

面向无人机集群航迹欺骗的雷达站址和无人机抖动误差分析

蒋泽宇, 时晨光, 周建江, 闻 雯

(南京航空航天大学雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京 211106)

摘 要: 现代化战争中, 利用无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)集群对敌方组网雷达进行航迹欺骗干扰是一种反敌方雷达侦测的有效手段。然而, 考虑到战场环境的复杂性和不确定性, 无人机集群因其对组网雷达定位精度有限而存在站址误差, 同时受气流和控制系统等影响而存在抖动误差, 两者都会导致实际生成的虚假航迹点偏离预设位置, 使之无法达到预期的欺骗效果。针对以上问题, 本文在已知雷达站址、无人机位置和欺骗距离, 同时组网雷达空间分辨单元(Space resolution cell, SRC)一定的情况下, 分别分析了存在雷达站址误差和无人机抖动误差时, 无人机集群成功欺骗干扰组网雷达所允许的最大误差范围。针对典型组网雷达系统, 总结了两种误差对航迹欺骗效果的影响规律, 并提出了改善航迹欺骗效果的建议。数值仿真结果表明, 分析和推导结果能够分别在存在雷达站址误差和无人机抖动误差情况下有效评估能否成功欺骗组网雷达。

关键词: 航迹欺骗; 雷达站址误差; 无人机抖动误差; 组网雷达; 无人机集群

中图分类号: TN974

文献标志码: A

Analysis of Radar Station Position and UAV Jitter Error for UAV Cluster Track Deception

JIANG Zeyu, SHI Chenguang, ZHOU Jianjiang, WEN Wen

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In modern wars, using unmanned aerial vehicle (UAV) clusters to jam the enemy network radar for track deception is an effective way of anti-enemy radar detection. However, given the complexity and uncertainty of the battlefield environment, there are station location errors due to the limited positioning accuracy of the networked radar, and jitter errors due to the influence of air flow and control system. These can cause the generated false track points to deviate from the preset positions and the expected deception effect cannot be achieved. To solve the above problems, this paper analyzes the radar station location errors and UAV jitter errors when the radar station position, UAV position and deception distance are known and the networked radar space resolution cell (SRC) is certain. The UAV cluster successfully deceives the maximum error range allowed by the jamming network radar. For a typical networked radar system, the influence rules of two kinds of errors on the track deception effect are summarized. Some suggestions are put forward to improve the track deception effect. Numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金(62271247); 航空科学基金(20220055052001); 江淮前沿技术协同创新中心追梦基金(2023-ZM01D001); 南京航空航天大学前瞻布局科研专项资金。

收稿日期: 2024-02-28; **修订日期:** 2024-04-25

results show that the analysis and derivation results can effectively evaluate whether the networked radar can be successfully tricked under the condition of radar position error and UAV jitter error separately.

Key words: track deception; radar position error; unmanned aerial vehicle (UAV) jitter error; networked radar; UAV cluster

引 言

未来作战体系中,由于单部雷达的探测能力和抗干扰能力有限,将雷达组网进行协同探测已经成为必然趋势^[1-2]。组网雷达是一种具有极高抗干扰能力的雷达新体制,其特点有雷达站点分布广泛、信息融合、频段和极化方式多样等。这些优势使得传统的压制和欺骗式干扰对组网雷达的干扰效果受到限制,难以有效地削弱组网雷达的探测能力和信息传输能力^[3]。因此,针对组网雷达的干扰技术是目前雷达领域非常重要的研究方向之一。而无人机集群具有高度灵活性、立体化攻击能力、数量优势和可编程能力强等优势,是一种理想的干扰手段^[4]。如今,利用无人机集群对组网雷达进行欺骗干扰已经成为一种备受关注的策略。

虚假航迹欺骗干扰一般指转发式干扰。转发式干扰利用数字射频存储器(Digital radio frequency memory, DRFM)对截获的雷达信号进行快速存储、调制和转发,从而对雷达进行航迹欺骗^[5],以达到干扰敌方雷达系统的目的。DRFM可以针对雷达实施欺骗干扰,伪造虚假目标航迹使得敌方雷达系统误判目标位置、速度或者飞行轨迹,进而消耗雷达系统资源。此外,转发式干扰可产生密集假目标干扰,改变雷达回波信号的散射特性、速度和高度等,干扰敌方雷达系统对真实目标航迹的识别和跟踪,提升真实目标的生存能力^[6]。近年来,众多学者针对无人机集群航迹欺骗开展研究,并取得了进展。吴玉清^[7]针对传统欺骗式干扰失效,提出了对雷达主瓣和雷达副瓣实施假航迹干扰的算法,该算法能对组网雷达形成有效的虚假航迹欺骗干扰,并提出了一种集分布式压制性干扰和假航迹干扰于一体的复合干扰技术,使所需的干扰功率大幅降低。吕炫^[8]分析了雷达站址误差与干扰机预设位置误差对虚假航迹的影响,提出了两种将压制与欺骗结合的复合干扰方法,取得了较好的干扰效果。郭文元^[9]提出了复合式噪声干扰技术,并引入针对组网雷达的航迹欺骗策略,利用启发式搜索算法寻找最佳航迹,为多机协同突防奠定基础。陈保亮^[10]提出了在限定虚假目标航迹条件下,采用分段拟合的思想来求解无人机的运动规律和协同策略,具有较好的实用性。Fan等^[11]利用无人机虚假航迹与组网雷达的几何空间关系简化无人机运动模型,求解出虚假航迹,对多无人机协同分组优化问题的研究具有一定的参考意义。Zhao等^[12]利用多无人机欺骗组网雷达生成相干假目标,提出了欺骗双雷达网络,此方法对于欺骗3部以上雷达也具有参考价值。Ouyang等^[13]根据无人机和虚假航迹的运动特性,建立了金字塔模型,求解出完成组网雷达航迹欺骗所需无人机的最小数量和速度。Xu等^[14]提出了一种仿生运动策略,用于设计电子战机的实时最优轨迹,对于解决虚假轨迹与实际飞行器之间强耦合问题有重要意义。Purvis等^[15-16]分别通过在成本中添加平滑惩罚函数、控制参数两种方法优化航迹算法,设计了一个在非线性约束条件下可行的虚假航迹,并修改算法使系统能够动态更新虚假航迹点。蒋雪琴等^[17]提出通过对组网雷达进行电子干扰,降低目标船舶的检测率,增加雷达输出的数据量来减小雷达探测覆盖面积,仿真结果证明该方案能有效保护目标船舶。李松等^[18]提出了通过无人机辅助空中计算系统联合轨迹规划与功率优化方法,为大范围、分布式数据的快速聚合提供了有效的解决方法。Rao等^[19]提出了一种基于非相干双源干扰的合作欺骗方法,可以通过控制振幅比和时间延迟,在雷达系统中引入角度测量误差,从而降低组网雷达融合系统的区分能力。赵艳丽等^[20]针对多假目标距离欺骗干扰下组网雷达跟踪问题,提出了一种基于同源量测融合的跟踪技术,该方法具有较高的工程实践价值。

