

# 对组网雷达的多机协同航迹欺骗干扰技术

朱 宇

(96626 部队, 东阳 322100)

**摘 要** 由于数据融合技术在组网雷达中的普遍应用, 组网雷达系统很容易识别对单部雷达的航迹欺骗干扰。针对此问题, 文章研究了对组网雷达的多机协同航迹欺骗干扰技术。根据假目标、干扰机和所干扰雷达三者之间的相对运动关系, 在预设虚假目标运动轨迹的条件下给出了基于轨迹控制参数的干扰机运动轨迹设计方法。理论推导与仿真结果表明该干扰设计方法的有效性与可行性。

**关键词** 组网雷达 多机协同 航迹欺骗 轨迹控制参数 虚假目标

## Technique of Deception Jamming by Cooperative Control of Multiple Electronic Combat Air Vehicles against Netted Radar

Zhu Yu

(Unit 96626, Dongyang 322100, China)

**Abstract:** With the extensive application of data fusion technique, it is quite easy for the network of radars to identify track deception jamming against single radar. In order to solve this problem, the technique of deception jamming by cooperative control of multiple Electronic Combat Air Vehicles (ECAVs) against netted radar is studied. According to the relative motion relationship between phantom, ECAV and its corresponding radar, the design method of ECAVs' trajectory based on path control parameter (PCP) is presented in the condition that the phantom trajectory is given. Theoretical analysis and computer simulation verify that this design method is effective and feasible.

**Keywords:** netted radar; cooperative control of multiple ECAVs; track deception; PCP; phantom target

## 0 引言

组网雷达在战场上可以构成全方位、立体化、多层次的战斗体系, 能够扩展时间、空间的探测范围, 提高雷达测量精度、检测能力以及雷达观测数据率, 具有很强的抗干扰能力, 在军事中得到了广泛的应用。数据融合技术在组网雷达中的普遍应

用, 使得常规的距离多假目标欺骗干扰在多部雷达情报信息作融合处理时易于被识别, 从而降低或失去欺骗作用。因此, 要对组网雷达实施有效的欺骗干扰, 要使网内各雷达观测到的假目标具有较强的相关性, 即各雷达观测到的假目标在空间位置和速度上应近似相等, 在组网雷达作融合处理时, 假目标才不会被剔除, 这样才能形成有效的欺骗航迹, 从而增大敌情报系统的虚警率, 扰乱

其指挥决策和火力攻击。

多机系统的协同运动欺骗干扰是较新的课题<sup>[1-4]</sup>。对组网雷达的多机协同航迹欺骗干扰是指在敌方组网雷达的观测空域下,利用多架电子干扰飞机在系统控制下作一定规则的协同飞行,采用距离多假目标欺骗干扰技术来对组网雷达实施航迹欺骗干扰。本文主要对干扰机运动轨迹的设计问题进行了研究,得出了基于轨迹控制参数的干扰机运动轨迹的设计方法,并进行了相关仿真实验。

## 1 多机协同航迹欺骗干扰原理

电子干扰飞机上配备的电子干扰设备可以对所干扰雷达实施距离假目标欺骗干扰,可以发射距离前置或者滞后的逼真假目标。电子干扰飞机具有隐身功能,飞行过程中能够不被组网雷达发现。网中各部雷达固定不运动,多架电子干扰飞机(以下简称干扰机)在系统控制下作协同飞行,每部干扰机仅干扰一部雷达,经过预先设置使得每部干扰机针对所干扰雷达发射的欺骗干扰信号在空间同一位置,从而使得网中各部雷达探测到同一虚假目标,经过一连串的虚假定位后便可以产生一条虚假航迹。

设 3 部干扰机编队飞行协同工作对由 3 部雷达构成的雷达网实施航迹欺骗干扰。干扰机对所干扰雷达发射距离前置和后置的逼真假目标,其欺骗干扰示意图如图 1 和图 2 所示。

