

## 外太空有源假目标的运动学特性

饶彬<sup>①</sup> 肖顺平<sup>①</sup> 赵志超<sup>①</sup> 赵艳丽<sup>②</sup> 王雪松<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

<sup>②</sup>(中国人民解放军六三八八零部队 洛阳 471003)

**摘要:** 弹道导弹突防过程中释放的有源干扰装置能够在能量、波形和相位调制等方面与目标回波高度逼近的假目标, 这些假目标会共享雷达信号处理器的相干处理增益, 使得传统的信号处理鉴别方法失效, 并在数据处理层形成大量虚假航迹。该文从理论上分析了外太空有源假目标的运动学特性, 推导了其在典型坐标系下的运动方程, 揭示了有源假目标在运动学特性上和实体目标间的根本差异。首先, 建立了统一的数学描述模型, 推导了假目标在雷达站直角坐标系、雷达站球坐标系和地心坐标系下的运动方程; 其次, 根据运动方程分析了假目标的轨道、速度和加速度特性; 最后, 研究了相关因素对假目标运动学特性的影响。该文的分析结果可以为基于运动学信息鉴别有源假目标的系列方法提供理论指导。

**关键词:** 弹道导弹跟踪; 有源假目标; 运动方程; 运动学特性; 鉴别

**中图分类号:** TN95; V412.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2009)11-2600-06

## Motional Characteristics of Exo-atmospheric Active Decoys

Rao Bin<sup>①</sup> Xiao Shun-ping<sup>①</sup> Zhao Zhi-chao<sup>①</sup> Zhao Yan-li<sup>②</sup> Wang Xue-song<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>②</sup>(Unit 63880, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** In the process of ballistic missile penetration, modern active jamming systems can generate decoys resembling true target echoes in aspects of energy, waveform, or even phase modulation. These decoys can share the radar signal processor's coherent processing gain, making conventional signal-based discrimination methods invalidate and even form multiple false tracks at the data processor. In this paper, motion models of active decoys in typical coordinate systems (CS) are derived theoretically, and the motional characteristics of active decoys are analyzed in detail. These motion models can reveal the intrinsic dynamics differences between physical targets and active decoys. Firstly, uniform mathematical model is built up to derive the motion models in East-North-Up (ENU) CS, Radar spherical CS and Earth-centered fixed (ECF) CS. Secondly, the orbit, velocity and acceleration characteristics of active decoys are analyzed on the basis of motion models. And thirdly, performance analysis due to related elements are also covered. This study makes a contribution in that it has provided motion-based discrimination algorithms with theoretical basis.

**Key words:** Ballistic missile tracking; Active decoy; Motion model; Motional characteristic; Discrimination

### 1 引言

弹道导弹突防过程中采用 ECM 技术是最常见的突防手段之一<sup>[1,2]</sup>, 其中利用欺骗干扰装置产生有源假目标对付导弹防御系统是公认的比较有效的方法<sup>[1]</sup>。从原理上讲, ECM 包括噪声干扰和欺骗干扰<sup>[3]</sup>。噪声干扰的缺点是为了达到压制效果, 干扰机需要极大的有效辐射功率(ERP), 这对于体积和重量都有限制的弹载干扰机来说是难以实现的。另外, 现代雷达广泛采用了单脉冲跟踪技术, 导致雷达可以利用辐射源跟踪技术或多部雷达组网对干扰机进行定位<sup>[4]</sup>。噪声干扰的局限性导致在突防过程中更倾

向于采用欺骗干扰技术。不同于噪声干扰, 欺骗干扰(DECM)能非常有效地将干扰能量集中到雷达接收带宽内, 共享雷达的脉冲压缩处理增益, 并且能同时产生多个假目标。

大规模集成电路和数字射频存储器(DRFM)<sup>[4]</sup>等先进器件的成熟为高逼真度的假目标欺骗干扰的工程应用提供了有力的技术支持。DRFM可以截获、存储、转发敌方雷达信号, 能精确模仿雷达波形, 可以做到与真实目标在时域、频域和空域的特征都十分相似。通过合理设计, DRFM还能欺骗具有频率捷变、多普勒处理的脉冲压缩雷达<sup>[4]</sup>。

对于在能量、波形和相位调制等方面都与真实雷达回波信号相差无几的假目标信号而言, 常规的雷达抗干扰措施及信号处理识别技术可能无法奏

效<sup>[5]</sup>。雷达信号处理系统无法鉴别的假目标信号会形成点迹, 进入雷达数据处理系统, 乃至形成多个稳定的航迹。假目标航迹会严重消耗雷达资源, 另一方面, 假目标甚至会使雷达误判其为真目标对其发射拦截导弹。这些具有高度欺骗性的假目标对现代导弹防御雷达无疑是一个巨大的威胁。