以上关于无人机集群航迹欺骗的研究中,绝大多数是假设不存在误差的情况下展开的。然而,事实上,航迹欺骗过程不可避免会存在误差,这些误差可以大致归纳为3种:转发时延误差、无人机抖动误差和雷达站址误差。转发时延误差是指由于DRFM本身精度受限,难以对截获的信号进行精确延时所产生的误差。时晨光等^[21]分析了DRFM存在转发时延误差的情况下对组网雷达进行有效欺骗干扰的边界条件,针对典型组网雷达系统,探明了转发延迟误差与欺骗干扰效果的影响规律。无人机抖动误差是指无人机飞行过程中受气动因素、电子因素和机械因素等影响产生的误差。雷达站址误差是指通过电子侦察等手段获取的雷达站址受我方雷达定位精度、敌方雷达干扰、环境因素等影响产生的误差。Liu等^[22]提出了一种存在无人机抖动误差和雷达站址误差时的虚假航迹偏差补偿方法,该方法能有效地降低虚假航迹的识别率。王国宏等^[23]研究了雷达站址误差对航迹欺骗干扰的影响,得出此影响随着飞行器与雷达站之间的距离增大而降低的结论,这对开展雷达网航迹欺骗干扰和雷达网抗航迹欺骗干扰的研究有一定的参考价值。本文分别推导了在保证对敌方组网雷达成功欺骗的前提下所允许的最大雷达站址误差和无人机抖动误差,并给出了降低误差来改善航迹欺骗效果的建议。

1 组网雷达航迹欺骗原理

1.1 转发式航迹欺骗干扰

转发式航迹欺骗干扰是常见的欺骗干扰方式之一,本文的误差分析均以转发式航迹欺骗干扰为基础模型展开。无人机利用搭载的DRFM在接收到雷达脉冲后延迟一段时间朝雷达方向发射一个或多个与回波形状相同的干扰脉冲,使雷达接收到一个或多个虚假目标信息。由于无人机自身目标较小,一般可以视作隐身目标,所以雷达只能根据接收到的噪声信号和虚假回波信号计算目标位置,从而被航迹欺骗。图1为转发式航迹欺骗干扰示意图。

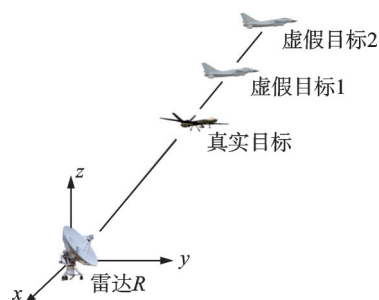


图1 转发式航迹欺骗干扰示意图
Fig.1 Schematic diagram of forwarding track deception jamming

1.2 针对组网雷达的航迹欺骗干扰

雷达分辨率通常包括距离分辨率、速度分辨率和角度分辨率。其中,距离分辨率既是衡量雷达性能的指标,也是评估航迹欺骗干扰效果的关键。距离分辨率是指雷达区分同一方位角上两个相同大小点目标的最小距离,定义为

$$\Delta R = \frac{c}{2B_w} \quad (1)$$

式中: B_w 为脉冲信号带宽, c 为光速。

在组网雷达中,空间分辨单元的定义为各雷达对应距离分辨单元的重叠区域^[24],图2为空间分辨单元(Space resolution cell, SRC)示意图。在组网雷达探测跟踪下,真实目标空间状态与雷达部署位置无关,而虚假目标空间状态由干扰机和雷达部署位置共同决定。因此,在相同坐标系下,各雷达测得的真实目标空间状态基本一致,但测得的虚假目标空间状态存在显著差异。组网雷达在进行信息融合时能够利用真假目标的空间状态差异将假目标识别并剔除。这种假目标识别剔除的思想被称为同源检验^[25]。一般情况下,只需满足生成的虚假目标在雷达探测范围内就能够欺骗单部雷达,相比之下,欺骗组网雷达还需要使虚假目标通过组网雷达的同源检验。

多架无人机协同工作可对组网雷达实施航迹欺骗。理想情

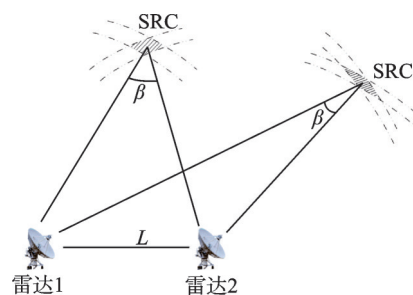


图2 空间分辨单元示意图
Fig.2 Schematic diagram of SRC

况下,无人机集群对组网雷达实施一对一干扰,每个时刻生成的虚假目标汇聚于一点,使之通过组网雷达的同源检验。无人机通过控制飞行轨迹连续生成虚假目标,最终构成欺骗组网雷达的虚假轨迹。

1.3 针对组网雷达航迹欺骗的条件

实际战场环境中,由于存在各种误差,无人机集群实际对组网雷达生成的虚假目标点往往是分散分布的,无法汇聚于一点。因此,成功欺骗组网雷达需要满足一定的条件。

无人机、雷达和对应生成的虚假目标点的空间位置关系如图3所示。假设无人机C与两部雷达的距离为 ρ_i, ρ_j ,无人机对雷达 R_i 生成虚假目标点A,对雷达 R_j 生成虚假目标点B,无人机与两个虚假目标点距离表示为 $\frac{\Delta d}{2}$,两部雷达的距离分辨率分别为 δ_i, δ_j 。

由于组网雷达系统具备同源检验的能力,若虚假目标点A和B之间的距离超出对应雷达的距离分辨率,则两个虚假目标点会因空间状态差异而无法通过同源检验。因此,生成的虚假目标点A和B在同一个SRC内时,无人机才能同时欺骗两部雷达。根据分辨单元的定义可知,若以下两个不等式均成立,则无人机能够成功欺骗两部雷达。

$$\begin{cases} |L_{AR_i} - L_{BR_i}| < \delta_i \\ |L_{AR_j} - L_{BR_j}| < \delta_j \end{cases} \quad (2)$$

