显假目标、无人机、预警机三者每一时刻的位置关系, 特意将假目标与预警机之间的距离拉近。

本节分别在 3.5.3 节所给出的两种代价函数($J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 和 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$)下对多机协同复合干扰敌方多架预警机时的电子战无人机航路、运动参数及相应的干扰信号控制参数进行了规划仿真。

(1)、代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时电子战无人机航路及运动参数仿真与分析

图 4.16 是代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 2 架欺骗干扰无人机和 2 架压制干扰无人机协同复合干扰 2 架敌方预警机的示意图。

给定假目标的航迹和初始条件后, 即可按照上文所述方法先确定 2 架欺骗干扰无人机的运动轨迹及运动参数, 然后再进一步规划出 2 架压制干扰无人机合理的运动轨迹及运动参数。

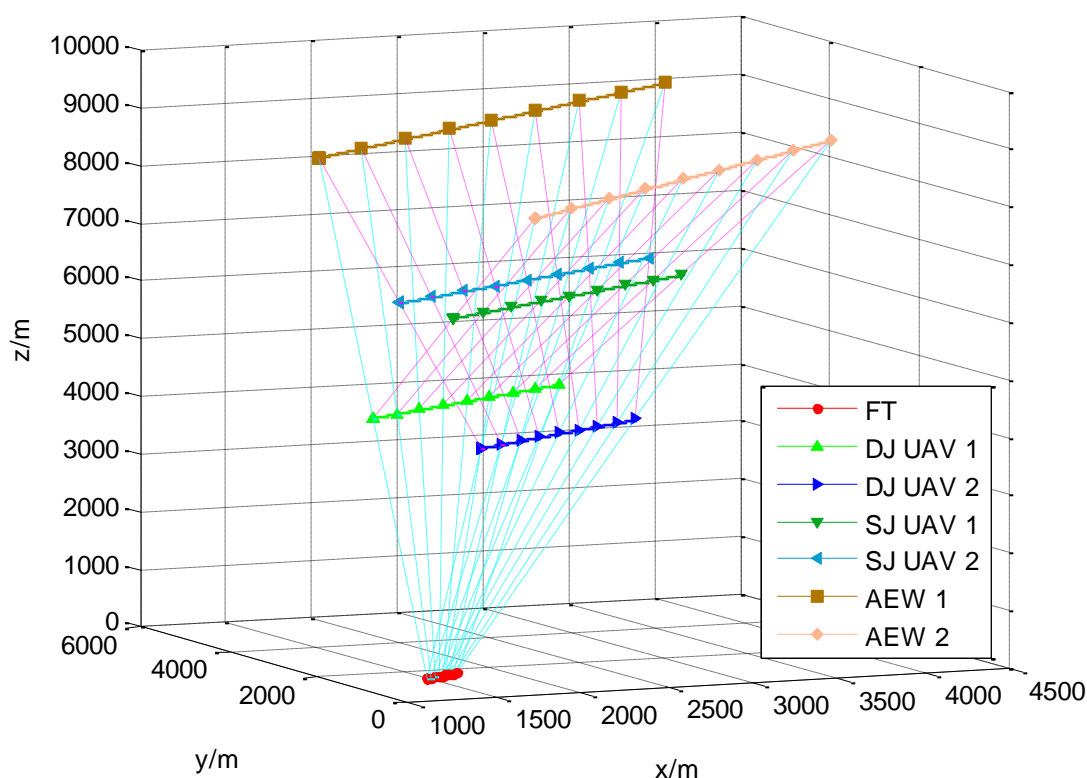
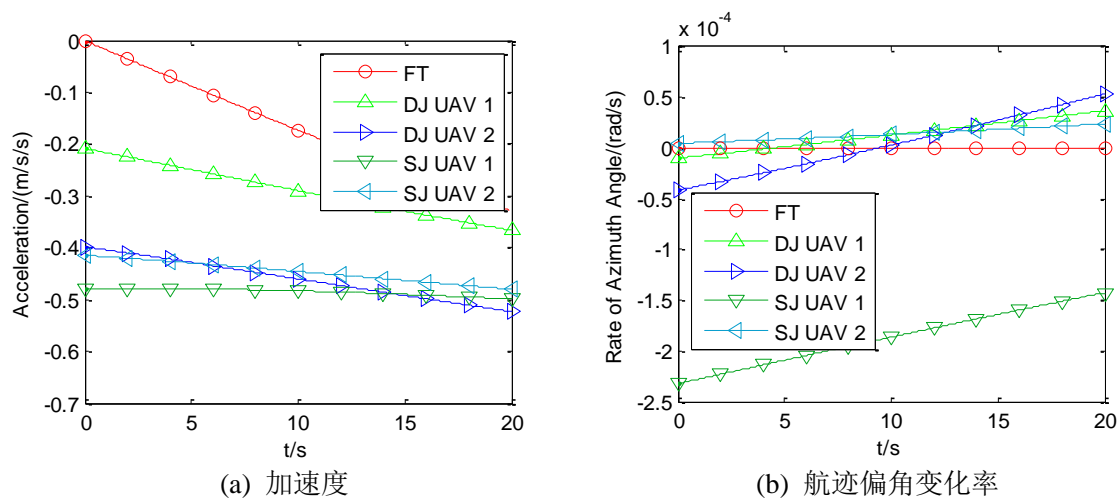
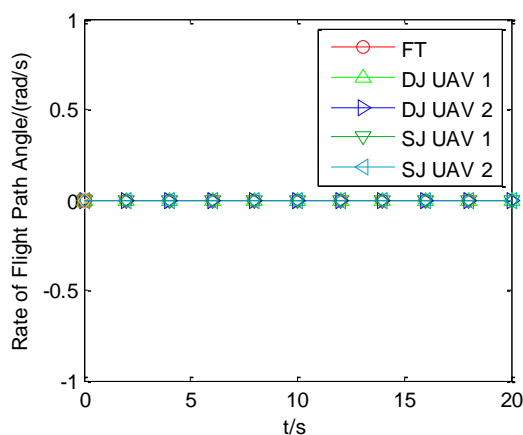


