

文章编号:1001-2486(2007)05-0060-06

基于动力学模型的有源假目标鉴别方法*

赵艳丽¹,周颖²,王雪松¹,罗佳¹,王国玉²

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南长沙 410073; 2. 洛阳061信箱,河南洛阳 471003)

摘要:针对导弹防御中可能出现的有源假目标欺骗干扰,从雷达数据处理的层次上进行了真假目标鉴别研究。利用自由段有源假目标与实体目标在动力学模型上的本质差异,提出了动力学模型匹配系数的概念,推导出理想条件下的动力学模型匹配系数的解析表达式。在弹道目标跟踪的基础上设计了有源假目标鉴别算法。结合中程弹道,进行了真假目标鉴别的计算机仿真实验。实验结果表明,所提算法能有效鉴别有源假目标。

关键词:有源假目标;鉴别;动力学模型匹配系数;弹道目标跟踪

中图分类号:TN95 **文献标识码:**A

Algorithm of Discriminating Active Decoys and Radar Target Based on the Dynamic Model

ZHAO Yan-li¹, ZHOU Ying², WANG Xue-song¹, LUO Jia¹, WANG Guo-yu²

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Post Box 061, Luoyang 471003, China)

Abstract: The problem of discriminating active decoys and radar target was studied based on the radar data processing in the background of missile defense. On the basis of the essential difference of the dynamic model between those active decoys and the real target, the concept of dynamic model match coefficient was proposed. The analytic expression of the coefficient was presented without considering the radar measurement noise. The discrimination threshold was designed based on the radar tracking data. The computer simulation was carried out with the background of an intermediate range ballistic trajectory. The feasibility and validity of the proposed algorithm was verified by the simulation results.

Key words: active decoy; discrimination; dynamic model match coefficient; ballistic target tracking

采用设计得很好的假目标对付导弹防御系统是一个公认的可以采用的方法^[1-3]。有源假目标欺骗干扰因其高效的性价比,引起人们对其对抗策略与技术研究的普遍关注^[4-7]。随着微波技术、数字射频存储技术以及微电子技术的快速发展,有源干扰系统已经发展到可以自主产生在能量、波形等方面与目标雷达回波信号高度逼近的假目标。对于在时域、频域甚至极化域上都与真实雷达回波信号特征相差无几的假目标信号,传统的抗干扰措施^[7],如采用旁瓣消隐、天线低旁瓣、重频捷变、多参数捷变、低截获概率波形、专有电路等,以及基于信号处理的假目标鉴别方法,诸如:自相关分析法^[8]、波形分析法^[8]、幅度起伏特性鉴别法^[9]、单极化假目标鉴别^[10-11]等,可能都无法奏效。雷达信号处理系统无法鉴别的有源假目标干扰信号会进入雷达数据处理系统,甚至形成稳定的航迹,多个假目标会严重消耗雷达资源,甚至使雷达将其误判为真目标,对其发射拦截导弹,这对现代雷达防御系统无疑是一个巨大的威胁。

如何在数据处理环节鉴别有源假目标,目前的研究甚少。本文以导弹防御中能形成稳定航迹的有源多假目标为例,进行了基于动力学模型的鉴别研究。目标动力学模型是对目标运动规律的假设,是雷达数据处理中目标跟踪滤波的前提。有源假目标与实体目标在动力学特性上存在本质差异,而跟踪滤波中默认的动力学模型是依据实体目标的运动特性而建立,这必然会引起有源假目标的滤波失配。基于这种思想,根据动力学模型失配程度即可鉴别真假目标。论文首先分析了自由段目标动力学模型匹

* 收稿日期:2007-03-08

基金项目:全国优秀博士学位论文专项资助项目(08100101)