原理上讲, 欺骗性干扰信号与雷达目标信号既有共同点又有不同点。必须有相似点, 才能使雷达真假难辨, 也必须有差别, 才能达到欺骗干扰的目的。而正是这种差别可以作为鉴别的依据。例如赵艳丽等人针对距离假目标提出的组网鉴别法<sup>[5]</sup>、动力学模型匹配鉴别法<sup>[6]</sup>和雷达滤波鉴别法<sup>[7]</sup>等。这些方法的基本思想都是利用有源假目标在运动学特性上和空间实体目标存在差异这一根本信息, 因此在信号处理层无法鉴别假目标时, 仍然可以在下一个环节——数据处理层进行鉴别。但上述文献在设计鉴别算法时, 大多从直观或仿真的角度认为假目标不符合某条性质, 并没有从理论上分析有源假目标固有的运动学特性。

本文将详细推导外太空有源假目标在典型坐标系下所满足的运动方程, 揭示其特有的运动学规律, 以期能为假目标鉴别提供理论依据。

## 2 有源假目标的运动方程

现阶段的反导雷达系统, 由于广泛采用了超低旁瓣、相干旁瓣对消器(CSLC)、旁瓣匿隐器(SLB)和单脉冲跟踪等技术, 这些措施使得有源角度欺骗变得困难<sup>[4]</sup>, 因此有源欺骗通常指距离欺骗和速度欺骗。距离欺骗在某种程度上与雷达的实现体制无关, 而速度欺骗只有在雷达具有多普勒测量能力时才有效。因此, 欺骗干扰机中几乎无一例外地采用距离欺骗技术, 但其效果仅仅局限于给雷达引入假的距离信息。即使雷达受到假距离信息的欺骗, 仍然可以获得精确的角度信息。只有当干扰机关机时, 雷达才不能获得角度信息<sup>[4]</sup>。

设干扰机实体在雷达站球坐标系下的状态向量为  $\mathbf{Z} \triangleq (R, A, E)^T$  (分别代表距离、方位和俯仰), 假目标(以下如无特殊声明, 假目标均指距离欺骗假目标)在雷达站球坐标系下的状态向量为  $\mathbf{Z}_f \triangleq (R_f, A_f, E_f)^T$ , 则假目标所满足的条件为<sup>[6]</sup>:  $R_f \neq R$ ,  $A_f \approx A$ ,  $E_f \approx E$ 。

对于一个延时  $\Delta t$  后转发的假目标, 其延迟距离为  $\Delta R = c\Delta t/2$ , 其中  $c$  表示光速。在实际中延迟距离  $\Delta R$  可以是时变的, 分别对应以下几种情况( $C$  表示常数)

$$\left. \begin{aligned} (1) & \Delta R = \Delta \dot{R} = \Delta \ddot{R} = 0 \\ (2) & \Delta R \neq 0, \Delta \dot{R} = \Delta \ddot{R} = 0 \\ (3) & \Delta \dot{R} \equiv C \neq 0, \Delta \ddot{R} = 0 \\ (4) & \Delta \ddot{R} \equiv C \neq 0, \Delta \dot{R} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中: (1)实体目标(包括真目标、诱饵弹头或干扰机实体); (2)距离假目标(延时固定); (3)匀速拖引假目标; (4)匀加速拖引假目标。在实际中威胁较大的是距离假目标, 此时真假目标的多普勒频移一样, 干扰效果更佳。

下面推导假目标在典型坐标系下的运动方程, 推导思路如图 1 所示。本文重点考虑 3 种坐标系: 雷达站球坐标系、雷达站直角(East-North-Up, ENU)<sup>[9]</sup>坐标系和地心(Earth-centered fixed, ECF)坐标系。雷达站球坐标和雷达站直角坐标系的运动方程可用来设计跟踪算法; 而地心坐标系的运动方程则可以用来分析假目标的宏观轨迹特性。

