

## 基于无人机协同的航迹欺骗干扰方法研究

郭淑芬, 余国文, 熊鑫, 徐鹏

(空军预警学院, 武汉 430019)

**摘要:**为了有效地对组网雷达实施干扰,根据航迹欺骗干扰原理和无人机任务特点,对无人机实施航迹欺骗干扰模型进行了简化;从几何关系上建立了定高飞行模式下假目标与无人机的运动模型,给出了模型求解流程;最后利用仿真得出了各无人机的运动参数,分析了无人机间协同的速度大小关系。仿真结果验证了这一干扰模型的可行性与有效性。

**关键词:**组网雷达;航迹欺骗;无人机协同

**中图分类号:**TN957

**文献标识码:**A

**文章编号:**2095-5839(2018)01-0044-04

与单部雷达相比,组网雷达的空间覆盖范围更广、目标检测概率更高、电磁频谱覆盖范围更广、抗干扰能力更强,在未来战场上能发挥更大的效能。为提高对组网雷达的干扰效果,已提出了众多新的干扰技术,航迹欺骗干扰就是其中之一。航迹欺骗干扰是指利用多架干扰机同时对雷达网中各部雷达实施互相关联的虚假目标欺骗干扰,通过调整干扰机的航线使各部雷达中形成相关的假目标航迹<sup>[1-2]</sup>。

文献[3]根据单部雷达的多目标航迹欺骗原理,给出了组网雷达的航迹欺骗原理,利用雷达位置的不同和雷达主波束对准干扰机的时间不同,提出了产生具有时间相关性和空间相关性的可控航迹欺骗干扰算法。文献[4]研究了利用多机协同产生具有航迹特征的虚假目标的方法,建立了最优控制模型,采用勒让德伪谱法将其转化为非线性规划问题,利用基于C代码的可行序列二次规划(C code feasible sequential quadratic programming, CFSQF)软件包对最优化问题进行求解,得出了形成虚假目标的多机协同航迹,实现了航迹欺骗干扰。文献[5]建立了飞行器编队的运动模型,分析了多机协同控制产生虚假航迹的原理。针对模型求解问题,给出了约束条件及代价函数,提出最优控制算法求解,通过仿真验证了可行性。文献[6-7]提出了分布优化的干扰航迹数学模型,基于最小可识别概率对假目标航迹进行优化,基于最小推动力对干扰机航迹进行优化,提出了高成功融合概率以及低推动力的代价函数,提高了虚假航迹的干扰成功概率。但以上文献都是基于干扰机和假目标的运动模型,建立

代价函数将其转化为最优控制问题。由于控制模型和约束条件都相当复杂,很难求得解析解,需借助于软件包求解近似值,存在一定的误差,计算量大,难以投入实际应用。为此,本文针对无人机任务过程中的运动特点,提出一种简化模型,可直接求解无人机的运动状态,减少无人机运动状态的控制量,为投入实际设计应用带来了便利。

### 1 干扰机对组网雷达的航迹欺骗原理

利用干扰机对雷达进行航迹欺骗干扰是根据常用脉冲体制雷达的测距原理,干扰机截获雷达发射的脉冲信号,对其进行延时后转发出去,干扰信号从雷达主瓣进入,在雷达上形成假目标点。通过控制假目标相对于雷达脉冲到干扰机的时延,就能在指定位置上产生假目标。每一时刻假目标点都位于雷达与干扰机连线的延长线上,随着干扰机运动,累积的假目标点形成假目标航迹。各架干扰机通过协同控制,使产生的假目标点重合,在不同雷达上显示为同一条航迹,即可成功欺骗组网雷达。

多架干扰机对组网雷达进行欺骗干扰的示意图如图1所示。

由图1可知,完成整个航迹欺骗干扰过程需具备以下4个条件。

1)组网雷达内成员的数量及位置信息已知(可通过事先侦察获得)。干扰机的数量与雷达的数量相等,每部干扰机只对1部雷达实施干扰。

收稿日期: 2018-01-17

作者简介: 郭淑芬(1990-),女,硕士生,主要从事无人机装备理论及其应用研究。

2)每部干扰机能够实时、独立地调整自身飞行航线.各干扰机须互相协同,实时地调整速度和航向,确保能够在规定时间准确飞到预定的位置,使得每部干扰机与对应雷达的连线(延长线)始终相交于一点,才能形成虚假航迹.