图 4.16 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时多机协同复合干扰多架预警机

由图 4.16 可以发现, 2 架欺骗干扰无人机分别对各自负责的预警机进行假目标欺骗干扰, 并且令 2 架预警机接收到的假目标维持重合, 从而形成一条具备真实舰船目标运动特征的假目标运动轨迹。同时, 2 架压制干扰无人机掩护各自的欺骗干扰无人机, 对相应的预警机实施噪声压制干扰, 使得欺骗干扰无人机难以被发现, 进而提高了假目标的可信度。

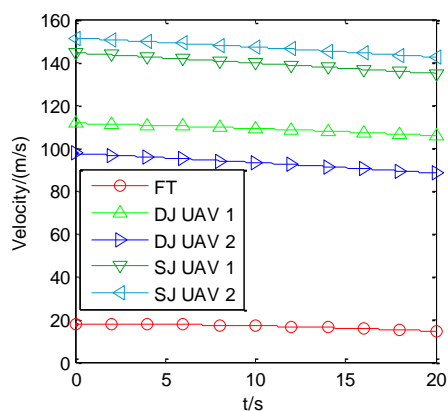




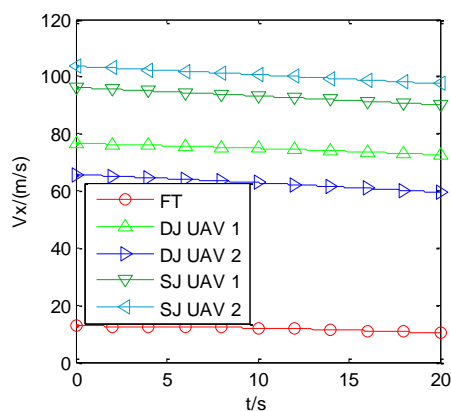
(c) 航迹倾角变化率

图 4.17 电子战无人机控制量变化曲线

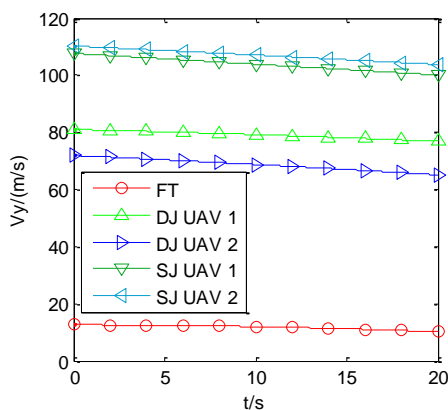
图 4.17 为当代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时仿真所得的电子战无人机控制量变化曲线。从图中可以看出，在任务过程中两架无人机的加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 4.1 中的无人机参数约束。而且 4 架无人机的航迹偏角变化率都很小，符合我们对于代价函数 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 的期望。



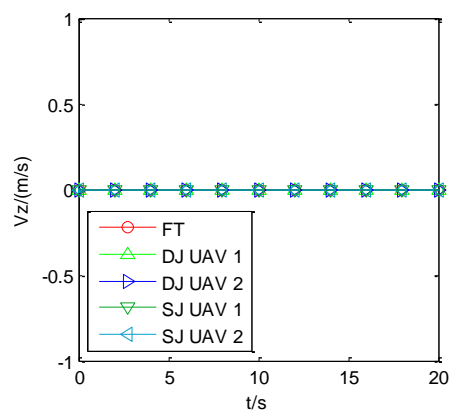
(a) 速度



(b) x 轴分速度



(c) y 轴分速度



(d) 升降速度

图 4.18 电子战无人机速度变化曲线

图 4.18 为在当前任务下电子战无人机速度变化曲线。其中，图(a)与图(d)中的无人机速度与升降速度均满足表 4.1 中的参数限制。

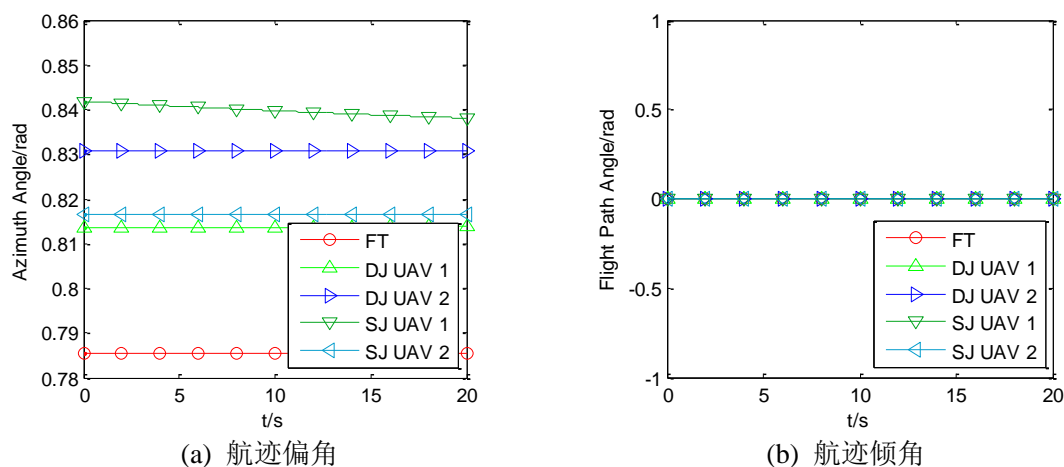


图 4.19 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 4.19 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。由上图可以看出，4 架无人机的航迹倾角始终符合相应的约束限制，且飞行姿态都比较平稳，没有出现突发地剧烈变化。