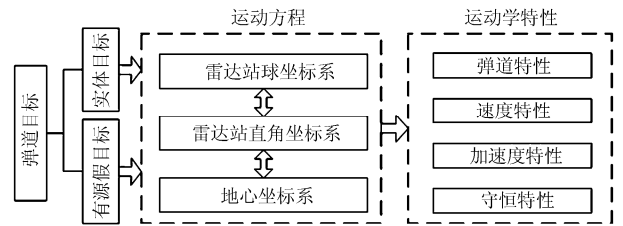


图 1 流程图

### 2.1 雷达站直角坐标系下假目标的运动方程

在外层空间, 忽略地球自转、地球非球形、星体引力和扰动力的情况下, 各实体目标作围绕地心的运动, 其运动轨迹通常满足二体运动方程<sup>[10]</sup>。记雷达站的经度、纬度和高度分别为  $L$ ,  $B$  和  $H$ , 地球平均半径为  $r_0$ , 并记  $\mathbf{X} \triangleq [\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}]^T \triangleq [x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}]^T$  为实体目标在 ENU 坐标系下的状态向量, 则在雷达站 ENU 坐标系下, 空间实体目标的运动方程为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{a} \triangleq \ddot{\mathbf{r}} = -\frac{\mu}{R_e^3} [\mathbf{r} + \boldsymbol{\xi}] \quad (2)$$

其中  $\mu$  为地球引力系数,  $\boldsymbol{\xi} = (0, 0, r_0 + H)^T$ ,  $R_e$  是目标到地心的距离, 即

$$R_e = [x^2 + y^2 + (z + r_0 + H)^2]^{1/2} \quad (3)$$

假目标一般在中段或末助推段释放, 记假目标在 ENU 坐标系下的状态向量为  $\mathbf{X}_f \triangleq (\mathbf{r}_f^T, \dot{\mathbf{r}}_f^T)^T$ , 并定义相对距离延迟率为

$$\beta = \Delta R / R_f \quad (4)$$

则有

$$R = R_f (1 - \beta) \quad (5)$$

已知 ENU 坐标系和雷达站球坐标系间的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \cos A \cos E \\ R \sin A \cos E \\ R \sin E \end{bmatrix} \quad (6)$$

不难得到如下关系式

$$\mathbf{r} = (1 - \beta) \mathbf{r}_f \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{r}} = -\dot{\beta} \mathbf{r}_f + (1 - \beta) \dot{\mathbf{r}}_f \quad (8)$$

$$\ddot{\mathbf{r}} = -\ddot{\beta} \mathbf{r}_f - 2\dot{\beta} \dot{\mathbf{r}}_f + (1 - \beta) \ddot{\mathbf{r}}_f \quad (9)$$

将式(7)-式(9)代入式(2), 通过整理可得假目标在 ENU 坐标系下的运动方程

$$\mathbf{a}_f \triangleq \ddot{\mathbf{r}}_f = -\frac{\mu}{R_e^3} \left[ \mathbf{r}_f + \frac{\boldsymbol{\xi}}{(1 - \beta)} \right] + \frac{\ddot{\beta}}{1 - \beta} \mathbf{r}_f + \frac{2\dot{\beta}}{1 - \beta} \dot{\mathbf{r}}_f \quad (10)$$

其中  $R_e$  可由假目标的位置进行重写

$$R_e = [(R_f - \Delta R)^2 + (r_o + H)^2 + 2z_f(1 - (\Delta R/R_f))(r_o + H)]^{1/2} \quad (11)$$

式(10)和式(11)即是外太空有源假目标在 ENU 坐标系下的运动学方程。可见, 其表达式和式(2)相比有轻微的不同。事实上, 如果目标在  $\mathbf{r}_f$  位置为实体目标, 则根据式(2)应有

$$\tilde{\mathbf{a}}_f = -\frac{\mu}{R_{ef}^3} [\mathbf{r}_f + \boldsymbol{\xi}] \quad (12)$$

其中  $R_{ef} = [x_f^2 + y_f^2 + (z_f + r_o + H)^2]^{1/2}$ 。因此, 假目标的偏移加速度为

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{a} &= \mathbf{a}_f - \tilde{\mathbf{a}}_f \\ &= \mu \mathbf{r}_f \left[ \frac{1}{R_{ef}^3} - \frac{1}{R_e^3} \right] + \mu \boldsymbol{\xi} \left[ \frac{1}{R_{ef}^3} - \frac{1}{(1 - \beta) R_e^3} \right] \\ &\quad + \frac{\ddot{\beta}}{1 - \beta} \mathbf{r}_f + \frac{2\dot{\beta}}{1 - \beta} \dot{\mathbf{r}}_f \end{aligned} \quad (13)$$

注意到由于  $r_o \gg \Delta R$ , 因此  $R_{ef} \approx R_e$ , 即假目标到地心的距离大致和干扰机到地心的距离相等。另外, 由  $\beta$  的定义式可以看出,  $\dot{\beta}$  和  $\ddot{\beta}$  也为小量。这些因素共同决定了  $\Delta \mathbf{a}$  也是一个小量, 但一般不为零。由式(13)可以看出,  $\Delta \mathbf{a} = \mathbf{0}_{3 \times 1}$  的一个充分条件是  $\beta = 0$ , 此时假目标的延迟距离  $\Delta R = 0$ , 退化为干扰机实体目标。除此之外, 一般情况下的假目标 ( $\Delta R \neq 0$ ), 其偏移加速度  $\Delta \mathbf{a}$  是不为零的。