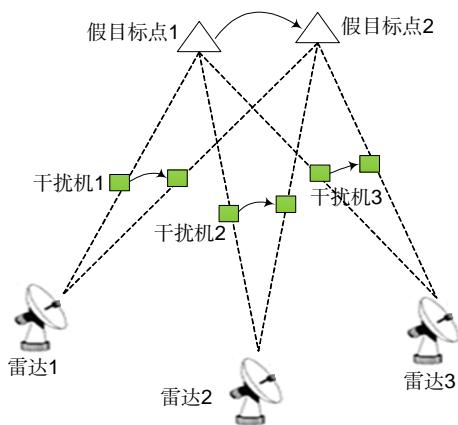


图1 多架干扰机对组网雷达进行欺骗干扰示意图

3)干扰机具备较强隐身能力,不易被组网雷达侦察到.干扰机需具有隐身能力,才能提高干扰的成功率,否则组网雷达将通过假目标和干扰机航迹的相关性(雷达、干扰机和假目标始终在一条直线上)辨别出干扰机和假目标,达不到预期的干扰效果.

4)干扰机具备延时转发信号的能力,且逼真度高,能成功欺骗组网雷达.利用数字射频存储(DRFM)技术可以实现这一目的.通过对截获的微波信号进行采样、量化、存储和重构等一系列处理,可以快速、实时、准确地还原出微波信号.采用DRFM技术生成的干扰信号与截获的雷达信号具有极强的相干性,不仅大大增强了干扰系统的干扰性能,而且提高了干扰的瞬时性和灵活性.实施距离假目标干扰时,干扰机利用DRFM技术对截获的雷达脉冲进行时延、转发,使干扰脉冲与目标回波脉冲处于不同的距离单元,达到距离欺骗的目的<sup>[8-9]</sup>.

无人机因为平台低、慢、小的特点,不易被发现,有利于确保干扰实施过程中的安全,适合执行航迹欺骗干扰任务.无人机执行任务过程中经爬升、巡弋后进入目标区域,利用导引头搜索目标,一旦锁定目标即开始进行干扰.巡弋和搜索阶段是无人机获取情报信息最关键的阶段,一旦被敌方雷达识别,就会遭到攻击.在这两个阶段无人机做定高飞行,图2给出了无人机定高飞行模式下对组网雷达的航迹欺骗干扰示意图.

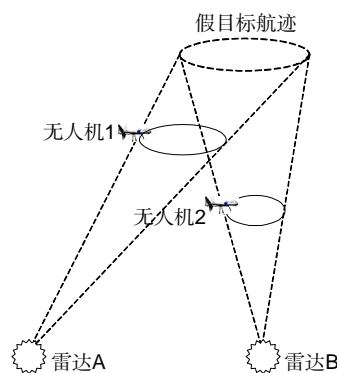


图2 无人机定高飞行模式下对组网雷达的航迹欺骗干扰示意图

## 2 航迹欺骗的数学模型

### 2.1 假目标和无人机的运动模型

在分析多架无人机干扰之前,先对单架无人机干扰模型进行分析.

设雷达坐标为  $(x_r, y_r, z_r)$ ,  $i=p$  时表示假目标,  $i=u_j$  时表示第  $j$  架无人机,  $r_i$  表示  $i$  到雷达的径向距离,  $\theta_i$  表示俯仰角,  $\varphi_i$  表示方位角,  $\beta_i$  为航向角,  $h_i$  表示飞行高度. 直角坐标系下无人机和假目标做定高飞行的运动关系如图3所示.