作者简介:赵艳丽(1977—),女,博士生。

配系数,推导了其理论解析表达式;接着介绍了有源假目标鉴别算法;最后给出了仿真鉴别实验以及结论。

1 自由段目标动力学模型匹配系数

目标动力学模型是对目标运动规律的假设,有了这些假设才能获得目标跟踪时的状态方程。当雷达对自由段飞行的弹道目标进行跟踪时,在没有先验信息的情况下,默认该目标是真实存在的实体目标,认为其动力学模型符合标准“二体运动”方程。对于有源欺骗干扰假目标,它并不是客观存在的实体目标,它所表现出的运动特性只是干扰机实体运动特性的一种映射,譬如路灯下匀速前进的人的影子的运动。文献[12,15]指出,对于自由段飞行的弹道目标,根据二体运动方程,给定一系列角度量测序列可唯一确定一条弹道轨迹。由此可知,对于角度量测序列和真目标相同而径向距离和真目标不同的有源距离假目标,其动力学特性必不符合二体运动规律。因此当在雷达目标跟踪中,若对有源假目标采用二体运动动力学模型,则必然导致较大的模型失配。本文中提出用动力学模型匹配系数来表征这种模型匹配程度,下面进行详细介绍和分析。

对于服从二体运动方程的自由段飞行目标,在无雷达观测噪声条件下,某一时刻 k ,在雷达站东北天直角坐标系下的位置矢量为 $[x \ y \ z]$,速度矢量为 $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]$,加速度矢量为 $[x'' \ y'' \ z'']$,则在假定地球为标准圆球且不考虑地球自转的条件下,目标的运动加速度满足下述公式^[1]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -ux/R_e^3 \\ \ddot{y} = -uy/R_e^3 \\ \ddot{z} = -u(z+R_e)/R_e^3 \end{cases} \quad (1)$$

其中, u 是地球引力系数, R_e 是地球半径, R_0 是目标到地心的距离, $R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + R_e)^2}$ 。

定义目标位置函数:

$$g(x, y, z) = \frac{u}{x^2 + y^2 + (z + R_e)^2} \quad (2)$$

定义动力学模型匹配系数:

$$M = a - g(x, y, z) \quad (3)$$

其中, a 表示目标运动加速度的模值, $a = \sqrt{x''^2 + y''^2 + z''^2}$ 。

对于仅受地心引力作用的真目标,根据公式(1)、(2)、(3)可知,其动力学模型匹配系数满足:

$$M \equiv 0 \quad (4)$$

下面分析有源距离假目标在上述定义下的动力学模型匹配系数。假定某时刻 k 真实目标在雷达站东北天坐标系下的球坐标表示为 (r, φ, θ) ,则相应地,对于一个延时 Δt 后转发的有源距离假目标,其延迟距离为 $\Delta r = c\Delta t/2$,则假目标的球坐标表示为 $(r + \Delta r, \varphi, \theta)$ 。假定真目标的位置、速度、加速度已知,则相应地可推导出 k 时刻假目标的运动加速度。由于篇幅所限,推导过程在这里不详细描述。假目标的加速度近似解析表示为

$$a_f = \left[\left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right)^2 a^2 + 2\left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) \frac{\Delta r}{r^2} \cdot a \cdot \cos\theta_3 \cdot (3v^2 \cos^2\theta_1 - v^2 - a \cdot r \cdot \cos\theta_3) - 4\left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) \frac{\Delta r}{r^2} \cdot v^2 \cdot a \cdot \cos\theta_1 \cos\theta_2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

其中, v 是真目标的速度模值, a 是真目标的加速度模值, $\cos\theta_1$ 是目标位置矢量和速度矢量之间的夹角余弦, $\cos\theta_2$ 是目标速度矢量和加速度矢量之间的夹角余弦, $\cos\theta_3$ 是目标位置矢量和加速度矢量之间的夹角余弦。

对应的假目标的位置函数为

$$g(x_f, y_f, z_f) = \frac{u}{x_f^2 + (y_f + R_e)^2 + z_f^2}$$

$$= \frac{u}{(1+\Delta r/r)^2 x^2 + (1+\Delta r/r)^2 y^2 + [(1+\Delta r/r)z + R_c]^2} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可表示假目标的模型匹配系数:

$$M = a_f - g(x_f, y_f, z_f) \quad (7)$$

显然,假目标的动力学匹配系数 M 是真目标的位置、速度、加速度矢量以及假目标延迟距离 Δr 的非线性时变函数。对于 $\Delta r \neq 0$ 的假目标,通常有 $M \neq 0$,因此可以用 M 作为有源假目标的鉴别特征量。