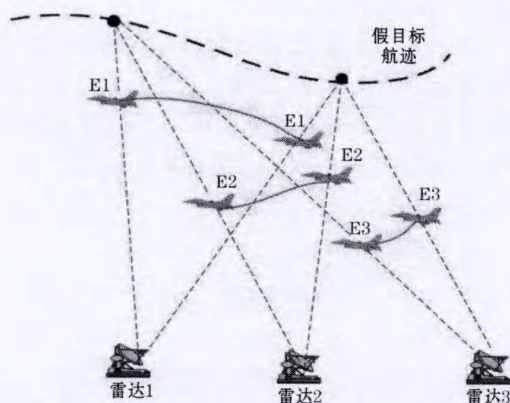


图1 多机协同产生后置假目标欺骗航迹

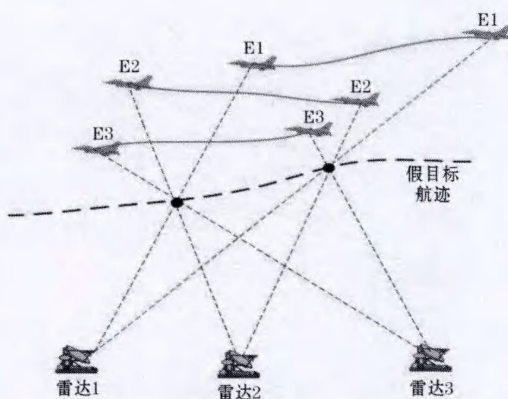


图2 多机协同产生前置假目标欺骗航迹

在设计多机协同航迹欺骗干扰时,首先预设假目标运动轨迹,由于各个时刻干扰机必在所干扰雷达和假目标位置的连线上,结合假目标和干扰机运动规律,就可以设计出每部干扰机可行的运动轨迹。只要设计使假目标航迹和干扰机航迹满足各自的运动方程,这样就可以对组网雷达形成一条相关的虚假航迹。这种干扰方法不受网内雷达布站,测量精度等因素限制,能够在任意的时域和空域内对组网雷达形成有效的航迹欺骗干扰。这种干扰方法要求每部干扰机干扰一部雷达,可以推广到  $n$  部干扰机对  $n$  部雷达的情况。

## 2 运动模型

假目标和干扰机的运动轨迹不仅需满足各自的运动学特性,而且干扰机,所干扰雷达和假目标的位置必须时刻保持在一条连线上。本节主要对假目标和干扰机的运动特性进行分析。以后置的有源假目标为例,在三维空间坐标系中,某一时刻干扰机,假目标和所干扰雷达的空间位置关系如图 3 所示。

图中  $r$  和  $R$  分别是雷达到干扰机和假目标的径向距离。 $\alpha_e$  和  $\beta_e$  是干扰机速度矢量的方位角和俯仰角, $\alpha_p$  和  $\beta_p$  是假目标速度矢量的方位角和俯仰角, $\theta$  和  $\phi$  分别是干扰机或假目标相对于所干扰雷达的方位角和俯仰角, $v_e$  和  $v_p$  分别表示干扰机和假目标的运动速度。

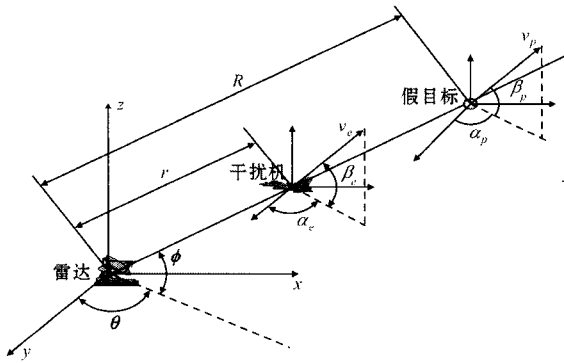


图3 某时刻干扰机、假目标和所干扰雷达空间位置关系示意图

在笛卡尔坐标系中,假目标的运动方程如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= v_p \cos \beta_p \cos \alpha_p \\ \dot{y}_p &= v_p \cos \beta_p \sin \alpha_p \\ \dot{z}_p &= v_p \sin \beta_p \\ \dot{v}_p &= u_{p1} \\ \dot{\alpha}_p &= u_{p2} \\ \dot{\beta}_p &= u_{p3}\end{aligned}\quad (1)$$