式中: $L_{AR_i}, L_{BR_i}, L_{AR_j}$ 和 L_{BR_j} 分别为对应两点间距离; δ_i 和 δ_j 分别表示雷达 R_i 和 R_j 的距离分辨率。

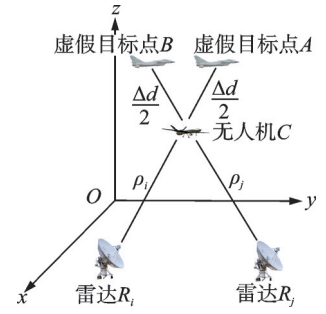


图3 存在误差的组网雷达航迹欺骗示意图

Fig.3 Schematic diagram of network radar track deception with errors

2 组网雷达航迹欺骗雷达站址误差分析

无人机集群实际航迹欺骗组网雷达时,由于受环境噪声、传感器误差和敌方干扰等影响,难以对方雷达位置精确定位,这将导致实际生成的虚假目标点和预设虚假目标点之间发生偏移,使航迹欺骗效果变差。因此,组网雷达的雷达站址误差分析对无人机集群能否成功航迹欺骗敌方组网雷达有着十分重要的意义。

2.1 构建存在雷达站址误差的组网雷达航迹欺骗几何模型

假设有如下场景,空间中分布着 N 部雷达,分别表示为 R_1, R_2, \dots, R_N ;距离分辨率分别表示为 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N$;C为预计生成的假目标点。假设一架无人机欺骗干扰一部雷达,则共有 N 架无人机,分别表示为 A_1, A_2, \dots, A_N ;且每架无人机均位于C和对应雷达的连线上。由于雷达站址误差产生的实际虚假目标点分别表示为 P_1, P_2, \dots, P_N ,实际雷达站址与量测雷达站址之间的误差表示为 e_1, e_2, \dots, e_N ;预计生成的假目标点与对应无人机之间的距离分别为 $\frac{\Delta d_1}{2}, \frac{\Delta d_2}{2}, \dots, \frac{\Delta d_N}{2}$;由于此模型不考虑转发时延误差,所以实际生成的假目标点与对应无人机之间的距离也分别为 $\frac{\Delta d_1}{2}, \frac{\Delta d_2}{2}, \dots, \frac{\Delta d_N}{2}$ 。考虑雷达站址误差的组网雷达航迹欺骗干扰场景如图4所示。

2.2 几何模型求解

为求解图4所示模型,本文对该模型作出如下假设:假设无人机集群位于远场区域,且雷达站址误差远小于无人机与其干扰雷达的距离,即 $\rho_1 \gg e_1, \rho_2 \gg e_2, \dots, \rho_N \gg e_N$,由此,可以对该模型进行简化,令 $\rho_1 = \rho'_1, \rho_2 = \rho'_2, \dots, \rho_N = \rho'_N$ 。

图5为两部雷达的场景。

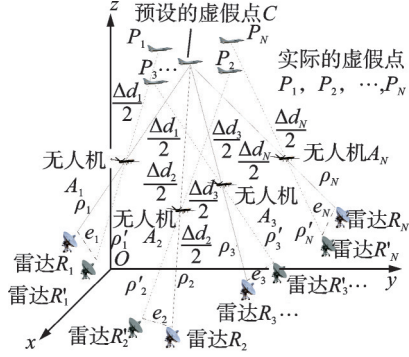


图4 存在雷达站址误差时的组网雷达航迹欺骗场景

Fig.4 Networked radar track spoofing scenario with radar position errors

根据三角形的相似性质,可得

$$\begin{cases} L_{P_1C} = \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \\ L_{P_2C} = \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \end{cases} \quad (3)$$

由三角形三边关系可得

$$|L_{P_1R_1} - L_{P_2R_1}| \leq |L_{P_1P_2}| \leq |L_{P_1C}| + |L_{P_2C}| = \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| \quad (4)$$

由分辨单元定义及对组网雷达航迹欺骗的条件可知,当满足式(5)关系时,两部雷达可以同时被航迹欺骗。

$$\left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| \leq \delta_1 \quad (5)$$

根据以上分析,当雷达数量为 N 部,即图4所示情形时,可得

$$\begin{cases} |L_{P_1R_1} - L_{P_2R_1}| \leq |L_{P_1P_2}| \leq \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| \\ |L_{P_1R_1} - L_{P_3R_1}| \leq |L_{P_1P_3}| \leq \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_3 e_3}{2\rho_3} \right| \\ \vdots \\ |L_{P_1R_1} - L_{P_NR_1}| \leq |L_{P_1P_N}| \leq \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_N e_N}{2\rho_N} \right| \\ |L_{P_2R_1} - L_{P_3R_1}| \leq |L_{P_2P_3}| \leq \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| + \left| \frac{\Delta d_3 e_3}{2\rho_3} \right| \\ |L_{P_2R_1} - L_{P_4R_1}| \leq |L_{P_2P_4}| \leq \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| + \left| \frac{\Delta d_4 e_4}{2\rho_4} \right| \\ \vdots \\ |L_{P_{N-1}R_1} - L_{P_NR_1}| \leq |L_{P_{N-1}P_N}| \leq \left| \frac{\Delta d_{N-1} e_{N-1}}{2\rho_{N-1}} \right| + \left| \frac{\Delta d_N e_N}{2\rho_N} \right| \end{cases} \quad (6)$$

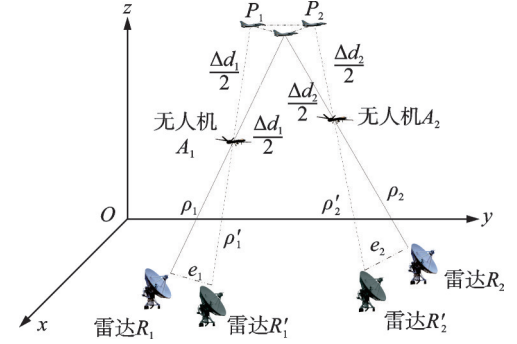


图5 两部雷达存在站址误差时航迹欺骗场景

Fig.5 Track deception scenario for two radars with position errors

由多站雷达被航迹欺骗的条件可得,当雷达站址误差满足式(7)时,雷达 R_1 一定可以被欺骗。

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| \leq \delta_1 \\ \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_3 e_3}{2\rho_3} \right| \leq \delta_1 \\ \vdots \\ \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{2\rho_1} \right| + \left| \frac{\Delta d_N e_N}{2\rho_N} \right| \leq \delta_1 \\ \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| + \left| \frac{\Delta d_3 e_3}{2\rho_3} \right| \leq \delta_1 \\ \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{2\rho_2} \right| + \left| \frac{\Delta d_4 e_4}{2\rho_4} \right| \leq \delta_1 \\ \vdots \\ \left| \frac{\Delta d_{N-1} e_{N-1}}{2\rho_{N-1}} \right| + \left| \frac{\Delta d_N e_N}{2\rho_N} \right| \leq \delta_1 \end{array} \right. \quad (7)$$