2 有源假目标鉴别方法

在实际的雷达多目标跟踪中,存在着雷达量测噪声,这会导致关联误差及滤波误差。在本文的研究中,假定数据关联最优,不存在数据关联错误,只考虑滤波误差。对于自由段飞行目标,其运动微分方程如式(1)所示,据此可建立包含目标位置、速度两状态的运动状态方程。对雷达的某一条滤波航迹(不管是来自于真目标还是假目标),设 k 时刻滤波状态矢量为 $\hat{X}(k) = [\hat{x}(k) \ \hat{y}(k) \ \hat{z}(k) \ \hat{\dot{x}}(k) \ \hat{\dot{y}}(k) \ \hat{\dot{z}}(k)]^T$, 滤波协方差矩阵为 $P(k)$, $k+1$ 时刻滤波状态矢量为 $\hat{X}(k+1) = [\hat{x}(k+1) \ \hat{y}(k+1) \ \hat{z}(k+1) \ \hat{\dot{x}}(k+1) \ \hat{\dot{y}}(k+1) \ \hat{\dot{z}}(k+1)]^T$, 滤波协方差矩阵为 $P(k+1)$, 则 k 时刻目标的运动加速度的模值估计为

$$a(k) = \frac{1}{\Delta T} \sqrt{(\hat{\dot{x}}(k+1) - \hat{\dot{x}}(k))^2 + (\hat{\dot{y}}(k+1) - \hat{\dot{y}}(k))^2 + [\hat{\dot{z}}(k+1) - \hat{\dot{z}}(k)]^2} \quad (8)$$

其中 ΔT 为雷达采样间隔, $\Delta T = t_{k+1} - t_k$, 则 k 时刻动力学模型匹配系数为

$$M = \sqrt{\hat{a}_x^2(k) + \hat{a}_y^2(k) + \hat{a}_z^2(k)} - \frac{u}{x^2(k) + y^2(k) + [z(k) + R_c]^2} \quad (9)$$

由式(8)~(9)可知 k 时刻目标动力学模型匹配系数 M 是 $\hat{X}(k)$ 和 $\hat{X}(k+1)$ 的非线性函数,其物理意义是通过检验 $\hat{x}(k), \hat{y}(k), \hat{z}(k), \hat{\dot{x}}(k), \hat{\dot{y}}(k), \hat{\dot{z}}(k)$ 及 $\hat{\dot{x}}(k+1), \hat{\dot{y}}(k+1), \hat{\dot{z}}(k+1)$ 之间的一致性来衡量所跟踪的目标的动力学模型匹配程度。

在导弹防御系统中,指挥、控制、决策系统需要雷达实时给出真假目标的鉴别结果,以便综合各种其它鉴别方法,最后给出融合后的决策。通常来说,把真目标误判为假目标的错误代价要比把假目标误判为真目标要大,因此,在真假目标鉴别中,要在保证真目标以很高概率成功鉴别的前提下(譬如95%),最大程度地鉴别假目标。由上一节的分析可知,对于真目标,不考虑雷达观测噪声条件, $M=0$ 。经过近似无偏估计的跟踪滤波,如式(9)所示的 M 值其均值近似为0,所以鉴别门限 T_d 应该由 M 的方差实时确定。对于任一给定的航迹,其真假鉴别准则为:

$$D = \begin{cases} 1(\text{真目标}) & |M| \leq T_d \\ 0(\text{假目标}) & |M| > T_d \end{cases} \quad (10)$$