其中,  $u_{p1}, u_{p2}, u_{p3}$  分别表示假目标的加速度,速度矢量的方位角变化率和俯仰角变化率,  $\dot{x}_p, \dot{y}_p, \dot{z}_p$  分别表示假目标在各坐标轴上的速度分量。

采用旋转矩阵将其转换到极坐标中有:

$$\begin{bmatrix} \dot{R} \\ R\dot{\theta}\cos\phi \\ R\dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi\cos\theta & \cos\phi\sin\theta & \sin\phi \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ -\sin\theta\cos\theta & -\sin\theta\sin\theta & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{z}_p \end{bmatrix}\quad (2)$$

得到如下方程:

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

由于干扰机、假目标和所干扰雷达在同一条线上,因此干扰机或假目标相对于所干扰雷达的方位角  $\theta$  和俯仰角  $\phi$  以及其变化率可表示为:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \frac{(x_p - x_0)\dot{y}_p - (y_p - y_0)\dot{x}_p}{R_{xy}^2} \\ \dot{\phi} &= \frac{\sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2}\dot{z}_p}{R^2}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\frac{(z_p - z_0)}{R^2} \left[ \frac{(x_p - x_0)\dot{x}_p}{R_{xy}} + \frac{(y_p - y_0)\dot{y}_p}{R_{xy}} \right] \quad (5)$$

$$\phi = \arcsin\left(\frac{z_p - z_0}{R}\right) \quad (6)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_p - y_0}{x_p - x_0}\right) \quad (7)$$

其中,  $(x_p, y_p, z_p)$  表示假目标的空间位置,  $(x_0, y_0, z_0)$  表示所干扰雷达的空间位置,且有

$$R = \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 + (z_p - z_0)^2}$$

$$R_{xy} = \sqrt{(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2}$$

干扰机运动动力学方程与假目标类似。

### 3 干扰机协同运动轨迹设计

#### 3.1 设计原理

设某时刻第  $i$  部雷达的位置为  $\mathbf{x}_{r_i} = [x_{r_i}, y_{r_i}, z_{r_i}]^T$ , 第  $i$  部干扰机的位置为  $\mathbf{x}_{E_i} = [x_{E_i}, y_{E_i}, z_{E_i}]^T$ , 假目标的位置为  $\mathbf{x}_p = [x_p, y_p, z_p]^T$ 。由于干扰机、假目标与所干扰雷达三者必在同一条连线上,根据图三者之间的空间位置关系可表示为:

$$\mathbf{x}_{E_i} = \mathbf{x}_{r_i} + v_i(\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_{r_i}) = \mathbf{x}_{r_i} + v_i \mathbf{x}_{p-r_i} \quad (8)$$

其中,  $v = \frac{r}{R}$  为轨迹控制参数,表示干扰机与雷达距离和假目标与雷达距离之比。当  $v < 1$  时干扰机对雷达产生后置假目标,  $v > 1$  时干扰机对雷达产生前置假目标。干扰机距离雷达不能够太近以免被发现,为保持一定的干扰效果也不能够太远,因此轨迹控制参数  $v$  应在一定范围之内,可表示为  $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$ 。