文献[6]中定义的动力学模型匹配系数, 其定义式为

$$M = a_g - g(x, y, z) \quad (14)$$

其中  $a_g$  为观测加速度,  $g(x, y, z)$  为理论加速度(按实体目标计算)。显然对于实体目标而言, 如果不考虑雷达的测量误差, 有  $M \equiv 0$ ; 对于假目标而言, 由

于存在固有的偏移加速度  $\Delta \mathbf{a}$ , 必然有  $M \neq 0$ 。文献[7]中利用雷达滤波鉴别法对假目标进行鉴别, 其本质也在于假目标的运动学方程和实体目标的理论运动方程不匹配。但上述文献并没有对假目标的加速度特性进行深入分析, 本文导出了假目标加速度的明确计算式, 可以为上述算法提供理论依据。

## 2.2 雷达站球坐标系下假目标的运动方程

仿照前面的方法, 本文先推导实体目标在球坐标系的运动方程, 再代入变量反求假目标的运动方程。已知实体目标在雷达站球坐标系下的运动方程为<sup>[11]</sup>

$$\begin{bmatrix} \ddot{R} \\ \ddot{A} \\ \ddot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\dot{E}^2 + R\cos^2 E \dot{A}^2 - \frac{\mu[R + (r_o + H)\sin E]}{R_e^3} \\ -2\frac{\dot{R}}{R} \dot{A} + 2\dot{A} \dot{E} \tan E \\ -2\frac{\dot{R}}{R} \dot{E} - \frac{\dot{A}^2}{2} \sin(2E) - \frac{\mu(r_o + H)\cos E}{RR_e^3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中

$$R_e = \sqrt{R^2 + (r_o + H)^2 + 2R(r_o + H)\sin E} \quad (16)$$

假目标和干扰机实体之间的关系式为

$$\begin{bmatrix} R \\ A \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f - \Delta R \\ A_f \\ E_f \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{R} \\ \dot{A} \\ \dot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{R}_f - \Delta \dot{R} \\ \dot{A}_f \\ \dot{E}_f \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \ddot{R} \\ \ddot{A} \\ \ddot{E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{R}_f - \Delta \ddot{R} \\ \ddot{A}_f \\ \ddot{E}_f \end{bmatrix} \quad (17)$$

将式(17)代入式(15), 即可得假目标在球坐标系的运动方程为

$$\begin{bmatrix} \ddot{R}_f \\ \ddot{A}_f \\ \ddot{E}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_f - \Delta R)\dot{E}_f^2 + (R_f - \Delta R)\cos^2 E_f \dot{A}_f^2 - \frac{\mu[R_f - \Delta R + (r_o + H)\sin E_f]}{R_e^3} + \Delta \ddot{R} \\ -2\frac{(\dot{R}_f - \Delta \dot{R})}{R_f - \Delta R} \dot{A}_f + 2\dot{A}_f \dot{E}_f \tan E_f \\ -2\frac{(\dot{R}_f - \Delta \dot{R})}{R_f - \Delta R} \dot{E}_f - \frac{\dot{A}_f^2}{2} \sin(2E_f) - \frac{\mu(r_o + H)\cos E_f}{(R_f - \Delta R)R_e^3} \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中  $R_e$  可用假目标的位置进行表示

$$R_e = \sqrt{(R_f - \Delta R)^2 + (r_o + H)^2 + 2(R_f - \Delta R)(r_o + H)\sin E_f} \quad (19)$$

### 2.3 地心直角坐标系下假目标的运动方程

记  $\mathbf{X}_e \triangleq [x_e, y_e, z_e, \dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{z}_e]^T$  为实体目标在 ECF 坐标系的状态向量,  $\mathbf{X}_{ef} \triangleq [x_{ef}, y_{ef}, z_{ef}, \dot{x}_{ef}, \dot{y}_{ef}, \dot{z}_{ef}]^T$  为假目标在 ECF 坐标系的状态向量。则 ENU 坐标系和 ECF 坐标系间的变换式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_o + H \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\sin(L) & \cos(L) & 0 \\ -\cos(L)\sin(B) & -\sin(L)\sin(B) & \cos(B) \\ \cos(L)\cos(B) & \sin(L)\cos(B) & \sin(B) \end{bmatrix} \quad (21)$$

