

## 多无人机对组网雷达的协同干扰

组网雷达系统是应用两部或两部以上空间位置互相分离而覆盖范围互相重叠的雷达的观测或判断来实施搜索、跟踪和识别目标的系统，综合应用了多种抗干扰措施，具有较强的抗干扰能力，因而在军事中得到了广泛应用。如何对组网雷达实施行之有效的干扰，是当今电子对抗界面临的一个重大问题。

诸多干扰方式中较为有效的是欺骗干扰，包括距离欺骗、角度欺骗、速度欺骗以及多参数欺骗等。本赛题只考虑距离假目标欺骗，其基本原理如图 1 所示，干扰机基于侦察到的敌方雷达发射电磁波的信号特征，对其进行相应处理后，延迟（或超前）一定时间后再发射出去，使雷达接收到一个或多个比该目标真实距离靠后（或靠前）的回波信号。

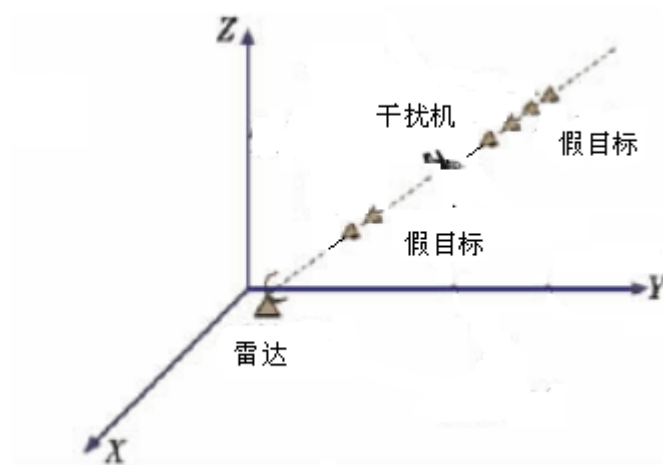


图 1 对雷达实施距离多假目标欺骗干扰示意图

在组网雷达探测跟踪下，真目标和有源假目标在空间状态（如位置、速度等）上表现出显著的差异：对于真目标，其空间状态与雷达部署位置无关，在统一坐标系中，各雷达探测出的真目标空间状态是基本一致的，可以认为它们是源自于同一个目标（同源）；对于有源假目标，它们存在于雷达与干扰机连线以及延长线上，其空间状态由干扰机和雷达部署位置共同决定，不同雷达量测到的有源假目标的空间状态一般是不一致的，有理由认为其来自于不同目标（非同源），利用这种不一致性就可以在组网雷达信息融合中心将假目标有效剔除。这种利用真

假目标在组网雷达观测下的空间状态差异来进行假目标鉴别的思想简称为“同源检验”，它是组网雷达对真假目标甄别的理论依据。

为了能对组网雷达实施有效干扰，现在可利用多架无人机对组网雷达协同干扰。如图 2 所示，无人机搭载的干扰设备对接收到的雷达信号进行相应处理后转发回对应的雷达，雷达接收到转发回的干扰信号形成目标航迹点信息，传输至组网雷达信息融合中心。由于多无人机的协同飞行，因此在融合中心就会出现多部雷达在统一坐标系的同一空间位置上检测到目标信号，基于一定的融合规则就会判断为一个合理的目标航迹点，多个连续的合理目标航迹点就形成了目标航迹，即实现了一条虚假航迹。通过协同控制无人机的飞行航迹，可在敌方的组网雷达系统中形成一条或多条欺骗干扰航迹，迫使敌方加强空情处置，达到欺骗目的。

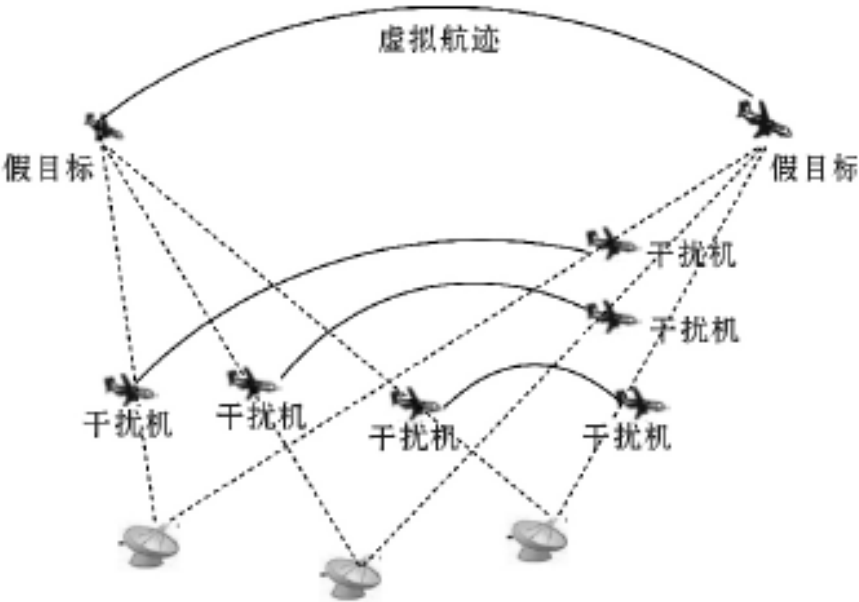


图 2 多无人机协同干扰组网雷达系统示意图

某组网雷达系统由 5 部雷达组成，雷达最大作用距离均为 150km，也就是只能对距雷达 150 km 范围内的目标进行有效检测。5 部雷达的地理位置坐标分别为雷达 1 (80, 0, 0)，雷达 2 (30, 60, 0)，雷达 3 (55, 110, 0)，雷达 4 (105, 110, 0)，雷达 5 (130, 60, 0) (单位：统一为 km)。雷达将检测到的回波信号经过处理后形成航迹点状态信息 (本赛题主要关心目标的空间位置信息) 传输到融合中心，融合中心对 5 部雷达获取的目标状态信息进行“同源检验”，只要有