由于同一时刻干扰机、假目标和对应的雷达三者必在同一条连线上,所以三者的相互运动符合运动伪装<sup>[5-7]</sup>特性。根据运动伪装学相关理论<sup>[8-10]</sup>,轨迹控制参数  $v$  应满足如下关系:

$$v = -\frac{\dot{\mathbf{x}}_r^T \mathbf{x}_{p-r} - \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_{p-r}}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} \pm \sqrt{\frac{(v \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_r \mathbf{x}_{p-r})^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^4} - \frac{(2v \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_{p-r} + v^2 |\dot{\mathbf{x}}_{p-r}|^2 + V_r^2)}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} + \frac{V_E^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2}} \quad (9)$$

当雷达的位置固定不变时,上式可简化为:

$$\dot{v} = -\frac{\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} v \pm \sqrt{\frac{(v \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p)^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^4} - \frac{(v^2 V_p^2)}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} + \frac{V_E^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2}} \quad (10)$$

设假目标和干扰机的运动速度大小不变,首先预设假目标运动轨迹,只要确定各部干扰机速度,结合前面的式子,利用上式即可求解各部干扰机的协同运动轨迹。

要设计符合实际情况的假目标运动轨迹和干扰机协同运动轨迹,需要对其运动受限的必要条件进行分析。下面给出了假目标和各部干扰机运动速度和运动时间需满足的条件。

#### (1) 速度要求

使式(10)成立需满足:

$$(v \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p)^2 - (v^2 V_p^2) |\mathbf{x}_{p-r}|^2 + V_E^2 |\mathbf{x}_{p-r}|^2 \geq 0 \quad (11)$$

可写为:

$$\frac{V_p^2 - (\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p)^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} \leq \frac{V_E^2}{v^2} \quad (12)$$

为使上式始终成立,在设计运动轨迹时可以设定假目标和干扰机的速度关系为:

$$V_p = V_E / v_{\max} \quad (13)$$

#### (2) 时间要求

当干扰机与假目标的速度满足式(13)时,式(10)可写为:

$$\dot{v} = -\frac{\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} v \pm \sqrt{\frac{(v \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p)^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^4} + \frac{V_E^2}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} (1 - \frac{v^2}{v_{\max}^2})} \quad (14)$$

由上式可知,当式中符号取负时,  $\dot{v} \leq 0$ , 轨迹控制参数  $v$  单调减, 当式中符号取正时,  $\dot{v} \geq 0$ ,  $v$  单调增。

根据干扰机,假目标与雷达的相对运动关系,当假目标接近雷达,即  $\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p < 0$  时,上式中的正负号取负且  $v$  不断减小;当假目标远离雷达,即  $\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p > 0$  时,上式中的正负号取正且  $v$  不断增大。

则由许瓦茨不等式可推得:

$$\begin{cases} -2 \frac{|\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p|}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} v_{\max} - \frac{V_E}{|\mathbf{x}_{p-r}|} \sqrt{(1 - \frac{v_{\min}^2}{v_{\max}^2})} < \dot{v} \leq 0 \\ \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p < 0 \\ 0 \leq \dot{v} < 2 \frac{|\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p|}{|\mathbf{x}_{p-r}|^2} v_{\max} + \frac{V_E}{|\mathbf{x}_{p-r}|} \sqrt{(1 - \frac{v_{\min}^2}{v_{\max}^2})} \\ \mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p > 0 \end{cases} \quad (15)$$

由上式可知,  $\dot{v}$  的上下限与干扰机的速度和雷达与假目标的距离有关。由于  $v$  在一定范围内变化,利用上式就可以预测产生相关假目标的最长时间。

除了计算出干扰机运动轨迹外,各部干扰机还需对所接收的雷达信号进行多普勒频移调制,形成以预定速度运动的假目标航迹。

### 3.2 设计步骤

利用上述基于轨迹控制参数  $v$  的设计方法可以求解出恒定速度条件下各部电子干扰机的运动轨迹。下面给出具体的设计方法步骤:

(1) 设置组网雷达中各部雷达的位置以及假目标的运动轨迹且假目标速度大小不变。

(2) 设置每组轨迹控制参数  $v_i$  的范围,即  $v_{i,\min} \leq v_i \leq v_{i,\max}$ , 并设定  $v_i$  的初始值  $v_i(t_0)$ , 根据假目标的初始位置和所干扰雷达位置即可确定每部干扰机的初始位置。

(3) 设置各部干扰机的运动速度。根据  $V_p = V_{Ei} / v_{i,\max}$ , 计算各部干扰机的运动速度。并根据式(10), 结合各组的轨迹控制参数  $v_i$  的范围, 计算能够有效实施干扰任务的最长时间。

(4) 式(10)中, 当  $\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p < 0$ , 式中的正负号取负; 当  $\mathbf{x}_{p-r}^T \dot{\mathbf{x}}_p > 0$ , 式中的正负号取正, 计算各部干扰机运动过程中的轨迹控制参数  $v_i(t)$ 。

(5) 结合干扰机的运动模型求出其运动轨迹, 并得到各个时刻干扰机对所接收雷达信号的距离延迟量; 根据假目标、干扰机运动速度以及雷达相对位置关系, 计算各个时刻干扰机对所接收雷达信号的多普勒频移量。

## 4 仿真实验与分析

设四部电子干扰机协同工作对由四部雷达构成的雷达网实施欺骗干扰, 能够产生一条相关的假目标航迹。干扰机与假目标运动速度大小恒定, 运动速度的方位角和俯仰角变化范围在  $[-20^\circ, 20^\circ]$  内。设定假目标的初始位置为  $[26\text{km}, -15\text{km}, 5\text{km}]$ , 运动速度为  $[-190\text{m/s}, 40\text{m/s}, 0]$ 。预设的假目标运动轨迹与各部雷达的分布如图4所示, 各个时刻假目标与各部雷达

的距离如图5所示。

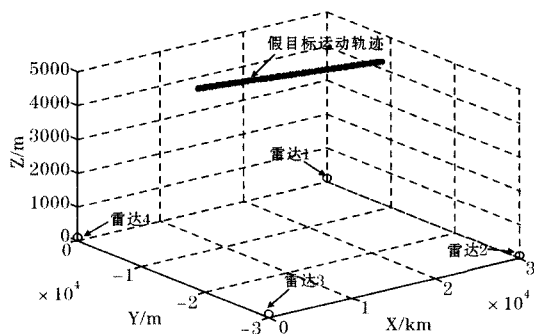


图4 假目标运动轨迹与各雷达位置

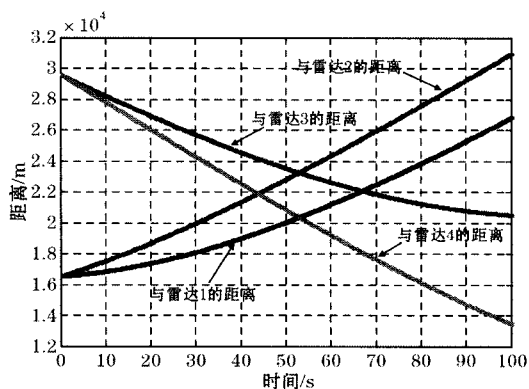


图5 假目标距各部雷达的距离

具体的仿真参数设定如表1所示。

表1 仿真参数

雷达位置/km			轨迹控制参数 $v$ 的范围及初始值	运动速度大小 $v$ (m/s)
1号雷达	[30,0,0.1]	1号干扰机	[0.35,0.85],0.78	165.04
2号雷达	[30,-30,0.08]	2号干扰机	[0.3,0.84],0.8	163.10
3号雷达	[0,-30,0.11]	3号干扰机	[0.25,0.78],0.76	151.45
4号雷达	[0,0,0.095]	4号干扰机	[0.28,0.8],0.75	155.33

假目标与各部干扰机运动轨迹如图6所示,各组轨迹控制参数  $v_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 随时间的变化如图7所示。