通常雷达距离量测误差、角度量测误差服从零均值高斯分布,无偏估计的滤波算法得到的状态估计误差均值为零,滤波协方差矩阵可代表滤波状态的 1σ 误差概率分布^[4],也就是, $x(k), y(k), z(k), \dot{x}(k), \dot{y}(k), \dot{z}(k)$ 及 $\dot{x}(k+1), \dot{y}(k+1), \dot{z}(k+1)$ 的误差分布可用 $P(k)$ 和 $P(k+1)$ 对角线上的元素来表示。在此基础上,理论上可根据自由段弹道目标的运动方程,推导出 $x(k)$ 与 $x(k+1)$ 、 $y(k)$ 与 $y(k+1)$ 、 $z(k)$ 与 $z(k+1)$ 之间的相关性,然后确定式中 $\hat{a}_x(k), \hat{a}_y(k), \hat{a}_z(k)$ 的误差统计分布,进而确定式(9)中 M 的误差统计特性,最终根据设定的真目标成功鉴别概率确定相应的鉴别门限 T_d 。但由于上述过程繁琐,涉及到非线性滤波、非独立的两个随机变量的函数的误差分布等,因此难以得到解析表达式。本文中通过理论分析结合计算机仿真发现,在一定的真目标成功鉴别概率的前提下,鉴别门限存在一定的规律,下面进行简要描述。

定义 k 时刻变量 $\delta a_x, \delta a_y, \delta a_z, \delta a$:

$$\begin{cases} \delta a_x = [\sqrt{P_k(4,4)} - \sqrt{P_{k+1}(4,4)}] / \Delta T \\ \delta a_y = [\sqrt{P_k(5,5)} - \sqrt{P_{k+1}(5,5)}] / \Delta T \\ \delta a_z = [\sqrt{P_k(6,6)} - \sqrt{P_{k+1}(6,6)}] / \Delta T \end{cases} \quad (11)$$

$$\delta a = \frac{\dot{a}_x}{\dot{a}} \delta a_x + \frac{\dot{a}_y}{\dot{a}} \delta a_y + \frac{\dot{a}_z}{\dot{a}} \delta a_z \quad (12)$$

其中, $P_k(i, i)$ 表示滤波协方差矩阵 $P(k)$ 中的第 i 个主对角元素。

经多次蒙特卡罗仿真发现,在一定的真目标成功鉴别概率的前提下, k 时刻鉴别门限 T_d 与 δa 之间近似存在如下关系:

$$T_d = k_1 \delta a + k_2 \quad (13)$$

其中, k_1, k_2 为常数, k_1, k_2 与雷达跟踪数据率、距离及角度量测标准差有关。对于给定的仿真场景, k_1, k_2 可通过多次蒙特卡罗仿真确定其经验值。

3 仿真实验

仿真场景如下:假定地球为一标准匀质圆球,不考虑地球自旋,计算真实目标对应的一条最小能量弹道。关机点高度为 80km,关机点速度为 2500m/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° ,则落点位置约为东经 6.83° ,北纬 0° ,射程约为 760km。假定雷达的布站位置是北纬 1.5° ,东经 4.5° 。为使转发式有源假目标欺骗干扰效果更好,常见的情形是干扰机每次转发的干扰个数相同、相对延迟时间固定(使得真假目标径向距离的变化一致)。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压处理后,产生的假目标个数为 6 个,相对于真目标的延迟时间分别为 $-30\mu\text{s}$ 、 $-20\mu\text{s}$ 、 $-10\mu\text{s}$ 、 $10\mu\text{s}$ 、 $20\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$,对应的延迟距离为 -4.5km 、 -3km 、 -1.5km 、 1.5km 、 3km 、 4.5km ,其中“-”表示超前于真目标。