对式(7)各式求和可得

$$\frac{\Delta d_1 e_1}{\rho_1} + \frac{\Delta d_2 e_2}{\rho_2} + \dots + \frac{\Delta d_N e_N}{\rho_N} \leq N\delta_1 \quad (8)$$

由式(7,8)可解得

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\Delta d_1 e_1}{\rho_1} \right| \leq \delta_1 \\ \left| \frac{\Delta d_2 e_2}{\rho_2} \right| \leq \delta_1 \\ \vdots \\ \left| \frac{\Delta d_N e_N}{\rho_N} \right| \leq \delta_1 \end{array} \right. \quad (9)$$

由式(9)解得

$$\left\{ \begin{array}{l} |e_1| \leq \frac{\rho_1 \delta_1}{\Delta d_1} \\ |e_2| \leq \frac{\rho_2 \delta_1}{\Delta d_2} \\ \vdots \\ |e_N| \leq \frac{\rho_N \delta_1}{\Delta d_N} \end{array} \right. \quad (10)$$

对于雷达 $R_i(i=2,3,\dots,N)$ 而言,雷达站址误差的解与式(10)形式相同。设 δ_{\min} 为组网雷达最小距离分辨率,表示为

$$\delta_{\min} = \min\{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N\} \quad (11)$$

则在整个存在雷达站址误差的组网雷达场景下实现航迹欺骗的充分不必要条件为

$$|e_k| \leq \frac{\rho_k \delta_{\min}}{\Delta d_k} \quad k \in \mathbf{N}^+ \quad (12)$$

式中: e_k 为第 k 个雷达站址的误差, ρ_k 为第 k 架无人机与其干扰雷达的距离, Δd_k 为第 k 架无人机对其干扰雷达产生的欺骗距离误差, \mathbf{N}^+ 表示正整数集。

由式(12)可以看出, 无人机与雷达距离越大, 欺骗距离越小, 最小雷达距离分辨率数值越大, 对应能够成功实现航迹欺骗所允许的雷达站址误差范围也越大。此外, 当无人机与量测所得的雷达位置固定、欺骗距离固定及组网雷达的距离分辨率固定时, 对应的雷达站址误差范围也就相对固定。如果实际雷达位置在式(12)范围内, 则无人机集群可以成功欺骗组网雷达; 反之, 无人机集群对组网雷达的航迹欺骗效果则需要采取其他方法来评估。

3 组网雷达航迹欺骗无人机抖动误差分析

无人机集群在实际战场中对敌方组网雷达执行航迹欺骗任务时, 由于受气流、控制系统和负载不平衡等因素影响, 无人机集群飞行过程中会发生抖动, 偏离预设的位置, 从而使实际生成的虚假航迹点偏离预设的虚假航迹点, 影响最终的航迹欺骗效果。因此, 无人机集群的抖动误差对于评估和改善组网雷达航迹欺骗效果也具有重要意义。

假设由于无人机抖动误差产生的实际虚假目标点分别为 Q_1, Q_2, \dots, Q_N , 无人机集群抖动误差表示为 e_1, e_2, \dots, e_N , 其余参量与雷达站址误差分析中的参量一致。考虑无人机抖动误差的组网雷达航迹欺骗场景如图6所示。为求解 N 架无人机抖动误差模型, 先分析2架无人机存在抖动误差的场景, 如图7所示。

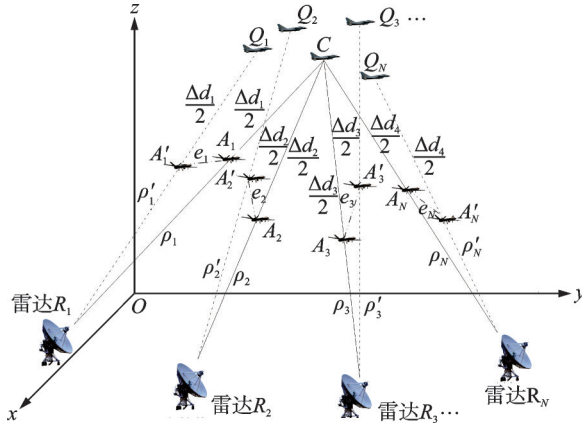


图6 存在无人机抖动误差的组网雷达航迹欺骗场景

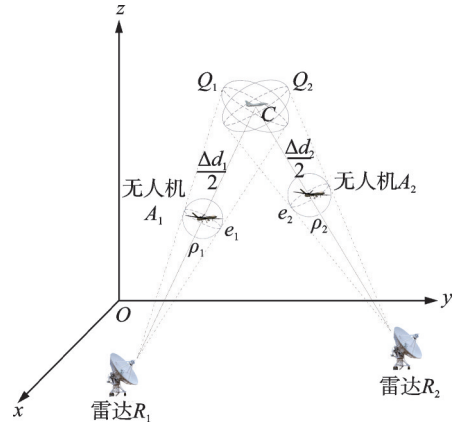


图7 两架无人机存在抖动误差时航迹欺骗场景

Fig.6 Networked radar track deception scenario with UAV jitter errors Fig.7 Track deception scenario for two UAVs with jitter errors

根据几何关系可知, 以无人机 A_1 为例, 无人机抖动误差导致实际的无人机位置在以预设位置为中心, 以抖动误差 e_1 为半径的球面上运动, 由于欺骗距离相同, 实际生成的虚假目标点在一个以预设虚假

目标点为中心, 长轴为 $\frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1$, 短轴为 e_1 的椭球面上运动。

因此, 每架无人机由于抖动误差而生成的实际虚假目标点在各自的椭球面上运动, 将椭球面的长轴记作 a_1, a_2, \dots, a_N , 那么, 任意两个椭球面上的点间的距离需满足小于它们的长轴之和, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} |L_{Q_1 R_1} - L_{Q_2 R_1}| \leq |L_{Q_1 Q_2}| \leq a_1 + a_2 \\ |L_{Q_1 R_1} - L_{Q_3 R_1}| \leq |L_{Q_1 Q_3}| \leq a_1 + a_3 \\ \vdots \\ |L_{Q_1 R_1} - L_{Q_N R_1}| \leq |L_{Q_1 Q_N}| \leq a_1 + a_N \\ |L_{Q_2 R_1} - L_{Q_3 R_1}| \leq |L_{Q_2 Q_3}| \leq a_2 + a_3 \\ |L_{Q_2 R_1} - L_{Q_4 R_1}| \leq |L_{Q_2 Q_4}| \leq a_2 + a_4 \\ \vdots \\ |L_{Q_{N-1} R_1} - L_{Q_N R_1}| \leq |L_{Q_{N-1} Q_N}| \leq a_{N-1} + a_N \end{array} \right. \quad (13)$$