3 部以上雷达的航迹点状态信息通过了同源检验,即至少有 3 部雷达同一时刻解算出的目标空间位置是相同的,融合中心就将其确定为一个合理的航迹点,20 个连续的经融合中心确认的航迹点形成的合理航迹,将被组网雷达系统视为一条真实的目标航迹。所谓合理的航迹是要满足相应的目标运动规律,无论是运动速度还是转弯半径等均应在合理的范围内。

现考虑多架无人机对组网雷达系统的协同干扰问题。无人机的飞行速度控制在  $120\text{km/h}\sim 180\text{km/h}$ ,飞行高度控制在  $2000\text{m}\sim 2500\text{m}$ ,最大加速度不超过  $10\text{ m/s}^2$ 。由于安全等因素的考虑,无人机间距需控制在  $100\text{ m}$  以上。鉴于无人机的 RCS 较小,也采用了若干隐身技术,在距雷达一定距离飞行时,真实目标产生的回波不能被雷达有效检测(本赛题可不考虑无人机产生的真实目标回波);干扰设备产生的欺骗干扰信号经过了放大增强环节,能保证被雷达有效检测到。每架无人机均搭载有干扰设备,可独立工作。同一时刻一架无人机只能干扰一部雷达,但可在该部雷达接收机终端(雷达屏幕上)产生多个目标点,这些目标点均位于雷达与无人机连线以及延长线上,距雷达距离超过  $150\text{ km}$  的假目标信息直接被雷达系统删除;同一时刻多架无人机可以干扰同一部雷达。雷达同一时刻接收的多个目标点的状态信息均同时传送到信息融合中心。每架无人机不同时刻可干扰不同雷达。同一条航迹不同时刻的航迹点,可以由组网雷达系统中不同的三部雷达检测确定。

请建立相应的数学模型,研究下列问题:

(1) 附件 1 给出了一条拟产生的虚假目标航迹数据,该虚假航迹数据包含 20 个时刻的虚假目标位置坐标信息,时间间隔为 10 秒。为实现较好的干扰效果,现限定每架无人机在该空域均做匀速直线运动,航向、航速和飞行高度可在允许范围内根据需要确定。请讨论如何以最少数量的无人机实现附件 1 要求的虚假目标航迹,具体分析每一架无人机的运动规律和相应的协同策略。

问题(1)的解算结果,需按附件 4 中规定格式具体给出每一架无人机对应时刻的空间位置坐标,存入文件“E 队号\_1.xls”中,作为竞赛附件单独上传竞赛平台,是竞赛论文评审的重要依据。

(2) 对雷达实施有源假目标欺骗干扰时,干扰设备可同时转发多个假目标信息(本赛题限定每一架无人机同一时刻至多产生 7 个假目标信息),但它们均

存在于雷达与无人机连线以及延长线上，延迟（或超前）的时间可根据实际需要确定。该组网雷达系统的每一部雷达的数据更新率为 10 秒（可直观理解为每间隔 10 秒获得一批目标的空间状态数据，无人机转发回对应雷达的假目标信息能及时获取）。协同无人机编队可产生出多条虚假航迹，以实现更好的干扰效果。实际中无人机可机动飞行，但为控制方便，无人机尽可能少做转弯、爬升、俯冲等机动动作，转弯半径不小于 250m。请讨论由 9 架无人机组成的编队在 5 分钟内，完成附件 1 要求的虚假航迹的同时，至多还可产生出多少条虚假的航迹。给出每一架无人机的运动规律，并分析每一条虚假航迹的运动规律和合理性。

问题（2）的解算结果，需按附件 4 中规定的格式具体给出每一架无人机对应时刻的空间位置坐标和每一条虚假航迹的相关数据，存入文件“E 队号\_2.xls”中，作为竞赛附件单独上传竞赛平台。

（3）当组网雷达系统中的某部雷达受到压制干扰或其它因素的干扰时，可能在某些时刻无法正常获取回波信号，此时组网雷达系统信息融合中心可以采用下面的航迹维持策略：若之前与受干扰的雷达联合检测到目标的另 2 部雷达没有受到干扰，正常检测到回波信号，那么在融合中心就对这两部雷达检测的目标航迹点信息进行同源检验，若通过亦视为是合理的目标航迹点；若一条航迹中这类航迹点的个数不超过 3 个时（该航迹的其余航迹点仍需通过前面规定的“同源检验”），该航迹就被继续保留。针对上述航迹维持策略，协同无人机编队的飞行，有可能产生更多的虚假航迹。该组网雷达系统的每一部雷达的数据更新率仍为 10 秒。重新讨论由 9 架无人机组成的编队在 5 分钟内，完成附件 1 要求的虚假航迹的同时，至多还可产生出多少条虚假的航迹。给出每一架无人机的运动规律和协同策略，分析每一条虚假航迹的运动规律和合理性。

附件 1 问题 1 虚假航迹点坐标数据.xls

附件 2 问题 1 的结果.xls

附件 3 问题 2 的结果.xls

附件 4 对问题 1、2 提交结果的规定（**请认真阅读，严格按照要求完成**）