记  $\mathbf{r}_e = (x_e, y_e, z_e)^T$ ,  $\mathbf{r}_{ef} = (x_{ef}, y_{ef}, z_{ef})^T$ , 则式(20)可以简写为

$$\mathbf{r} = \mathbf{T}\mathbf{r}_e - \boldsymbol{\xi} \quad (22)$$

对于假目标则有

$$\mathbf{r}_f = \mathbf{T}\mathbf{r}_{ef} - \boldsymbol{\xi}, \quad \dot{\mathbf{r}}_f = \mathbf{T}\dot{\mathbf{r}}_{ef}, \quad \ddot{\mathbf{r}}_f = \mathbf{T}\ddot{\mathbf{r}}_{ef} \quad (23)$$

将式(23)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{T}\ddot{\mathbf{r}}_{ef} = & -\frac{\mu}{R_e^3}(\mathbf{T}\mathbf{r}_{ef} - \boldsymbol{\xi}) + \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta}(\mathbf{T}\mathbf{r}_{ef} - \boldsymbol{\xi}) \\ & + \frac{2\dot{\beta}}{1-\beta}\mathbf{T}\dot{\mathbf{r}}_{ef} - \frac{\mu}{R_e^3(1-\beta)}\boldsymbol{\xi} \end{aligned} \quad (24)$$

注意到  $\mathbf{T}$  为正交阵, 式(24)两边同时左乘  $\mathbf{T}^{-1}$  可得

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{r}}_{ef} = & -\frac{\mu}{R_e^3}\mathbf{r}_{ef} + \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta}\mathbf{r}_{ef} + \frac{2\dot{\beta}}{1-\beta}\dot{\mathbf{r}}_{ef} \\ & - \left[ \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta} + \frac{\mu\beta}{R_e^3(1-\beta)} \right] (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\xi}) \end{aligned} \quad (25)$$

下面推导  $R_e$  在 ECF 坐标系下的表达式。注意到  $\mathbf{r}_f$  与  $\mathbf{r}$  之间有如下关系式

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_f(1-\beta) \quad (26)$$

再根据式(22)和式(23)得到

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_e = \mathbf{T}^T(\mathbf{r} + \boldsymbol{\xi}) &= \mathbf{T}^T[\mathbf{r}_f(1-\beta) + \boldsymbol{\xi}] \\ &= \mathbf{T}^T[(\mathbf{T}\mathbf{r}_{ef} - \boldsymbol{\xi})(1-\beta) + \boldsymbol{\xi}] = (1-\beta)\mathbf{r}_{ef} + \beta\mathbf{T}^T\boldsymbol{\xi} \end{aligned} \quad (27)$$

注意到  $|\mathbf{r}_e| = R_e$ , 故

$$R_e = |(1-\beta)\mathbf{r}_{ef} + \beta\mathbf{T}^T\boldsymbol{\xi}| \quad (28)$$

这样, 式(25)和式(28)即构成了完整地心坐标系下假目标的运动方程。其展开式较为复杂, 和目标的具体位置、相对延迟率、雷达的布站位置等都有关系。

### 3 假目标的运动学特性

前面推导了假目标在典型坐标系下的运动方程。假目标和实体目标相比, 其运动方程中多了一些变量 ( $\Delta R$  或  $\beta$ ), 而这些变量之间又是相互耦合

的, 因此其表达式较为复杂。从本质上讲, 假目标所展示的宏观运动学特性都是其运动方程在不同侧面的反映, 即是说运动方程决定了所有运动学性质。通过分析可知外太空有源假目标具有以下运动学特性:

(1) 非弹道特性 这点从式(13)可以直接反映出来, 假目标存在固有的偏移加速度  $\Delta \mathbf{a}$ , 但由于  $\dot{\beta}$  和  $\ddot{\beta}$  均是小量, 因此  $\Delta \mathbf{a}$  也是小量但却不为零。这就是为什么假目标也会形成大量虚假航迹的根本原因所在。雷达跟踪滤波器一般具有一定的鲁棒性, 滤波算法会将这种微小系统误差当成过程噪声对待, 因此假目标也会被滤波器稳定跟踪。

(2) 非平面特性 根据椭圆弹道理论可知, 对于实体目标, 其在自由段的弹道是在同一个平面内<sup>[10]</sup>, 即每一时刻的动量矩是一个常矢量。在不考虑地球自转的情况下有如下关系式成立

$$\mathbf{h} = \mathbf{r}_e \times \dot{\mathbf{r}}_e \equiv \mathbf{C} \quad (29)$$

$$\dot{\mathbf{h}} = \dot{\mathbf{r}}_e \times \dot{\mathbf{r}}_e + \mathbf{r}_e \times \ddot{\mathbf{r}}_e = \mathbf{r}_e \times \ddot{\mathbf{r}}_e = -\mathbf{r}_e \times \frac{\mu \mathbf{r}_e}{R_e^3} \equiv \mathbf{0}_{3 \times 1} \quad (30)$$