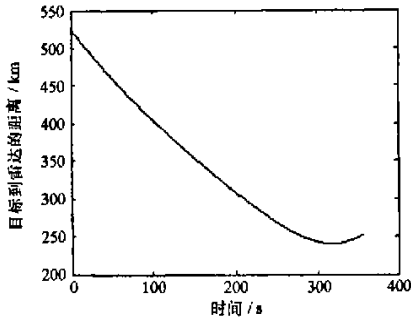


图1 目标到雷达的径向距离
Fig.1 The range from the target to radar

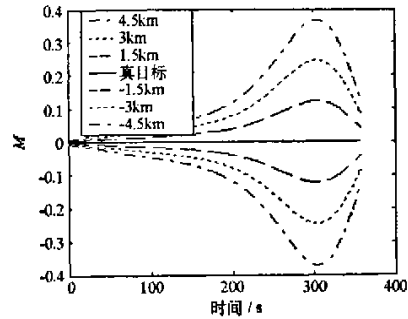


图2 解析求出的 M 值
Fig.2 The analytic value of M

图1给出了真目标到雷达的径向距离,图2给出了根据式(7)解析求出的真假目标的模型匹配系数 M 。很容易得到如下结论:同一时刻,相对于同一目标,假目标的延迟(超前)距离 Δr 越大,假目标的模型匹配系数的 $|M|$ 值越大,也就是失配程度越显著;相同延迟(超前)时间的假目标的模型匹配系数近似对称于 0 分布。

在设计有源假目标干扰时,进攻方总是力争将有源假目标的时域、频域特性设计得与真实雷达回波近似。通常来说,假目标的干噪比(JNR)比真目标的信噪比(SNR)要高几个甚至十几个 dB,此时利用本文的鉴别算法更有利于鉴别出有源假目标。为了验证本文的鉴别算法在更不利的情况下的性能,不妨假定假目标的干噪比(JNR)与真目标的信噪比(SNR)相等,进而雷达对真假目标的量测误差相等。为简化起见,不妨假设在目标跟踪过程中雷达距离、角度量测标准差不变。对于精密跟踪测量雷达,假定两种情形:情形 I 为距离量测标准差为 1m,角度量测标准差为 0.1mrad;情形 II 为距离量测标准差为 3m,

角度量测标准差为 0.3mrad 。以弹道目标跟踪中最典型的扩展卡尔曼滤波为例,进行仿真鉴别实验,雷达跟踪数据率为 1Hz 。为对扩展卡尔曼滤波中的线性化误差进行补偿,引入人为过程噪声^[16],设 $\mathbf{Q} = 10^{-5}\mathbf{I}$,其中 \mathbf{I} 为 6 阶单位矩阵。情形 I 的鉴别门限设定为 $T_d = 20\delta_a + 0.003$;情形 II 的鉴别门限设定为 $T_d = 22\delta_a + 0.003$ 。

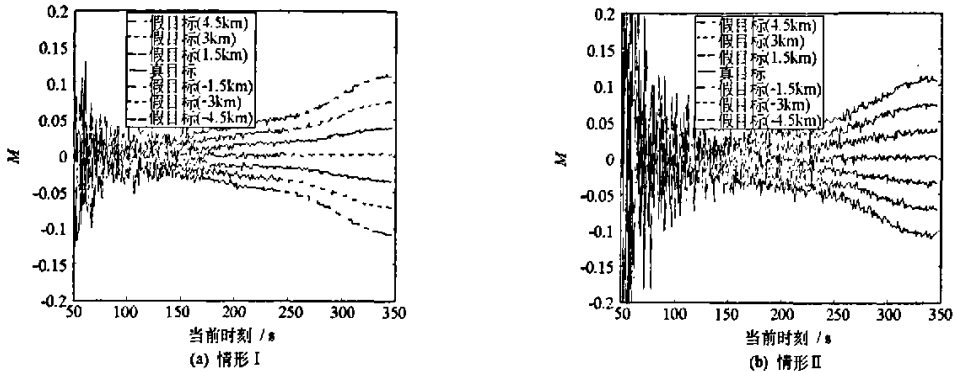


图3 单次滤波真假目标动力学模型匹配系数

Fig. 3 The dynamic model match coefficients for real target and active decoys in one run