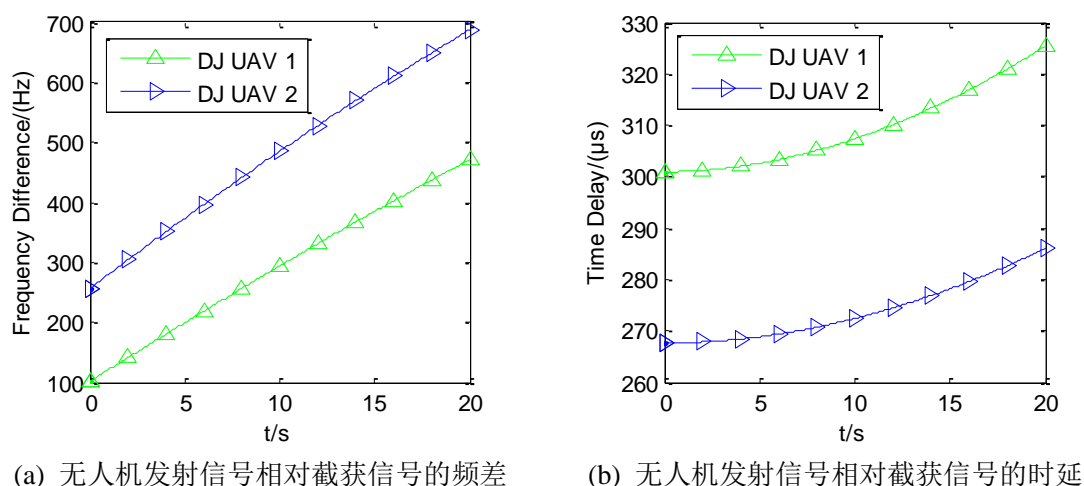


图 4.20 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数

图 4.20 为 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数演化曲线。其中，图(a)为欺骗干扰无人机所发射的干扰信号与其所截获到的预警机发射信号之间的频差演化曲线。图(b)为无人机发射信号相对于截获信号的时延演化曲线。

由以上仿真结果可知，本文的多机协同复合干扰多架敌方预警机的方法是合理有效的，多电子战无人机组队可以成功执行假目标欺骗干扰，再辅以噪声压制干扰，可以有效地打乱敌方作战决策。

(2)、代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时电子战无人机航路及运动参数仿真与分析

代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰多架预警机示意图如图 4.21 所示。

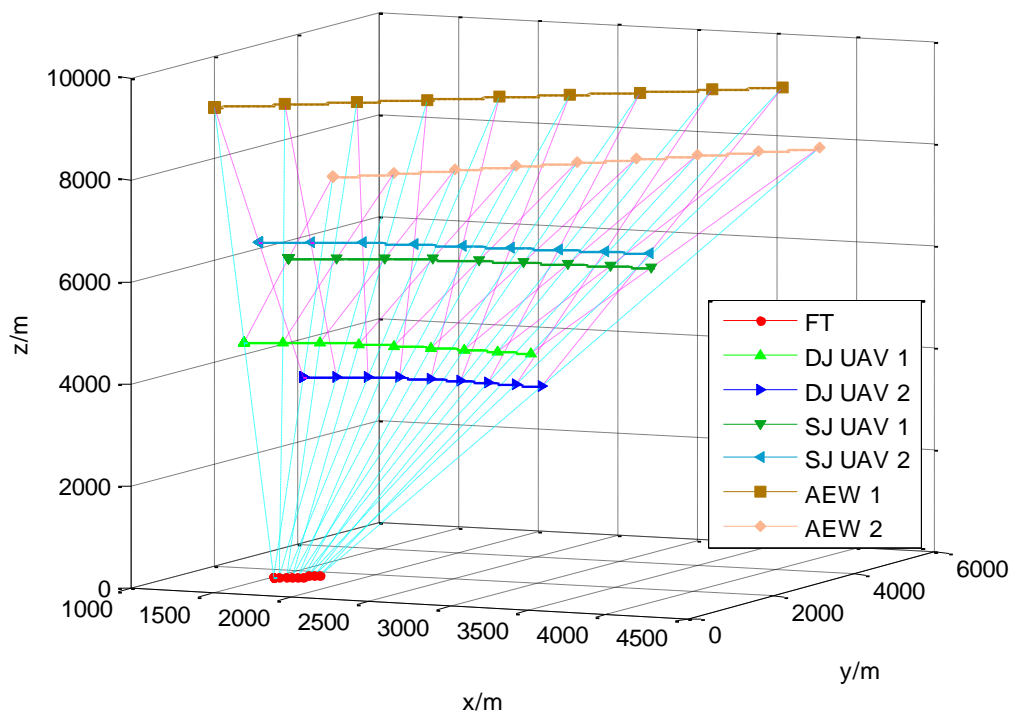
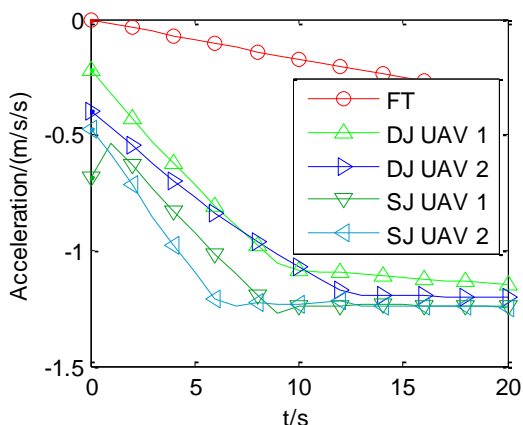
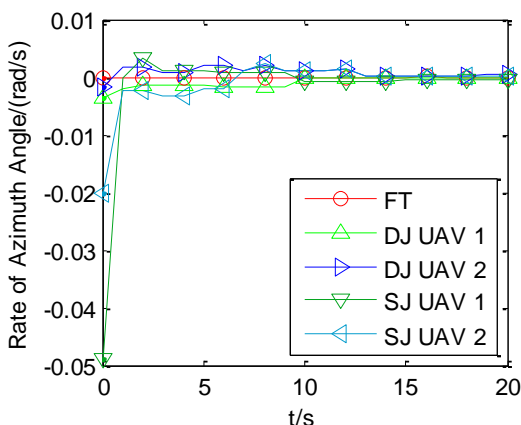