其中 “ $\times$ ” 表示叉积。但对假目标而言, 根据式(25)可得假目标动量矩的导数为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}}_f = \mathbf{r}_{ef} \times \dot{\mathbf{r}}_{ef} &= \frac{2\dot{\beta}}{1-\beta}(\mathbf{r}_{ef} \times \dot{\mathbf{r}}_{ef}) \\ &- \left[ \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta} + \frac{\mu\beta}{R_e^3(1-\beta)} \right] [\mathbf{r}_{ef} \times (\mathbf{T}^T \boldsymbol{\xi})] \end{aligned} \quad (31)$$

式(31)一般不为  $\mathbf{0}_{3 \times 1}$ , 因此非平面性是假目标的固有属性。

(3) 动力学不守恒特性 对实体目标而言, 受力遵循牛顿定律, 满足机械能守恒定律和动量矩守恒定律<sup>[10]</sup>。对假目标而言, 并不是真实存在的客观实体, 其运动轨迹只是干扰机实体目标运动轨迹的一种连续映射, 导致动量矩和机械能必不满足守恒定律。

事实上, 假目标动量矩的不守恒性可由式(31)直接得到。而假目标机械能的导数为

$$\begin{aligned} \dot{E}_f = \frac{d}{dt} \left( \frac{|\mathbf{r}_{ef}|^2}{2} - \frac{\mu}{R_{ef}} \right) &= \dot{\mathbf{r}}_{ef} \ddot{\mathbf{r}}_{ef}^T + \frac{\mu}{R_{ef}^3} \dot{\mathbf{r}}_{ef} \mathbf{r}_{ef}^T \\ &= -\frac{\mu}{R_e^3} \dot{\mathbf{r}}_{ef} \mathbf{r}_{ef}^T + \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta} \dot{\mathbf{r}}_{ef} \mathbf{r}_{ef}^T + \frac{2\dot{\beta}}{1-\beta} |\dot{\mathbf{r}}_{ef}|^2 \\ &- \left[ \frac{\ddot{\beta}}{1-\beta} + \frac{\mu\beta}{R_e^3(1-\beta)} \right] \dot{\mathbf{r}}_{ef} \boldsymbol{\xi}^T \mathbf{T} + \frac{\mu}{R_{ef}^3} \dot{\mathbf{r}}_{ef} \mathbf{r}_{ef}^T \end{aligned} \quad (32)$$

上式也一般不为零, 说明机械能不守恒现象也是假目标的固有特性。

(4) 轨道根数时变特性 由于 6 个轨道根数中的 5 个常量要素可由轨道动力学常量——动量矩和机械能直接导出<sup>[10]</sup>, 假目标的动量矩和机械能均不满

足守恒定律,可以预见,假目标的5个常量根数也是时变的(由于篇幅限制,推导略)。

#### 4 仿真实验

前面推导了假目标的运动方程并分析了假目标的运动学特性,下面通过仿真的方法验证上述结论。

仿真场景如下:假定地球为一标准匀质圆球,不考虑地球自转,采用Runge-Kutta方法积分出一条椭圆弹道。导弹关机点高度为80 km,关机点速度为2500 m/s,以最佳倾角向正东发射。关机点所对应的地面位置为东经0°,北纬0°,则再入位置约为东经6.0697°,北纬0°。自由段总飞行时间为370 s,自由段总射程为675 km。考虑到雷达一般位于偏己方一侧或直接位于弹着点附近,本文中雷达位置取为北纬2°,东经4.5°,雷达的作用距离假设超过1000 km,则雷达可以覆盖整个中段飞行过程(目标至雷达的最大距离为566 km)。雷达跟踪算法采用工程上广泛使用的EKF<sup>[9]</sup>,过程噪声阵取为 $Q = 10^{-5} \mathbf{I}_{6 \times 6}$ ,雷达距离量测标准差 $\sigma_R = 5$  m,角度量测标准差 $\sigma_A = \sigma_E = 0.1$  mrad,跟踪数据率5 Hz。另外,为方便起见,仿真中假设目标的检测概率为1,虚警概率为0。