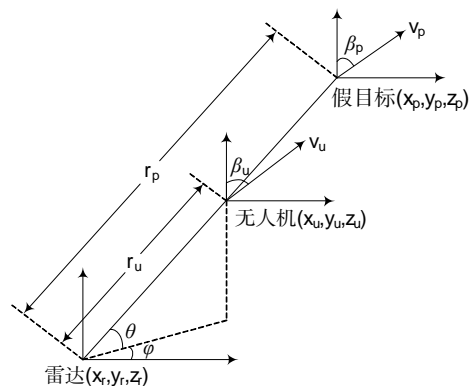


图3 无人机和假目标做定高飞行的运动关系

无人机和假目标做定高飞行的运动模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \sin \beta_i \\ \dot{y}_i &= v_i \cos \beta_i \\ \dot{z}_i &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据球坐标系和直角坐标系的转换关系,将无人机和假目标的运动模型转换到球坐标系下.

已知

$$\left. \begin{aligned} x_i &= r_i \cos \theta \cos \varphi \\ y_i &= r_i \cos \theta \sin \varphi \\ z_i &= r_i \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对式(2)求导,得

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i &= \dot{r}_i \cos \theta \cos \varphi - r_i \dot{\theta} \sin \theta \cos \varphi - r_i \dot{\varphi} \cos \theta \sin \varphi \\ \dot{y}_i &= \dot{r}_i \cos \theta \sin \varphi - r_i \dot{\theta} \sin \theta \sin \varphi + r_i \dot{\varphi} \cos \theta \cos \varphi \\ \dot{z}_i &= \dot{r}_i \sin \theta + r_i \dot{\theta} \cos \theta \end{aligned} \right\} (3)$$

用矩阵表示,有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & -\sin \varphi & -\sin \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi & \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_i \\ r_i \dot{\varphi} \cos \theta \\ r_i \dot{\theta} \end{bmatrix} (4)$$

由式(2)一式(4),可得无人机和假目标在以雷达为原点的球坐标系下的运动模型:

$$\begin{bmatrix} \dot{r}_i \\ r_i \dot{\varphi} \cos \theta \\ r_i \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ -\sin \theta \cos \varphi & -\sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \\ \dot{z}_i \end{bmatrix} (5)$$

将式(1)代入式(5)得

$$\left. \begin{aligned} \dot{r}_i &= v_i \cos \theta \cos \varphi \sin \beta_i + v_i \cos \theta \sin \varphi \cos \beta_i \\ r_i \dot{\varphi} \cos \theta &= -v_i \sin \varphi \sin \beta_i + v_i \cos \varphi \cos \beta_i \\ r_i \dot{\theta} &= -v_i \sin \theta \cos \varphi \sin \beta_i - v_i \sin \theta \sin \varphi \cos \beta_i \end{aligned} \right\} (6)$$

解得无人机和假目标的运动参数:

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta_i &= r_i (\dot{\varphi} \cos \theta \sin \theta \cos \varphi - \dot{\theta} \sin \varphi) / (v_i \sin \theta) \\ v_i &= (\dot{r}_i^2 + (r_i \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + (r_i \dot{\theta})^2)^{1/2} \end{aligned} \right\} (7)$$

设雷达发射周期为  $T_r$ , 光速为  $c$ , 则延时量为

$$\Delta \tau = \begin{cases} 2(r_p - r_u)/c & r_p > r_u \\ T_r + 2(r_p - r_u)/c & r_p < r_u \end{cases} (8)$$

通过控制每架无人机以合适的速度和航向角飞行,在下一时刻继续位于对应雷达和假目标连线上,就能使欺骗干扰产生的假目标具有真实目标的特性.当利用多部无人机协同实施干扰时,需要将假目标的运动模型转换到以不同雷达为中心的球坐标系下,使得各无人机产生的假目标能够重合为一个目标,最终在组网雷达内将显示为同一条航迹.

## 2.2 假目标和无人机的运动关系

由式(7)可知,假目标与无人机的运动状态通过  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$  耦合在一起,先讨论无人机与假目标速度值的关系.