图 4.21 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时多机协同复合干扰多架预警机

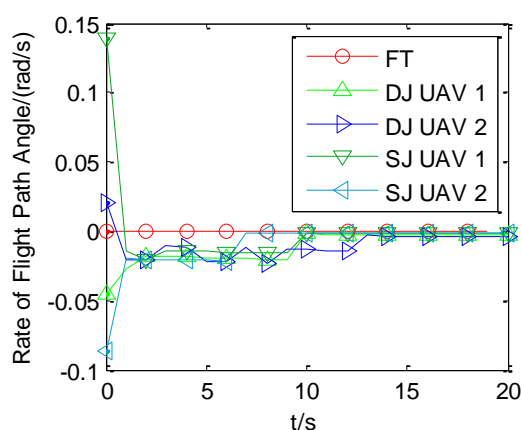
从上图中可以看出，随着电子战无人机的运动，预警机 1、欺骗干扰无人机 1 与假目标轨迹点一直可以连成一条直线，预警机 2、欺骗干扰无人机 2 与假目标轨迹点一直可以连成一条直线，进而通过欺骗干扰对敌方预警机形成且仅形成一条假目标航迹；同时，预警机 2、压制干扰无人机 1 与欺骗干扰无人机 1 一直可以连成一条直线，预警机 1、压制干扰无人机 2 与欺骗干扰无人机 2 一直可以连成一条直线，两者均起到缩短对应预警机探测距离、保护相应的我方欺骗干扰无人机的作用。



(a) 加速度



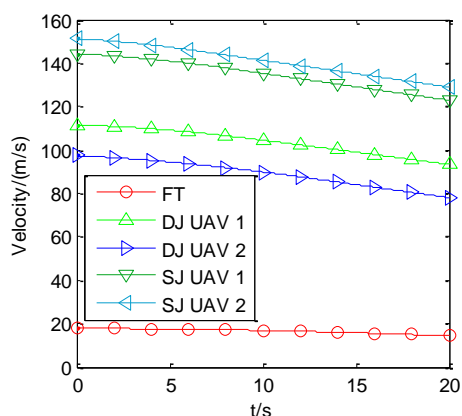
(b) 航迹偏角变化率



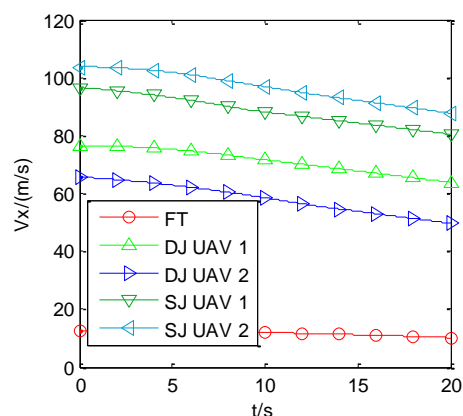
(c) 航迹倾角变化率

图 4.22 电子战无人机控制量变化曲线

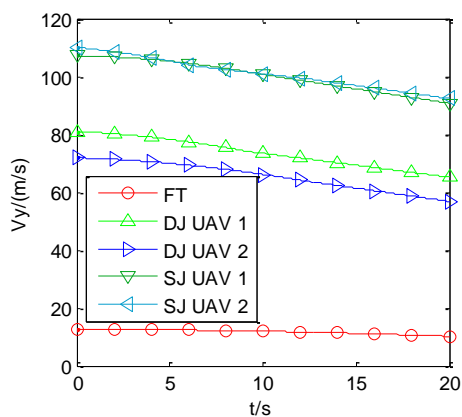
图 4.22 为在当前多机协同复合干扰敌方 2 架预警机这一任务下，代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^t v_E^2 dt$ 时仿真所得的电子战无人机控制量变化曲线。从图中可以看出，在任务过程中 4 架无人机的加速度、航迹偏角变化率及航迹倾角变化率均满足表 4.1 中的无人机参数约束。而且随着时间的推移，4 架无人机的飞行趋于平稳。