为使转发式有源假目标欺骗干扰效果更好,常见的情况是每次转发的干扰个数相同、相对延迟时间固定(使得真假目标的多普勒变化一致)<sup>[7]</sup>。假定真目标上携带干扰机,干扰机产生的欺骗干扰信号经过脉冲压缩处理后,产生4个假目标,相对于真目标的延迟时间分别为 $\pm 66.6667 \mu\text{s}$ ,  $\pm 33.3333 \mu\text{s}$ ,对应延迟距离为 $\pm 10$  km,  $\pm 5$  km(负号代表超前)。图2是雷达站ENU坐标系下通过EKF滤波得到的真假目标轨迹图。由图可知,假目标也会被EKF稳定跟踪,且真假目标的弹道轨迹十分相似,单从弹道上对假目标进行鉴别是很困难的。其根本原因就在于假目标的弹道偏移加速度 $\Delta a$ 是个小量。

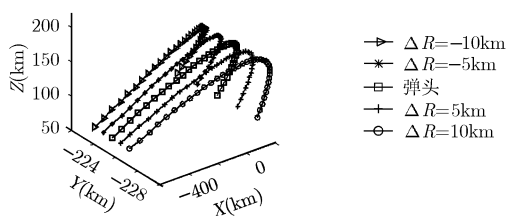


图2 真假目标的3维滤波轨迹(ENU坐标系)

但是真假目标的运动学特性还是有本质差异的,如图3所示,该图反映了通过雷达滤波观察到的运动学特性。其中(a)为加速度;(b)为动力学模型匹配系数;(c)为机械能;(d)为动量矩。

由图3(a)可知,对于真目标而言,加速度值仅受滤波噪声影响(刚开始有波动是因为滤波器还没有达到稳定跟踪状态,下同),其变化趋势是逐渐减小再增大,关于最低点呈轴对称分布,而假目标的变化趋势并不是轴对称的。实际上,由前述理论分析可知,假目标加速度和真目标位置、假目标延迟量以及雷达位置等都有关系。一般来说,假目标的延迟量越大,其偏移加速度也越大。图3(b)给出了真假目标动力学模型匹配系数 $M$ 的变化图。真目标的 $M$ 值仅受滤波噪声影响,其值基本上在零附近扰动,而假目标的 $M$ 值时变且不为零。图3(c)和图3(d)分别给出了真假目标机械能和动量矩的变化趋势。由图可知,真目标的机械能和动量矩基本上满足守恒定律,而假目标机械能和动量矩是时变的,不满足动量矩守恒定律和机械能守恒定律。由于动量矩守恒决定了弹道的平面性,很容易推知假目标的弹道是非平面的。

注意到假目标产生的机理和干扰机以及雷达的工作方式都有关系,实际雷达观测到的假目标航迹有可能只存在于某个特定的时间区间,这就需要在较短的时间内设计鉴别算法尽快识别假目标航迹。另外,还要合理分析鉴别性能与雷达布站、延迟量、数据率和雷达测量误差等因素的关系。本文仅利用[200, 260]之间的观测数据,采用动量矩和机械能进行综合鉴别,100次Monte Carlo仿真的鉴别结果见图4。由图可知,对于本文的仿真场景,延迟超过2 km的假目标即可达到90%以上的鉴别率(1倍测量误差)。另外,还可以得出如下结论:在相同的情况下,假目标的延迟量越大,其成功鉴别率越高;雷达的观测误差越小,其成功鉴别率越高。

#### 5 结束语

弹道目标的识别问题一直是导弹防御系统的难点和关键点,其中对有源假目标的鉴别尤其值得关注,因为这些假目标更容易形成多个虚假航迹。本文从理论上系统地分析了这些有源假目标的运动学特性,指出假目标具有非弹道、非平面和动力学不守恒等运动学特性。仿真结果表明利用运动学特性对假目标进行鉴别完全是可行的,并且鉴别算法无需额外消耗雷达的硬件资源,利用窄带航迹信息即可识别,工程实现性良好。

在实际中有以下几点需要注意:(1)假目标运动学特性有很多,应该系统比较其性能,找出最适宜识别的特征量或综合识别特征量;(2)本文的运动方程为了简化起见,没有考虑地球自转、地球非球形等因素的影响,如果考虑这些因素,则假目标的运