由多站雷达被航迹欺骗的条件可知,当无人机抖动误差满足式(14)时,雷达 R_1 一定可以被欺骗。

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 + a_2 = \left| \frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1 \right| + \left| \frac{\rho_2 + \frac{\Delta d_2}{2}}{\rho_2} e_2 \right| \leq \delta_1 \\ a_1 + a_3 = \left| \frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1 \right| + \left| \frac{\rho_3 + \frac{\Delta d_3}{2}}{\rho_3} e_3 \right| \leq \delta_1 \\ \vdots \\ a_1 + a_N = \left| \frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1 \right| + \left| \frac{\rho_N + \frac{\Delta d_N}{2}}{\rho_N} e_N \right| \leq \delta_1 \\ a_2 + a_3 = \left| \frac{\rho_2 + \frac{\Delta d_2}{2}}{\rho_2} e_2 \right| + \left| \frac{\rho_3 + \frac{\Delta d_3}{2}}{\rho_3} e_3 \right| \leq \delta_1 \\ a_2 + a_4 = \left| \frac{\rho_2 + \frac{\Delta d_2}{2}}{\rho_2} e_2 \right| + \left| \frac{\rho_4 + \frac{\Delta d_4}{2}}{\rho_4} e_4 \right| \leq \delta_1 \\ \vdots \\ a_{N-1} + a_N = \left| \frac{\rho_{N-1} + \frac{\Delta d_{N-1}}{2}}{\rho_{N-1}} e_{N-1} \right| + \left| \frac{\rho_N + \frac{\Delta d_N}{2}}{\rho_N} e_N \right| \leq \delta_1 \end{array} \right. \quad (14)$$

对式(14)各式求和可得

$$\left| \frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1 \right| + \left| \frac{\rho_2 + \frac{\Delta d_2}{2}}{\rho_2} e_2 \right| + \dots + \left| \frac{\rho_N + \frac{\Delta d_N}{2}}{\rho_N} e_N \right| \leq \frac{N}{2} \delta_1 \quad (15)$$

由式(14,15)可解得

$$\left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\rho_1 + \frac{\Delta d_1}{2}}{\rho_1} e_1 \right| \leq \frac{\delta_1}{2} \\ \left| \frac{\rho_2 + \frac{\Delta d_2}{2}}{\rho_2} e_2 \right| \leq \frac{\delta_1}{2} \\ \vdots \\ \left| \frac{\rho_N + \frac{\Delta d_N}{2}}{\rho_N} e_N \right| \leq \frac{\delta_1}{2} \end{array} \right. \quad (16)$$

由式(16)解得

$$\left\{ \begin{array}{l} |e_1| \leq \frac{\rho_1 \delta_1}{2\rho_1 + \Delta d_1} \\ |e_2| \leq \frac{\rho_2 \delta_1}{2\rho_2 + \Delta d_2} \\ \vdots \\ |e_N| \leq \frac{\rho_N \delta_1}{2\rho_N + \Delta d_N} \end{array} \right. \quad (17)$$

对于雷达 $R_i (i = 2, 3, \dots, N)$, 无人机抖动误差的解与式(17)形式相同, 则在整个存在无人机抖动误差的组网雷达场景下实现航迹欺骗的充分不必要条件为

$$|e_k| \leq \frac{\rho_k \delta_{\min}}{2\rho_k + \Delta d_k} \quad k \in \mathbf{N}^+ \quad (18)$$

式中: e_k 为第 k 架无人机的抖动误差, ρ_k 为第 k 架无人机与其干扰雷达的距离, Δd_k 为第 k 架无人机对其干扰雷达产生的欺骗距离误差, δ_{\min} 为组网雷达中最小距离分辨率。

由式(18)可以看出, 无人机与雷达距离越大, 欺骗距离越小, 最小雷达距离分辨率越大, 对应能够成功实现航迹欺骗所允许的无人机抖动误差范围也越大。此外, 当无人机与量测所得的雷达位置固定, 欺骗距离固定, 组网雷达的距离分辨率固定时, 对应的无人机抖动误差范围也就相对固定。如果实际无人机抖动在式(18)范围内, 则无人机集群可以成功欺骗组网雷达, 反之, 无人机集群对组网雷达的航迹欺骗效果则需要采取其他方法来评估。

以上结论与雷达站址误差分析得出的结论非常相似, 两者结合起来分析, 结论如下: 由于组网雷达的最小距离分辨率一般不变, 因此在保证无人机集群对组网雷达成功欺骗的条件下, 若想要提高雷达站址误差和无人机抖动误差范围, 可以通过增加无人机与雷达的距离或者减小欺骗距离来实现。

4 数值仿真与分析

4.1 雷达站址误差数值仿真与分析

为了验证雷达站址误差分析中推导的正确性, 进行以下验证分析。

假设组网雷达由 3 部雷达构成, 即图 4 中 $N = 3$ 的场景。组网雷达的最小分辨率为 $\delta_{\min} = \min\{\delta_{R_1}, \delta_{R_2}, \delta_{R_3}\}$, 雷达 R_1 的站址误差 e_1 为 y 轴方向上的误差, 雷达 R_2 的站址误差为 x 轴方向上的误差,

雷达 R_3 的站址误差 e_3 为绕 x 轴 60° 方向上的误差。由多站雷达被航迹欺骗的条件可知,当式(19)成立时,组网雷达可以被成功欺骗。

$$\begin{cases} L_{P_1P_2} \leq \delta_{\min} \\ L_{P_1P_3} \leq \delta_{\min} \\ L_{P_2P_3} \leq \delta_{\min} \end{cases} \quad (19)$$