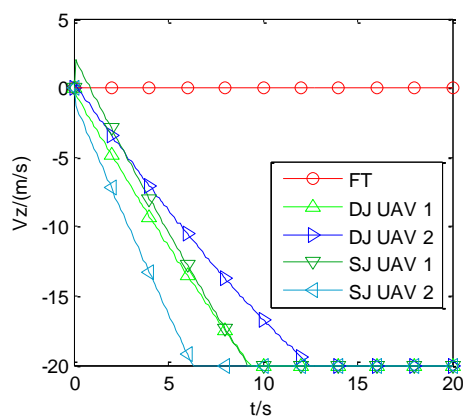
(a) 速度



(b) x 轴分速度



(c) y 轴分速度



(d) 升降速度

图 4.23 电子战无人机速度变化曲线

图 4.23 为在当前任务下电子战无人机速度变化曲线。其中，图(a)与图(d)中的无人机速度与升降速度均满足表 4.1 中的参数限制。

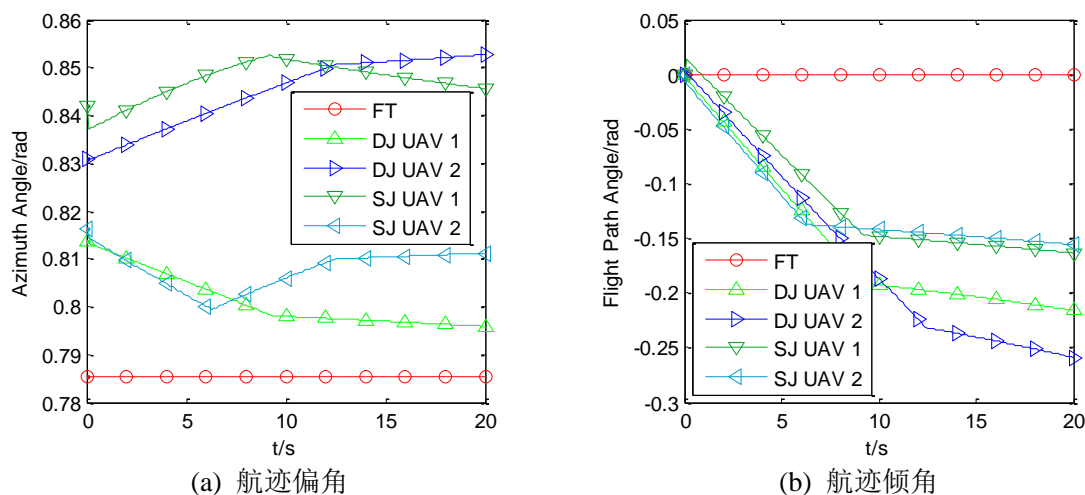
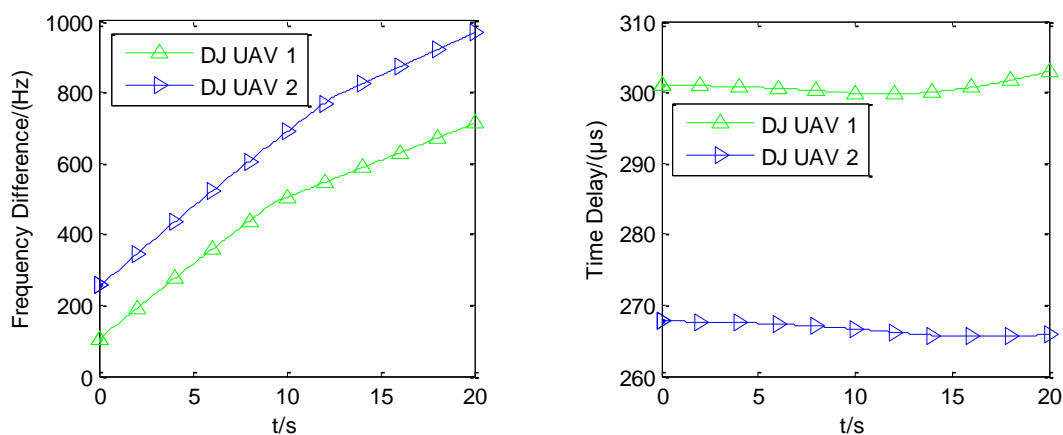


图 4.24 电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线

图 4.24 为电子战无人机航迹偏角、航迹倾角变化曲线。从图中可以看出，航迹倾角始终符合相应的约束限制。但与图 4.19 相比，代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时航迹偏角与航迹倾角的变化幅度更大，这说明在相同的任务下，当我们期望无人机速度较小时，它就需要在航迹偏角与航迹倾角上做出相对较大的调整。



(a) 无人机发射信号相对截获信号的频差

(b) 无人机发射信号相对截获信号的时延

图 4.25 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数

图 4.25 为 2 架欺骗干扰无人机干扰信号控制参数演化曲线。其中，图(a)为欺骗干扰无人机所发射的干扰信号与其所截获到的预警机发射信号之间的频差演化曲线。图(b)为无人机发射信号相对于截获信号的时延演化曲线。由于欺骗干扰无人机 1 距假目标的距离比欺骗干扰无人机 2 远，所以其时延略大。

两种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率如表 4.2 所示。

表 4.2 两种代价函数下电子战无人机的平均航迹偏角变化率

电子战无人机	$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 \bar{u}_{E2} (rad/s)	$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 \bar{u}_{E2} (rad/s)
欺骗干扰无人机 1	1.5429×10^{-5}	8.8259×10^{-4}
欺骗干扰无人机 2	2.3995×10^{-5}	1.1×10^{-3}
压制干扰无人机 1	1.8666×10^{-4}	1.4×10^{-3}
压制干扰无人机 2	1.3828×10^{-5}	1.4×10^{-3}

由表 4.2 可以看出, 代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 4 架无人机的平均航迹偏角变化率确实均小于代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时的对应数值。

两种代价函数下电子战无人机的平均速度如表 4.3 所示。

表 4.3 两种代价函数下电子战无人机的平均速度

电子战无人机	$J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时 \bar{v}_E (m/s)	$J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 \bar{v}_E (m/s)
欺骗干扰无人机 1	108.8	103.8
欺骗干扰无人机 2	93.0	89.1
压制干扰无人机 1	139.5	134.8
压制干扰无人机 2	146.9	141.0

由表 4.3 可以看出, 代价函数为 $J_2 = \int_{t_0}^{t_f} v_E^2 dt$ 时 4 架无人机的平均速度确实均小于代价函数为 $J_1 = \int_{t_0}^{t_f} u_{E2}^2 dt$ 时的对应数值。