令  $\alpha_j = r_{uj}/r_p = h_{uj}/h_p$  表示第  $j$  架无人机和假目标到雷达的距离的比值.无人机和假目标的速度值的关系为

$$\frac{v_{uj}}{v_p} = \frac{(\dot{r}_{uj}^2 + (r_{uj} \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + (r_{uj} \dot{\theta})^2)^{1/2}}{(\dot{r}_p^2 + (r_p \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + (r_p \dot{\theta})^2)^{1/2}} = \frac{(\alpha_j^2 (\dot{r}_p^2 + (r_p \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + (r_p \dot{\theta})^2))^{1/2}}{(\dot{r}_p^2 + (r_p \dot{\varphi} \cos \theta)^2 + (r_p \dot{\theta})^2)^{1/2}} = \frac{h_{uj}}{h_p} (9)$$

再讨论无人机之间速度值的关系,分别取  $j=m$  和  $j=n$ ,有

$$\frac{v_{u_m}}{v_{u_n}} = \frac{\alpha_m v_p}{\alpha_n v_p} = \frac{h_{u_m}}{h_{u_n}} (10)$$

## 2.3 模型求解

通过几何关系计算  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ ,进而解算出运动参数.

过  $(x_r, y_r, z_r)$  和  $(x_p, y_p, z_p)$  两点的直线方程为

$$\frac{x-x_p}{x_p-x_r} = \frac{y-y_p}{y_p-y_r} = \frac{z-z_p}{z_p-z_r} (11)$$

与平面  $z=h_{uj}$  的交点为

$$\left. \begin{aligned} x_{uj} &= (h_{uj} - z_p)(x_p - x_r)/(z_p - z_r) + x_p \\ y_{uj} &= (h_{uj} - z_p)(y_p - y_r)/(z_p - z_r) + y_p \\ z_{uj} &= h_{uj} \end{aligned} \right\} (12)$$

由图3几何关系可知:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arcsin[(z_i - z_r)/r_i] \\ \varphi &= \arctan[(y_i - y_r)/(x_i - x_r)] \\ \dot{\theta} &= \frac{((x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2)^{1/2} \dot{z}_i - (z_i - z_r)[(x_i - x_r)\dot{x}_i + (y_i - y_r)\dot{y}_i]}{r_i^2} \\ \dot{\varphi} &= \frac{(x_i - x_r)\dot{y}_i + (y_i - y_r)\dot{x}_i}{((x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2)^{1/2}} \end{aligned} \right\} (13)$$

令式(13)的  $i=p$ ,即可根据假目标的航迹求出4个耦合量.无人机架数为  $N$  时,具体模型求解步骤如下.

- 1)通过侦察获取雷达位置信息;
- 2)根据任务计划设定期望假目标的航迹;
- 3)设置  $k=1$ ,求解第1架无人机的运动状态;
- 4)解算式(12)得出无人机的位置;
- 5)解算式(13)得出耦合量  $\theta$ 、 $\varphi$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\dot{\varphi}$ ;
- 6)解算式(7)、式(8)得出航向角、速度、延时量;
- 7)设置  $k=k+1$ ,返回到4),直至  $k>N$  时,干扰结束.

## 3 仿真分析

已知敌方2部雷达的位置坐标为  $(0, 0, 0)$  m、 $(0, 1000, 0)$  m,由2架无人机分别对其进行航迹欺骗干扰.设假目标起始位置为  $(300, 2089, 4000)$  m,航迹为  $\begin{cases} x=300+300t \\ y=100 \cos(0.15\pi(t+1))+2000, 2 \\ z=4000 \end{cases}$  架无人机做定高飞行的高度为  $h_{u_1}=3200$  m,  $h_{u_2}=2500$  m,运行时间为20 s.

图4是2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2架无人机的运动轨迹,继而按上述给出的求解步骤可解算出无人机的运动速度和航向角,如图5所示。

由图5的2架无人机的速度关系可以看出,2架无人机速度的比值等于1.28,与预期的 $\alpha=h_{u_1}/h_{u_2}=3200/2500=1.28$ 一致。2架无人机的速度和航向角变化趋势相同,与假目标一致,表明假目标具有真实的运动特性,不易被雷达识别。2架无人机按设定的速度和航向角飞行,在下一时刻飞到指定的位置,通过距离欺骗干扰产生的假目标点重合,即可对组网雷达进行欺骗干扰,如