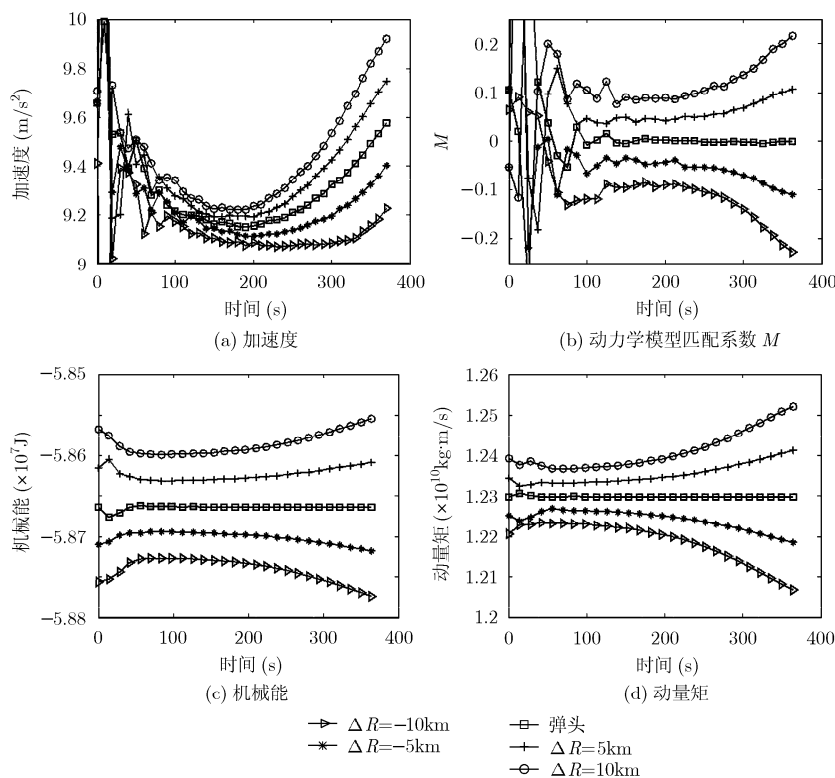


图 3 真假目标的运动学特性

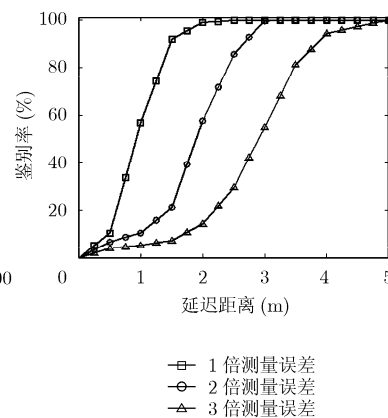


图 4 假目标的鉴别率

动方程还要复杂的多,但其宏观运动学特性不会有较大改变;(3)设计鉴别算法时应充分考虑雷达测量精度、数据率、雷达布站位置及跟踪滤波算法等因素的影响,寻找最合适的鉴别门限。

### 参考文献

- [1] Frankel S. Defeating theater missile defense radars with active decoys. *Science & Global Security*, 1997, 6: 333-355.
- [2] Andrew M, et al. Countermeasures, Union of Concerned Scientist, MA: Cambrige, 2000: 41-46.
- [3] Skolnik M I. Radar Handbook, 3nd ed, New York: McGraw-Hill, 2008: 1170-1236.
- [4] Schleher D C. Electronic Warfare in the Information Age. Longdon: Artech House, 1999: 1-90.
- [5] 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. 电子学报, 2007, 35(3): 454-458.  
Zhao Yan-li, Wang Xue-song, and Wang Guo-yu, et al. Tracking technique for radar network in the presence of multi-range-false-target deception jamming. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(3): 454-458.
- [6] 赵艳丽, 周颖, 王雪松等. 基于动力学模型的有源假目标鉴别方法. 国防科技大学学报, 2007, 29(6): 60-65.  
Zhao Yan-li, Zhou Ying, and Wang Xue-song, et al. Algorithm of discriminating active decoys and radar target based on the dynamic model. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(6): 60-65.
- [7] 赵艳丽, 王雪松, 饶彬等. 利用雷达滤波进行空间有源假目标识别的原理和方法. 自然科学进展, 2008, 18(4): 456-465.  
Zhao Yan-li, Wang Xue-song, and Rao Bin, et al. Discrimination theory and method for exo-atmospheric active decoy based on the radar filtering. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(4): 456-465.
- [8] 王国玉, 汪连栋等. 雷达电子战系统数学仿真与评估. 北京: 国防工业出版社, 2004: 286-289.
- [9] Li X R and Jilkov V P. A survey of maneuvering target tracking—part II: ballistic target models. *Proceeding of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets*, 2001, 4473: 559-581.
- [10] 王志刚, 施志佳. 远程火箭与卫星轨道力学基础. 西安: 西北工业大学出版社, 2006: 92-93.
- [11] Chang C B. Ballistic trajectory estimation with angle-only measurements. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1980, 25(3): 474-480.

饶 彬: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为导弹攻防对抗、雷达数据处理等。

肖顺平: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统理论。

赵志超: 男, 1977 年生, 博士生, 工程师, 研究方向为信息融合。

赵艳丽: 女, 1977 年生, 博士, 研究方向为导弹攻防对抗。

王雪松: 男, 1972 年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统理论。