从以上 2 表可以看出, 实际运用时我们可以按需选择不同的代价函数来灵活地进行电子战无人机的航路规划。同时, 本节在 2 种不同的代价函数下均成功地规划出了符合任务要求与无人机飞行参数限制的电子战无人机航路, 这充分地说明了笔者所提出的多机协同复合干扰多架敌方预警机这一方法的可行性。

4.4 本章小结

本章分别对多场景下电子战无人机干扰的航路规划进行了分析与研究。由于无人机在巡弋与搜索阶段一般做定高飞行, 所以本章首先基于这一场景提出了多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰模型, 仿真结果表明该方法具有可行性。接着, 为了达到欺骗敌方预警机、掩护我方作战舰船的目的, 建立了单机欺骗干扰单架预警机的

模型，在直角坐标系下推导出无人机航路规划数学模型，并推导了无人机发射干扰信号的频率公式及时延公式，仿真结果表明无人机按照本章方法规划出的航路飞行并对敌预警机进行欺骗干扰，可以在海面上形成一条具有真实舰船目标特性的假目标轨迹。最后，在单机欺骗干扰单架预警机的基础上设计了多机协同复合干扰敌方多架预警机的方法，推导出其航路规划数学模型，并进行了仿真验证。这一方法不仅使敌方多架预警机仅看到一条重合的舰船假目标轨迹，同时通过压制干扰无人机的合理飞行与干扰，增强了欺骗干扰无人机的安全性，提高了假目标轨迹的可信度。

第五章 总结与展望

5.1 总结

电子干扰作为电子战无人机的重要任务之一,在攻防对抗领域起到了不可或缺的作用,而航路规划技术也是电子战无人机任务规划系统的主要内容,基于此本文对多机协同复合干扰航路规划技术进行了研究与分析。

首先,本文介绍了无人机的结构及特点,并描述了电子战无人机的主要作战任务,其中包括电子侦察、电子攻击和电子防御。随后分析了电子战无人机在空袭中的几种典型作战运用:佯装攻击、掩护干扰、分布式干扰与引诱干扰。最后,总结了电子战无人机的发展趋势。

其次,本文分析了敌方雷达组网环境下多机协同复合干扰的优势与干扰要求。针对组网雷达强大的抗干扰性,对雷达组网环境下多机协同复合干扰航路规划方法进行了研究与分析。在该方法中,为了保障欺骗干扰无人机的安全性并提高假目标轨迹的可信度,采用了假目标欺骗干扰与噪声压制干扰相结合的方法,并分别推导了包含7种飞行参数限制的欺骗干扰无人机与压制干扰无人机的航路规划最优控制数学模型。本文所给出的最优控制模型,规划出的航迹相比以往更加贴近无人机的实际飞行情况。另外,本文还介绍了两种代价函数,认为在不同作战任务要求、无人机型号等情况下可以按需灵活地构造或选择不同的代价函数对无人机航路进行规划。本文在Matlab环境下分别对单机欺骗干扰单部雷达、单机欺骗-单机压制以及多机协同复合干扰组网雷达这三种情况下无人机的航路进行了仿真求解,证明了本章算法的可行性。其中,在第三种情况下分别基于2种不同的代价函数对无人机的航路进行了规划,并对结果进行了分析与比较。

最后,本文研究了多场景下电子战无人机进行干扰任务时的航路规划问题。首先,在敌方雷达组网环境下,设计了多无人机巡弋与搜索阶段定高协同复合干扰模型,该模型不仅提高了无人机在巡弋与搜索阶段的安全性,同时这也有利于我方的情报收集,是具有实际意义的。为了达到欺骗敌方预警机、掩护我方作战舰船的目的,本文建立了单机欺骗干扰单架预警机的模型,在直角坐标系下推导出无人机航路规划最优控制模型,并基于规划出的无人机航路推导了无人机欺骗干扰信号控制参数的求解公式。随后在单机欺骗干扰单架预警机的基础上设计了多机协同复合干扰敌方多架预警机的任务想定与方法,并推导出其航路规划最优控制模型。这一方法不仅使敌方多架预警机只能看到一条重合的具有真实舰船运动特性的假目标轨迹,同时通过压制干扰无人机的合理飞行与干扰,增强了欺骗干扰无人机的安全性,提高了假目标轨迹的可

信度。本章还分别对三种情况下的无人机航路规划进行了仿真，仿真结果表明本文所提出的方法具有一定的可行性。

5.2 展望

本文主要研究了在互联互通、数据共享的一体化防空体系下，多电子战无人机协同复合干扰航路规划的方法。基于当前的理论研究基础，对未来的研究方向和目标做出以下几个方面的展望：

(1)、本文所分析的电子战无人机的作战运用虽有相关文献的支持，但还需要在实际演练中不断调整、完善，使其趋于合理化。而且，如何丰富电子战无人机在实际作战中的运用模式，使其在现代化电子战中发挥更大的作用与价值，也是非常值得思考与研究的问题。

(2)、常见的航迹规划算法所取得的成果往往只是满足对于算法中设置的限制与要求，但是实际上无人机的飞行过程中一定要满足一定的物理与飞行约束条件，所以设计更加贴合实际无人机飞行情况的模型也显得很有实际意义。