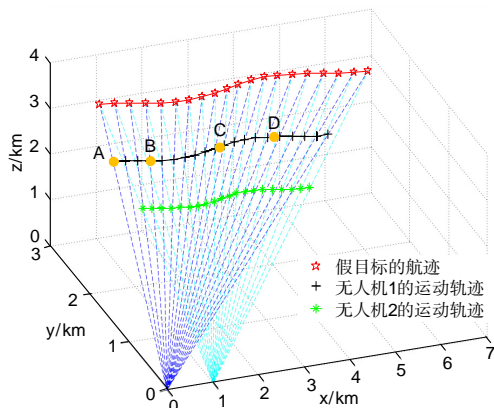
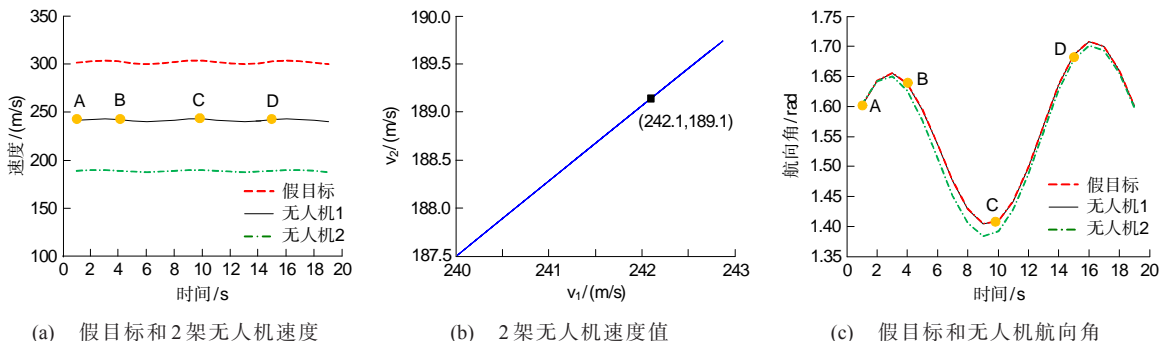


图4 2架无人机干扰2部雷达示意图



(a) 假目标和2架无人机速度

(b) 2架无人机速度值

(c) 假目标和无人机航向角

图5 无人机运动速度和航向角

图6所示。以A、B、C、D4点为例,得出无人机 $u_1$ 的运动参数,如表1所示。

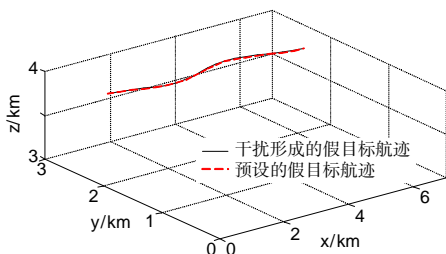


图6 欺骗干扰形成的假目标航迹

表1 无人机 $u_1$ 的运动参数

标注点	距离/m	速度/(m/s)	航向角/rad	时延/ $\mu$ s
A	3618	241.2	1.60	6.03
B	3694	242.1	1.63	6.16
C	4166	242.7	1.41	7.18
D	5094	242.1	1.69	8.49

#### 4 结束语

航迹欺骗干扰是对组网雷达进行有效干扰的典型手段。本文根据无人机协同对组网雷达产生航迹欺骗的原理,从无人机任务过程的特点出发,对产生航迹欺骗干扰的无人机运动模型进行简化,给出了无人机定高飞行条件下假目标、无人机的运动模型和模型求解流程。最后经过

仿真得出了各无人机的运动参数,分析了无人机间协同的速度大小关系,为下一步对组网雷达实施航迹欺骗干扰打下了一定基础。

#### 参考文献:

- [1] 宋济慈.组网雷达仿真与对抗技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2013:1-4.
- [2] 李欣,王春阳.航迹欺骗干扰及其对抗技术的研究现状与发展[J].飞航导弹,2013(8):64-67.
- [3] 周续力,张伟.对组网雷达的多目标航迹欺骗[J].火力与指挥控制,2008,33(6):136-138.
- [4] 李飞,周中良,苟新禹,等.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.
- [5] 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.
- [6] 孙琳,李小波,毛云祥,等.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,2016,31(3):51-54.
- [7] 李小波,孙琳,周青松,等.多机协同的组网雷达欺骗干扰航迹优化[J].现代防御技术,2016,44(6):43-49.
- [8] 李乾.基于DRFM的电子干扰检测与识别算法研究[D].成都:电子科技大学,2016:6-9.
- [9] 朱泽峰,张军,孟凯.基于DRFM的脉冲雷达干扰信号产生方法[J].兵器装备工程学报,2016,37(12):90-94.