雷达、无人机和预设虚假目标点坐标参数如表1所示。在不同的雷达站址误差下,实际虚假目标点间的距离 $L_{P_1P_3}$ 、 $L_{P_2P_3}$ 、 $L_{P_1P_2}$ 如图8~10所示。组网雷达的最小距离分辨率取 $\delta_{\min} = 200 \text{ m}$ 时,由式(10)可算得雷达站址误差的范围为 $e_1 \leq 566.7 \text{ m}$ 、 $e_2 \leq 300 \text{ m}$ 、 $e_3 \leq 185.7 \text{ m}$,即雷达1、雷达2、雷达3的站址误差分别控制在 566.7 、 300 、 185.7 m 内时,式(19)成立,组网雷达可成功被欺骗。从仿真结果可以看出,3部雷达的站址误差控制在上述范围内时,对应产生的实际虚假目标点间的距离小于 200 m ,在组网雷达的空间分辨单元内,上述推导得到验证。

表1 坐标参数

Table 1 Coordinate parameter

名称	位置/km
雷达 R_1	(0,0,0)
雷达 R_2	(8,6,0)
雷达 R_3	(14,20,0)
无人机 A_1	(4.25,10.20,17.00)
无人机 A_2	(5.75,10.50,15.00)
无人机 A_3	(8.15,14.80,13.00)
设计的虚假目标点 C	(5,12,20)

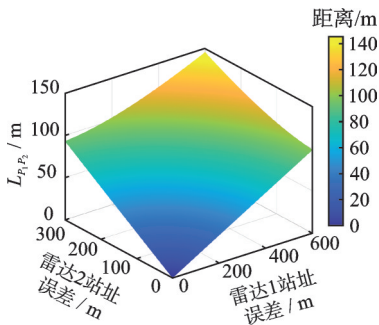


图8 生成虚假目标点 P_1 、 P_2 的距离
Fig.8 Distance between the generated fake target points P_1 and P_2

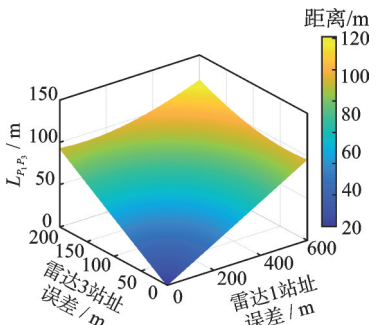


图9 生成虚假目标点 P_1 、 P_3 的距离
Fig.9 Distance between the generated fake target points P_1 and P_3

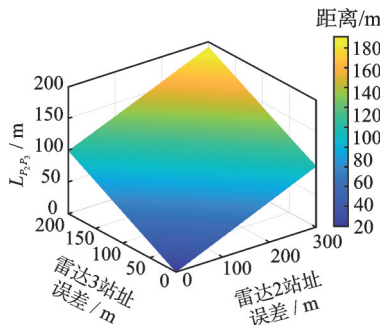


图10 生成虚假目标点 P_2 、 P_3 的距离
Fig.10 Distance between the generated spurious target points P_2 and P_3

由上述仿真结果也可以得出以下结论:当组网雷达的最小距离分辨率越大时,成功欺骗组网雷达所允许的雷达站址误差也越大。由于误差推导过程中,采取了近似分析,故从仿真结果可以看出,超出误差范围时,仍然存在成功欺骗组网雷达的可能,这说明雷达站址误差控制在推导范围内时,能够对组网雷达进行航迹欺骗。

为了进一步验证推导结果,当雷达站址误差取最大值 566.7 、 300 、 185.7 m 时,在每个雷达由站址误差构成的圆上等间隔取 30 个点,计算对应每两个雷达生成的虚假航迹点间的距离,结果如图11~13所示。

由图11~13可知,当雷达站址误差取最大值时,实际生成的虚假目标点之间的距离始终小于所设组网雷达最小距离分辨率 200 m ,进一步验证了本文雷达站址误差推导的正确性,即当雷达站址误差控制在一定范围内时,可以对组网雷达成功进行航迹欺骗。

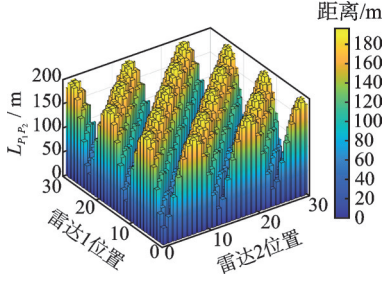


图 11 雷达 1、2 站址误差最大时生成虚
假目标点间的距离
Fig.11 Distance between generated
fake target points with the
maximized position error of
radar 1 and radar 2

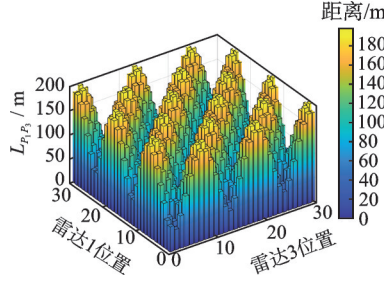


图 12 雷达 1、3 站址误差最大时生成
虚假目标点间的距离
Fig.12 Distance between generated
fake target points with the
maximized position error of
radar 1 and radar 3

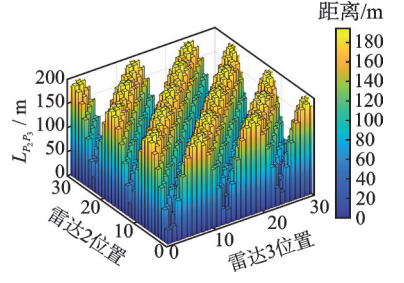


图 13 雷达 2、3 站址误差最大时生成
虚假目标点间的距离
Fig.13 Distance between generated
fake target points with the
maximized position error of
radar 2 and radar 3

4.2 无人机抖动误差数值仿真与分析

为了验证无人机抖动误差分析中推导的正确性,进行以下仿真分析。

设置仿真场景为:组网雷达由 3 部雷达构成,即图 6 中 $N=3$ 的场景。组网雷达的最小分辨率为 $\delta_{\min} = \min\{\delta_{R_1}, \delta_{R_2}, \delta_{R_3}\}$,无人机 A_1 的抖动误差 e_1 为水平角 30° ,俯仰角 60° 上的误差,无人机 A_2 的抖动误差 e_2 为水平角 120° ,俯仰角 225° 上的误差,无人机 A_3 的抖动误差 e_3 为水平角 45° ,俯仰角 135° 上的误差。坐标参数设置与雷达站址误差分析一致。由多站雷达被航迹欺骗的条件可知,当式(20)成立时,组网雷达可以被成功欺骗。

$$\begin{cases} L_{Q_1Q_2} \leq \delta_{\min} \\ L_{Q_1Q_3} \leq \delta_{\min} \\ L_{Q_2Q_3} \leq \delta_{\min} \end{cases} \quad (20)$$