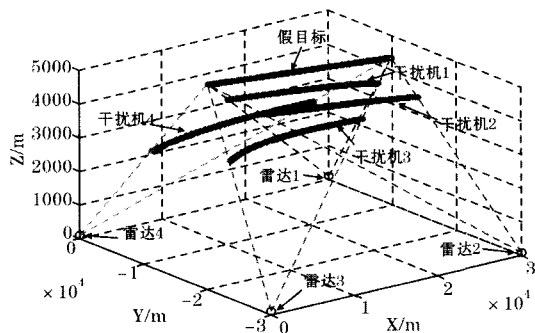


图6 假目标与各干扰机运动轨迹

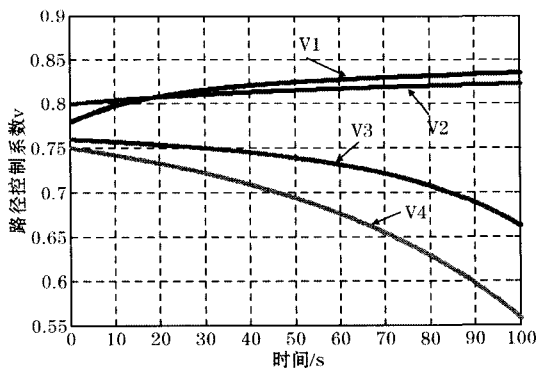


图7 轨迹控制参数随时间变化曲线

由图6,7可知,假目标离雷达1与雷达2越远,其轨迹控制参数越大,离雷达3与雷达4越远,其对应的轨迹控制参数越小。

在各个时刻各干扰机飞行航向的方位角和俯仰角如图8和图9所示。

由图8,9可知,假目标离雷达越远,其对应的电子干扰机飞行航向的方位角与俯仰角越小;离雷达越近,其飞行航向的方位角与俯仰角越大。

各部干扰机对所接收的雷达信号均采用延迟转发来产生欺骗干扰信号,则各部干扰机产生相关假目标的延迟距离随时间变化如图10所示。

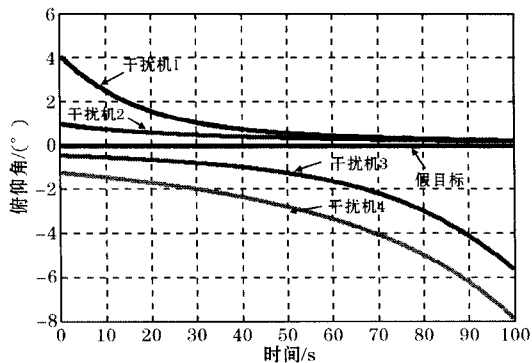


图8 飞行航向的俯仰角

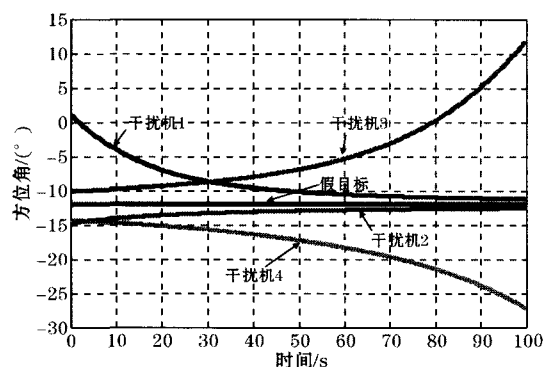


图9 飞行航向的方位角

各部干扰机通过对所接收雷达信号进行多普勒频移调制来对组网雷达形成速度欺骗干扰。设各雷达发射稳定频率的雷达信号,分别为 8.5GHz, 7.8GHz, 8.8GHz, 7.1GHz。各部干扰机对所接收雷达信号的多普勒频移量如图 11 所示。