(下转第54页)



迷惑性。

2)以间歇采样转发干扰为基础,将间歇采样所得信号直接转发改为与梯形波卷积调制后转发。仿真结果表明,该干扰信号产生了假目标群,每个假目标群中包含2个主假目标,幅度和位置可控的特性对于2个主假目标同样适用。在电子对抗中,可根据对抗态势对干扰信号进行灵活调整。

3)由于干扰信号的延时特性,导致干扰信号滞后于真目标信号,因此下一步将研究如何将真目标信号完全覆盖。

#### 参考文献:

- [1] 李欣,王春阳,原慧,等.雷达灵巧干扰样式建模及仿真研究[J].航天电子对抗,2015,31(5):38-41.
- [2] 来子剑.基于DRFM的脉冲压缩雷达灵巧噪声干扰研究[D].武汉:空军预警学院,2016.34-49.
- [3] 邱杰,邱丽原.灵巧噪声干扰本质及相关基本问题探讨[J].现代防御技术,2012,40(3):132-136.
- [4] 朱剑,沈军,马超,等.对线性调频信号的灵巧噪声干扰设计及仿真[J].制导与引信,2013,34(3):37-40.
- [5] 朱宁龙,刘海亮.移频对卷积调制灵巧噪声干扰的影响研究[J].舰船电子对抗,2016,39(2):17-20.
- [6] 宫健,金虎兵,郭艺奔.一种多域复合调制的雷达灵巧干扰新方法[J].雷达科学与技术,2016,14(2):117-120.
- [7] 金珊珊,王春阳,李欣.基于正弦信号调制的灵巧干扰技术[J].空军工程大学学报(自然科学版),2014,15(5):62-65.
- [8] 袁天,陶建锋,李兴成.基于三角波调制的卷积干扰技术研究[J].测控技术,2017,36(6):42-46.
- [9] 吴筑莉,余国文,熊鑫,等.LFM脉压雷达的间歇采样灵巧噪声转发干扰研究[J].空军预警学院学报,2017,31(5):354-359.
- [10] 王雪松,肖顺平,冯德军,等.现代雷达电子战系统建模与仿真[M].北京:电子工业出版社,2010:148-149.

## A smart interference method based on trapezoidal wave convolution modulation

SHI Zhouyan, WANG Min, ZHANG Lu, MA Linzhi

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** In order to effectively suppress the pulse compression radar, this paper firstly takes linear frequency modulation (LFM) signal as the interference object to make model of the convolution modulation dexterity interference, and presents a clever interference signal based on trapezoidal wave modulation. And then by changing the parameters properly, the paper uses this convolution modulation method for interrupted-sampling repeater jamming and the analysis of the parameters influence. The study results show that changing the parameters of trapezoidal wave helps produce false targets with controllable amplitude and position; application of the convolution modulation technique to the interrupted-sampling and repeater jamming makes generated controllable false target groups, which has both the effects of spoofing and suppressing.

**Key words:** pulse compression radar; linear frequency modulation (LFM); trapezoidal wave; convolution modulation; interrupted sampling

(上接第47页)

## Research on method of track deception jamming based on cooperative control of UAVs

GUO Shufen, YU Guowen, XIONG Xin, XU Peng

(Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

**Abstract:** On the basis of the principle of track deception jamming and the mission characteristics of UAVs, this paper simplifies the model of track deception implemented by UAVs so as to interfere with networking radar effectively. And then the paper establishes the motion model of the false target and UAVs in a set-height flight mode based on the geometrical relationship, and also offers the solution flow of the model. Finally, the paper conducts a simulation to obtain the motion parameters of each UAV and analyzes the cooperative relationship of the UAV speed. The simulation result verifies the feasibility and effectiveness of the proposed jamming model.

**Key words:** networking radar; track deception jamming; UAVs cooperation