(3)、欲要对敌方预警侦察设备进行有效的干扰，需要尽可能更多、更准地获取敌方情报(如位置等)，这有赖于后续相关领域(如定位等)的研究与发展。

参考文献

- [1] 李远. 多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [2] 姚崇. 无人机飞行仿真系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] Secretaries of The Military Departments. Unmanned Systems Roadmap 2006-2032[M]. <http://www.fas.org/irp/program/collect/usroadmap2006.pdf>, 2006.
- [4] 李倩. 无人机编队飞行控制器关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [5] 姚如贵. 无人机高速数据传输中 Turbo-OFDM 技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [6] 李大光. 机器人与未来战争[J]. 领导科学论坛, 2016,77-96.
- [7] 杨春. 基于中空中速长航时无人机的地面站系统总体方案研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [8] 白木, 周洁. 军用无人机的发展及应用[J]. 科学大观园, 2001,10-11.
- [9] 张钰栋, 马朝鹏, 周堃, 谯羽枫. 无人机的优势和应用[J]. 科学与财富, 2018,1.
- [10] 童颖飞. 无人机对地侦察任务规划系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 王强, 杨胜荣, 贾致红. 某型无人机飞行控制系统[J]. 四川兵工学报, 2009,82-86.
- [12] 温羨峤, 李英. 从美国无人机的发展来看无人机在未来战争中的应用前景[J]. 现代防御技术, 2003,1-4.
- [13] 杨俊, 韩洪亮, 朱渊超, 王焯. 信息化条件下电子防空装备建设研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 23-27.
- [14] 崔洪杰. 威胁联网下多无人机协同任务规划研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- [15] Ousingsawat A, Campbell M E. Multiple Vehicle Team Tasking for Cooperative Estimation[C]. In Proceedings of the American Control Conference, 2004.
- [16] Kim J, Hespanha J P. Cooperative Radar Jamming for Groups of Unmanned Air Vehicles[C]. In Proceedings of the 43rd Conference on Decision and Control, 2004, 1: 632-637.
- [17] Eun Y, Bang H. Cooperative Control of Multiple UCAVs for Suppression of Enemy Air Defense[C]. In Proceedings of the AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference Chicago, Illinois, 2004.
- [18] 胡云舒. 无人机航路规划系统研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [19] 刘振峰. 蚁群算法在飞行器航路规划中的应用研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- [20] 杨力. 无人机航路规划技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [21] 刘钢. 基于几何模型优化的反舰导弹航路规划方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [22] 王壮, 刘聪锋, 蔡啸. 一种基于 Voronoi 图的航路规划方法[J]. 舰船电子对抗, 2017, 4:23-27.

- [23] Pachter M, Chandler P, Larson R, et al. Concepts for Generating Coherent Radar Phantom Tracks Using Cooperating Vehicles[C]//Aiaa Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2013.
- [24] Maithripala D H A, Jayasuriya S. Radar deception through phantom track generation[C]//Proc. of the American Control Conference, 2005:4102-4106.
- [25] Maithripala D H A, Jayasuriya S. Phantom Track Generation in 3D through Cooperative Control of Multiple ECAVs Based on Geometry[C]//Proc. of the 1st International Conference on Industrial and Information Systems, 2006:255-260.
- [26] Maithripala D H A, Jayasuriya S . Feasibility considerations in formation control: Phantom track generation through multi-UAV collaboration[C]// IEEE Conference on Decision & Control. IEEE, 2008:3959-3964.
- [27] 汪宏宇,李仙茂,甘厚吉,陈德. 电子战无人机对警戒雷达双机干扰的路径规划研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 12:34-38.
- [28] 杨继庚, 董文锋, 余国文, 杨继午. 电子战无人机分布式干扰路径规划[J]. 电光与控制, 2016, 8:39-43.
- [29] 杨俭, 汤亚波. 假目标欺骗干扰无人机空域协同干扰策略研究[J]. 航空科学技术, 2017, 5:37-41.
- [30] 李小波, 孙琳, 周青松, 单凉. 多机协同的组网雷达欺骗干扰航迹优化[J]. 现代防御技术, 2016, 6:43-49.
- [31] 孙琳, 李小波, 毛云祥, 徐旭宇. 基于多机协同的组网雷达欺骗干扰策略[J]. 电子信息对抗技术, 2016, 3:51-54.
- [32] 李飞, 周中良, 苟新禹, 陈中起. 基于多机协同航迹欺骗的组网雷达突防技术[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(11):2309-2313.
- [33] 范振宇, 王磊, 苏建春. 多机协同控制下的航迹欺骗技术[J]. 信息与电子工程, 2010, 8(3):265-268.
- [34] MCCLAIN T W, CHANDLER P R, PACHTER M. A Decomposition Strategy for Optimal Coordination[C]//Unmanned Air Vehicles. Proc. Of the Acc, 2000.
- [35] Keith B Purvis, Karl J Astrom, Mustafa Khammash. Estimating Radar Positions Using Cooperative Unmanned Air Vehicle Teams[C]//2005 American Control Conference, 2005, 6:3512 -3517.
- [36] Keith B Purvis, Phillip R Chandler. A Review of Recent Algorithms and a New and Improved Cooperative Control Design for Generating a Phantom Track[C]//2007 American Control Conference, 2007, 7:3252-3258.
- [37] Shima T, Chandler P, Pachter M. Decentralized estimation for cooperative phantom track generation[J]. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 2007, 588:339-350.