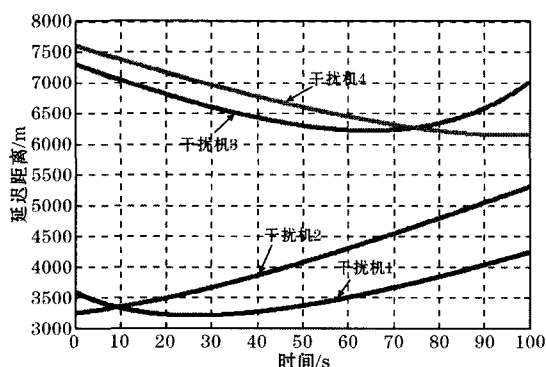


图10 产生相关假目标的距离延迟量

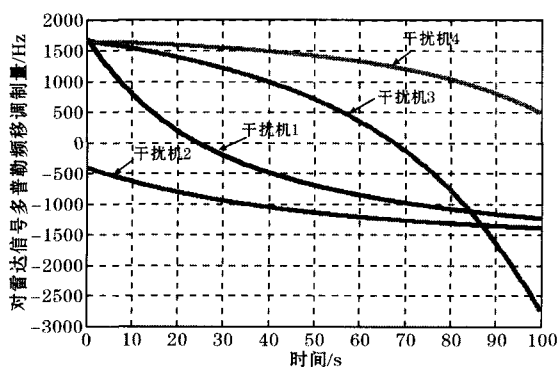


图11 产生相关假目标的多普勒频移量

通过以上仿真分析可知,在速度大小不变的条件下,多部干扰机可通过协同工作来对组网雷达实施航迹欺骗干扰,以上仅给出了产生位置滞后的假目标的情况。当轨迹控制参数  $v>1$  时,同

样可产生位置前置的虚假航迹。

## 5 结束语

本文研究了对地基组网雷达的多机协同航迹欺骗干扰技术。在预设虚假目标运动轨迹条件下,主要对干扰机运动轨迹的设计问题进行了研究。根据假目标,干扰机以及对应雷达的相对运动特点,得出了基于轨迹控制参数的干扰机运动轨迹设计方案。通过理论推导与仿真实验表明该干扰设计方法的有效性与可行性,并对干扰机对所接收雷达信号的距离延迟量和多普勒频移量进行了定量仿真分析。

值得说明的是,本文的方法是在干扰机和假目标速度大小不变的条件下进行设计的。要对组网雷达产生威胁程度更高的欺骗航迹,即模拟作变速运动的欺骗航迹,下一步的工作是考虑干扰机和假目标的动力学模型,研究在动力约束下各部干扰机的最优运动轨迹设计问题,实际上是有约束条件下的最优控制问题。

## 参考文献

- 1 Lee II-Hyoung, Bang Hyochong. Optimal Phantom Track Generation for Multiple Electronic Combat Air Vehicles [C]//International Conference on Control Automation and Systems in COEX. Seoul, Korea, 2008:29-33.
- 2 Maithripala, D. H. A., Jayasuriya S., Mears, Mark J. Phantom Track Generation Through Cooperative Control of Multiple ECAVs Based on Feasibility Analysis [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2007, 129 (5):708-715.
- 3 Xu, Y., Basset, G.. Virtual Motion Camouflage based Phantom Track Generation through Cooperative Electronic Combat Air Vehicles [C]//Accepted to American Control Conference in Marriott Waterfront. Baltimore, MD, USA, 2010:5656-5661.
- 4 Mears, M. J. Cooperative Electronic Attack using Unmanned Air Vehicle [C]//American Control Conference. Portland, OR, June 8-10, 2005:3339-3347.
- 5 P. V. Reddy, E. W. Justh and P. S. Krishnaprasad. Motion camouflage in three dimensions [C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control. Manchester



Grand Hyatt Hotel San Diego, CA, USA, December 13–15, 2006:3327–3332.

6 Glendinning P. The mathematics of motion camouflage [J]. Proc. R. Soc., 2004, 271: 477–481.

7 杨涛, 张为华, Gianmarco Radi. 运动伪装理论在空间攻防中的应用研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1964–1968.