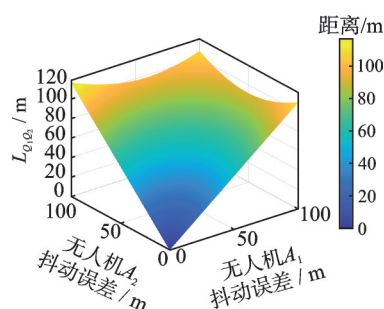
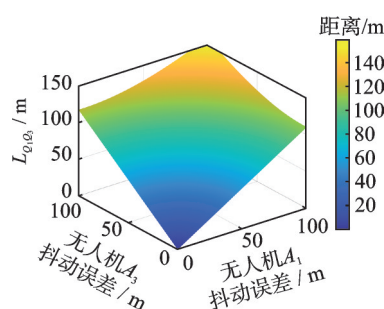
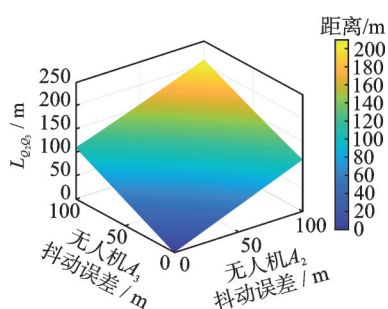
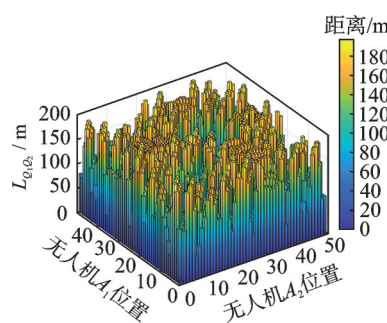
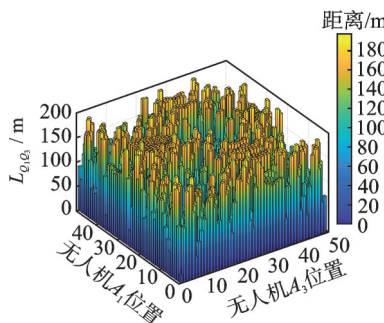
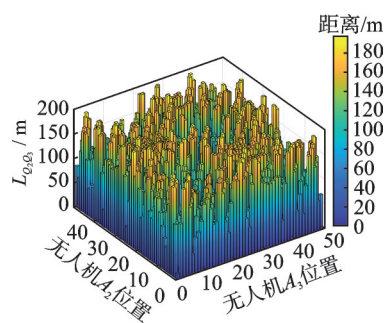
在不同的无人机抖动误差下,实际虚假目标点间的距离分别为 $L_{Q_1Q_2}$ 、 $L_{Q_1Q_3}$ 和 $L_{Q_2Q_3}$,如图 14~16 所示。由计算结果可以看出,在不考虑转发时延误差、雷达站址误差的情况下,当无人机抖动误差发生变化时,实际生成的虚假目标点之间的距离也不同,当组网雷达量测位置、无人机集群位置和欺骗距离一定时,无人机抖动误差决定能否成功欺骗组网雷达。

由图 14~16 可知,当无人机抖动误差取最大值时,实际生成的虚假目标点之间的距离始终小于所设组网雷达最小距离分辨率 200 m,进一步验证了本文无人机抖动误差推导的正确性,即当无人机抖动误差控制在一定范围内时,可以对组网雷达成功进行航迹欺骗。

组网雷达的最小距离分辨率取 $\delta_{\min} = 200$ m 时,由式(17)可算得无人机抖动误差的范围为 $e_1 \leq 85$ m, $e_2 \leq 75$ m, $e_3 \leq 65$ m,即无人机 A_1 、 A_2 和 A_3 的抖动误差分别控制在 85 m、75 m 和 65 m 内时,式(20)成立,组网雷达可成功被欺骗。从仿真结果可以看出,无人机 A_1 、 A_2 和 A_3 的抖动误差在 85 m、75 m 和 65 m 内时,对应产生的实际虚假目标点间的距离小于 200 m,在组网雷达的空间分辨单元内,上述推导得到验证。

由上述仿真结果也可以得出以下结论:当组网雷达的最小距离分辨率越大时,成功欺骗组网雷达所允许的无人机抖动误差也越大。超出误差范围时,仍然存在成功欺骗组网雷达的可能性,这说明无人机抖动误差控制在推导范围内时,能够对组网雷达进行航迹欺骗。

为了进一步验证推导结果,当无人机抖动误差分别取最大值 85、75 和 65 m 时,在每架无人机由抖动误差构成的球面上取 50 个点,计算每两架无人机生成的虚假航迹点之间的距离,结果如图 17~19 所示。

图14 生成虚假目标点 Q_1 、 Q_2 的距离图15 生成虚假目标点 Q_1 、 Q_3 的距离图16 生成虚假目标点 Q_2 、 Q_3 的距离Fig.14 Distance between the generat-
ed fake target points Q_1 and Q_2 Fig.15 Distance between the generat-
ed fake target points Q_1 and Q_3 Fig.16 Distance between the generat-
ed fake target points Q_2 and Q_3 图17 无人机 A_1 、 A_2 抖动误差取最大
时生成虚假目标点间的距离Fig.17 Distance between the gener-
ated fake target points with
the maximized jitter errors of
UAVs A_1 and A_2 图18 无人机 A_1 、 A_3 抖动误差取最大
时生成虚假目标点间的距离Fig.18 Distance between the gener-
ated fake target points with
the maximized jitter errors of
UAVs A_1 and A_3 图19 无人机 A_2 、 A_3 抖动误差取最大
时生成虚假目标点间的距离Fig.19 Distance between the gener-
ated fake target points with
the maximized jitter errors of
UAVs A_2 and A_3

5 结束语

航迹欺骗是对抗组网雷达侦测跟踪的有效方法之一,但实际战场环境中误差无法避免,要确保实际生成的虚假航迹点在同一个空间分辨单元内才能成功欺骗组网雷达。本文针对无人机集群欺骗组网雷达的雷达站址误差和无人机抖动误差进行分析研究,利用简化后的几何模型推导出成功欺骗组网雷达时两种误差的边界条件。此外,本文经过推导分析得到了在保证无人机集群对组网雷达成功欺骗的条件下,通过增加无人机与雷达的距离或减小欺骗距离来提高雷达站址误差和无人机抖动误差范围的规律。数值仿真分析证明了模型假设和公式推导的有效性和准确性。本研究对实际战场中优化航迹欺骗效果具有一定意义,并为进一步的相关研究提供了思路。

参考文献:

- [1] YANG C, FENG L, ZHANG H, et al. A novel data fusion algorithm to combat false data injection attacks in networked radar systems[J]. IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks, 2018, 4(1): 125-136.
- [2] 兰俊杰, 陈蓓, 徐廷新. 组网雷达发展现状及其干扰技术[J]. 飞航导弹, 2009(12): 39-41.
LAN Junjie, CHEN Bei, XU Tingxin. Development status of networked radar and its jamming technology[J]. Flying Missile, 2009 (12): 39-41.