- [38] 韩泉泉. 混合编队无人机的协同控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [39] 李光超. 小型无人机机体寿命分析研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [40] 王红雨. 微型小无人机控制及组合导航若干关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [41] 孙曙平, 张政文. 军事理论教程[M]. 河海大学出版社, 2002.
- [42] 袁仕继, 孙明峰, 陈合峰. 复杂电磁环境下电子战无人机作战应用研究[J]. 舰船电子工程, 2011, 21-24.
- [43] 王强, 王永宏. 高等院校军事理论教材[M]. 中国对外经济贸易出版社, 2001.
- [44] 付伟. 国外舰载无人机的发展现状[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2001, 10-13.
- [45] 刘玉清. 神奇斗士—智能武器[M]. 华中师范大学出版社, 2000.
- [46] 余旭东. 未来作战中无人机作战使用十大方式[J]. 飞航导弹, 2005, 4:30-32.
- [47] 嵇成新. 军用无人机的用途及关键技术[J]. 现代防御技术, 2009, 6:26-30.
- [48] 肖霞. 无人机的电子战运用及对未来电子战的影响[J]. 现代防御技术, 2005, 6:32-36.
- [49] 邓武振, 兰敏华. 未来空战的"主角"—无人机的使用方式透析[J]. 科学 24 小时, 2006, 2:31-32.
- [50] 徐裴为. 随队支援干扰效果分析[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [51] 马亚涛, 许金萍, 彭燕. 分布式干扰系统对单部雷达干扰暴露区的算法及相关研究[J]. 舰船电子对抗, 2009, 3:14-17.
- [52] 周晓群. 电子战无人机的未来发展趋势预测[J]. 舰船科学技术, 2004, 4:42-45.
- [53] 罗守贵. 电子战无人机的发展现状及趋势[J]. 舰船电子对抗, 2009, 2:42-45.
- [54] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安电子科技大学出版社, 1999.
- [55] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004:170-171.
- [56] 张养瑞, 高梅国, 李云杰. LFM 脉冲雷达恒虚警检测的协同压制干扰[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11):2156-2163.
- [57] BAR-SHALOM Y, LI X R. Estimation and Tracking: Principles, Techniques, and Software[M]. Norwood, MA: Artech House, 1993.
- [58] BAR-SHALOM Y, LI X R, KIRUBARAJAN T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2001.
- [59] 吴玉清. 针对组网雷达的电子干扰技术研究[D]. 电子科技大学, 2013.
- [60] 马亚涛. 对雷达网的欺骗干扰技术研究[D]. 电子科技大学, 2013.
- [61] 罗金亮. 双基地雷达航迹欺骗干扰方法研究[J]. 火控雷达技术, 2012,41(3):6-9.
- [62] 李阳. 脉冲压缩雷达系统建模及抗干扰性能仿真分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [63] Il-Hyoung Lee, Hyochoong Bang. Optimal Phantom Track Generation for Multiple Electronic Combat Air Vehicles[C]. International Conference on Control, Automation and Systems. COEX, Seoul, Korea, 2008:29-33.

- [64] 袁天, 陶建锋, 李兴成. 飞行器编队协同的虚假航迹产生仿真研究[J]. 计算机仿真, 2017,34(8):100-104.
- [65] XU Yun-jun, GARETH Basset. Optimal Coherent Phantom Track Design Using Virtual Motion Camouflage[C]//2010 American Control Conference, 2010, 6:5400-5405.
- [66] 郭淑芬, 余国文, 熊鑫, 徐鹏. 基于无人机协同的航迹欺骗干扰方法研究[J]. 空军预警学院学报, 2018, 32(1):44-47.

致谢

时光飞逝，不知不觉间，已在西电学习、生活了三年。蓦然回首，三年间的点点滴滴涌上心头。在此论文完成之际，谨向所有关心和帮助过我的老师、同学、朋友以及家人致以最真诚的感谢！

首先衷心地感谢我的导师刘聪锋老师，感谢刘老师在这三年里，对我细心的指导和无私的帮助。刘老师崇高的师德、严谨的治学态度、博大精深的理论知识、精湛的科研实践能力以及迅捷的思维都在潜移默化地影响着我，每每看着刘老师辛勤工作的身影，我也充满了前进的动力。我的每一次进步，每一份成果都离不开刘老师的谆谆教诲。刘老师总是在百忙之中抽出时间督促我们的理论学习，与我们共同探讨问题，带领我们在开放自由、轻松而不失严谨的学术氛围中进行专业课题研究。刘老师做人做事的方式更深深地影响了我们，教导我们严以律己，以德服人。在生活上，刘老师也总是给予学生无微不至的关怀。借此机会，再次向刘老师表达深深的敬意和最诚挚的感谢。

同时，感谢实验室的王珂、葛声、王壮、贺杏、苏娟、徐满军等师兄师姐在学习上对我的悉心指导，在生活上的帮助和关怀。感谢同级的刘晨翀、侯俊荣三年在学习和生活中给予我的鼓励与帮助，与你们的沟通和交流，使我获得了许多启发，在研究生期间遇到你们，是我的荣幸，谢谢你们。同时感谢付盼龙、韵晋伟、殷晨阳、张文婷、白艳东、杨红杰、李健辉等师弟师妹们，和他们的讨论让我对专业知识有了更加深刻的理解，对科研思路有了更加新颖的想法。

我也要感谢我的舍友王惟一、孙超军、申贝贝和杜伯楠，你们许多的优秀品质让我获益匪浅，三年的宿舍生活将在我的人生中划出浓重的一笔，在这即将分开的时候，真心的跟你们说声谢谢。

此外，我还要特别感谢我的父母和家人，感谢他们多年来对我的关心和默默的支持与鼓励，他们一直是我坚强的后盾和努力奋斗的不竭动力，感谢他们一直以来的对我的支持、理解与包容。

感谢各位老师和评审专家在百忙之中审阅此文。

所有的感谢都不仅仅是能用语言表达的，更重要的是在我的心里！或许我的辞藻不够华丽，但是我的感谢却是发自内心的！最后再次对所有帮助与关心我的人们表示深深的感谢与最诚挚的祝福，祝福大家工作顺利，家庭美满！



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

地址：西安市太白南路2号

邮编：710071

网址：www.xidian.edu.cn