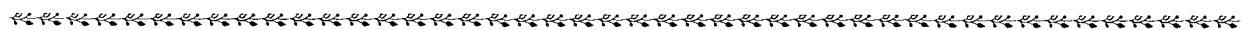
8 Xu, Y., Basset, G.. Pre and Post Optimality Checking of the Virtual Motion Camouflage based Nonlinear Constrained Subspace Optimal Control[C]//AIAA Guidance, Navigation and Control Conference. Chicago, IL, August 10, 2009.

9 Xu, Y., Basset, G.. Bio-Inspired Virtual Motion Camouflage based Subspace Optimal Trajectory Design[J]. Submitted to IEEE Transaction on Control System Technology, March, 2009.

10 Justh E W, Krishnaprasad P S. Steering laws for motion camouflage [J]. Proc R. Soc., 2006, 462: 3629–3643.

### 作者简介

朱宇 (1988—), 男, 汉族, 江苏东台人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达与雷达对抗理论与技术。



### (上接第 10 页)

2 马超. 基于无线传感器网络电磁频谱监测系统的数据融合算法性能分析[D]. 西安电子科技大学硕士学位论文, 2012.

3 E. Candes, J. Romberg, T. Tao. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information [J]. IEEE Trans. Information Theory, 2006, 52(2): 489–509.

4 E. Candes, J. Romberg. Quantitative robust uncertainty principles and optimally sparse decompositions [J]. Foundations of Compute Math, 2006, 6(2): 227–254.

5 D. L. Donoho. Compressed sensing [J]. IEEE Transac-

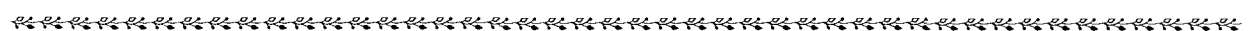
tion on Information Theory, 2006, 52(4): 1289–1306.

6 Z. Tian, G B. Giannakis. Compressed sensing for wide-band cognitive radios [C] // International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP). Hawaii: IEEE Press, 2007: 1357–1360.

7 赵知劲, 张伟卫, 郑仕链. 基于多子带信号采样和小波变换的宽带频谱感知[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2313–2316.

### 作者简介

邵震洪 (1970—), 男, 江西景德镇人, 博士, 主要研究方向为电磁频谱和军事通信抗干扰技术等。



### (上接第 16 页)

3 田孝华, 廖桂生. 一种有效减小非视距传播影响的 TOA 定位方法[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1426–1432.

4 倪巍, 王宗欣. 两种非视线传播环境下的蜂窝系统定位算法[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1469–1472.

5 Wan Q., Yang W. L., Peng Y. N. Closed-form solution to mobile location using linear constraint on scatterer [J]. Electron. Lett., 2004, 40(14): 883–884.

6 Wylie MP, Holtzman J. The non-line of sight problem in mobile location estimation[C]//The 5th IEEE International Conference on Universal Personal Communications. 1996: 827–831.

7 YT. Chan, K C Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location[J]. IEEE Transactions on signal processing, 1994, 42(8): 1905–1915.

8 Andrzej C, Shunichi A. Adaptive blind signal and image

processing[M]. publishing house of electronics industry, 2005: 67–71.

9 Yuexian Z, Shingchow C, Tungsang N. Least mean M-Estimate for robust adaptive filtering in impulse noise [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2000, 47(12): 1564–1569.

10 H. Asplind et al. A Channel Model for Positioning[C]//Cost259TD(98)20. Ericsson Corp. Bern, Switzerland, 1998.

### 作者简介

饶中初 (1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 2013–2014 年在电子科技大学担任国内访问学者。研究方向为无线通信、技术侦察和电子对抗技术等。

黄际彦 (1981—), 男, 博士, 副教授。研究方向为无线定位、通信中的信号处理技术等。