- [3] 张养瑞. 对雷达网的多机伴随式协同干扰技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
ZHANG Yangrui. Research on key technologies of cooperative ECM in multi-syndrome jammers for countering radar net[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [4] 任鑫. 基于多无人机的组网雷达欺骗干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
REN Xin. Research on deception of radar network using multiple electronic combat air vehicles[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [5] 赵珊珊, 张林让, 李强, 等. 分布式多站雷达转发式欺骗干扰研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 138-143.
ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, LI Qiang, et al. Research on repeater jamming against distributed multiple-radar system [J]. 2017, 39(1): 138-143.
- [6] 吴亿锋, 王彤, 吴建新, 等. 基于广义旁瓣相消的机载雷达抗密集转发式干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1049-1054.
WU Yifeng, WANG Tong, WU Jianxin, et al. A method to suppress dense repeater jamming for airborne radar based on generalized sidelobe canceller[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(5): 1049-1054.
- [7] 吴玉清. 针对组网雷达的电子干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
WU Yuqing. Aiming at the netted radar electronic interference technology research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [8] 吕炫. 面向雷达网的无人载体协同干扰策略与技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
LV Xuan. Research on unmanned carrier cooperative jamming strategy and technology for radar network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [9] 郭文元. 针对组网雷达的协同干扰技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021.
GUO Wenyuan. Research on cooperative jamming technology for netted radar[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021.
- [10] 陈保亮. 多无人机对组网雷达系统的航迹欺骗干扰研究[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11): 89-92, 166.
CHEN Baoliang. Research on track deception jamming against networked radar systems by multiple UAVs[J]. Shipboard Electronic Engineering, 2019, 39(11): 89-92, 166.
- [11] FAN Z, GAO X, JIN Y, et al. Research on route planning of group UAV cooperation for deception jamming to radar network [C]//Proceedings of 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chongqing, China: IEEE, 2020: 1966-1969.
- [12] ZHAO Z C, WANG X S, XIAO S P. Cooperative deception jamming against radar network using a team of UAVs[C]//Proceedings of 2009 IET International Radar Conference. Guilin, China: IET, 2009: 1-4.
- [13] OUYANG Z, XU C, FENG J, et al. Research on method of phantom track generation based on cooperative control of UAVs [C]//Proceedings of Computing, Proceedings of Communications and IoT Applications (ComComAp). Shenzhen, China: IEEE, 2019: 405-410.
- [14] XU Y, BASSET G. Virtual motion camouflage based phantom track generation through cooperative electronic combat air vehicles[C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference. Baltimore, USA: IEEE, 2010: 5656-5661.
- [15] PURVIS K B, ASTROM K J, KHAMMASH M. Online control strategies for highly coupled cooperative UAVs[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA: IEEE, 2007: 3961-3966.
- [16] PURVIS K B, CHANDLER P R. A review of recent algorithms and a new and improved cooperative control design for generating a phantom track[C]//Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York, USA: IEEE, 2007: 3252-3258.
- [17] 蒋雪琴, 罗乐. 雷达组网电子干扰技术在航迹欺骗中的应用[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(6): 106-108.
JIANG Xueqin, LUO Le. The application of electronic jamming technology in radar netting[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(6): 106-108.
- [18] 李松, 李佳琦, 王博文, 等. 无人机辅助空中计算的轨迹和功率联合优化方法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(6): 2480-2487.
LI Song, LI Jiaqi, WANG Bowen, et al. A joint optimization method for trajectory and power of unmanned aerial vehicle assisted over-the-air computation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(6): 2480-2487.
- [19] RAO B, GU Z, NIE Y. Deception approach to track-to-track radar fusion using noncoherent dual-source jamming[J]. IEEE

Access, 2020, 8: 50843-50858.

- [20] 赵艳丽, 王雪松, 王国玉, 等. 多假目标欺骗干扰下组网雷达跟踪技术[J]. 电子学报, 2007, 35(3): 454-458.
ZHAO Yanli, WANG Xuesong, WANG Guoyu, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range-false-target deception jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(3): 454-458.
- [21] 时晨光, 闻雯, 宋海伟, 等. 针对组网雷达的无人机集群转发式欺骗干扰时延误差研究[J]. 航空兵器, 2024, 2: 131-137.
SHI Chenguang, WEN Wen, SONG Haiwei, et al. Research on delay error of UAV swarm repeater deception jamming against networked radar[J]. Aviation Weaponry, 2024, 2: 131-137.
- [22] LIU X, LI D. A three-dimensional phantom track generation for radar network deception[J]. IEEE Access, 2019(7): 27288-27301.
- [23] 王国宏, 杨忠, 吴健平. 雷达站站址误差对多机协同航迹欺骗干扰的影响分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2015, 30(6): 501-504, 510.
WANG Guohong, YANG Zhong, WU Jianping. Influence analysis of radar location error on multi-aircraft cooperative track deception[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2015, 30(6): 501-504, 510.
- [24] CHERNYAK V S. Fundamentals of multisite radar systems: Multistatic radars and multi-radar systems[M]. London, UK: CRC Press, 1998: 154-159.
- [25] 柏鹏, 王玉冰, 梁晓龙, 等. 无人机对雷达组网航迹欺骗综述[J]. 航空学报, 2020, 41(10): 6-21.
BAI Peng, WANG Yubing, LIANG Xiaolong, et al. Phantom track deception against radar networks using UAVs: Review[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): 6-21.

作者简介:



蒋泽宇(1999-),男,硕士研究生,研究方向:无人机集群航迹欺骗, E-mail: 617220410@qq.com。



时晨光(1989-),通信作者,男,副教授,博士生导师,研究方向:射频隐身技术,组网雷达资源管理、分布式信息融合, E-mail: scg_space@163.com。



周建江(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向:飞机射频隐身技术、雷达目标特性分析及阵列信号处理等, E-mail: zjjee@nuaa.edu.cn。



闻雯(2000-),男,硕士研究生,研究方向:无人机集群航迹规划、飞行器射频隐身技术, E-mail: wen_wen@nuaa.edu.cn。

(编辑:陈琚)