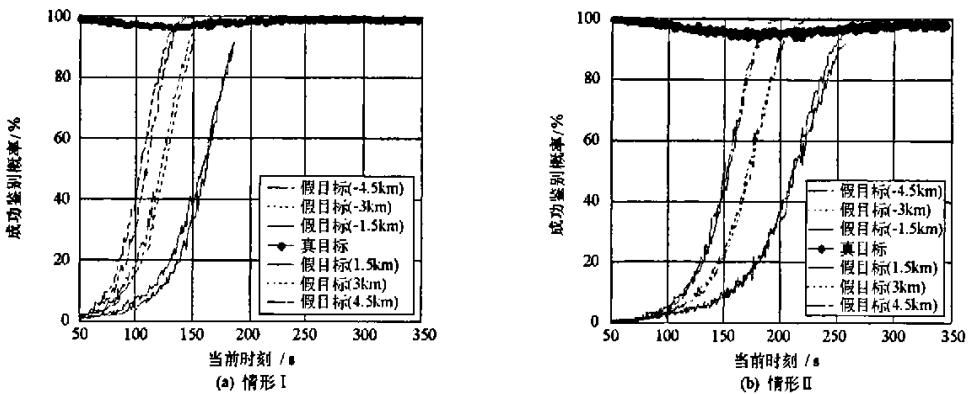


图4 真假目标成功鉴别概率

Fig. 4 The probability of success for discriminating real target and active decoys

对扩展卡尔曼滤波后形成的真假目标的稳定航迹分别计算其动力学模型匹配系数。图3中(a)、(b)两幅图分别给出了量测误差 I、II 对应的单次滤波后的真假目标动力学模型匹配系数。与图2相比较,显然滤波后的 $|M|$ 值变小。对于延迟距离为正的假目标,其模型匹配系数 $M > 0$,滤波使得这些假目标的 M 系数增加了负的误差;而对于延迟距离为负的假目标,其模型匹配系数 $M < 0$,滤波使得这些目标的 M 系数增加了正的误差。这从一个侧面反映了扩展卡尔曼滤波器的鲁棒性。比较图(a)、(b),显然,量测误差越大,真假目标的 M 系数的可区别性越差。

各条稳定航迹的 M 系数与各自对应的鉴别门限 T_d 相比较,可实时获得其鉴别结果。图4中(a)、(b)两幅图给出了两种情形下的真假目标的成功鉴别概率,蒙特卡罗仿真次数为 1000 次。两幅图中,最上方的曲线对应真目标的成功鉴别概率,它一直保持在 95% 以上。从左到右的 3 对曲线分别对应延迟距离为 $\pm 4.5\text{km}$ 的假目标、延迟时间为 $\pm 3\text{km}$ 的假目标、延迟时间为 $\pm 1.5\text{km}$ 的假目标的成功鉴别概率。假目标的成功鉴别概率随着时间的推进而提高。同一时刻,假目标延迟(超前)距离越大,其成功鉴别概率越高。比较图(a)、(b)可知,量测误差越大,假目标可以被 100% 成功鉴别出的时间越晚。这和图3得出的结论是一致的。

改变仿真情景,包括采用不同射程的弹道、改变雷达相对部署位置、改变雷达跟踪数据率、改变雷达量测误差等,采用本文的鉴别方法,基本得到类似结论。限于篇幅,这里不一一列举。

4 结论

本文研究了数据处理层次上的有源假目标鉴别问题,提出了动力学模型匹配系数的概念,推导了其解析表达式,设计了有源假目标的鉴别方法,最后给出了鉴别实验。实验结果表明,本文提出的算法在一定的时间内,能以较高的概率成功鉴别出超过一定延迟时间的假目标。基于动力学模型来鉴别有源假目标的方法,不仅可以用在本文所示的自由段弹道有源假目标的鉴别中,还可以推广到如匀速直线运动、匀加速度直线运动、圆周运动等其它具有规范动力学模型的飞机类有源假目标的鉴别中。

另外,本文有源假目标的鉴别研究可以为突防方设计多假目标干扰提供指导。在多假目标干扰中,只有延迟时间在一定范围内的假目标在一段时间内能发挥作用,而其它的假目标虽然消耗了干扰机的能量,但可能自始至终都不起作用。如何设计灵巧的欺骗干扰机,使得有效假目标的个数、假目标的有效时间满足特定战术要求,是导弹突防方必须关注的问题。

本文针对情形是比较稀疏的多假目标,其目标关联误差可以忽略,但在密集多假目标情况下,目标关联误差可能对动力学模型匹配系数产生相当大的影响,这是下一步将要研究的问题。

参考文献:

- [1] 史岩译. 新兴导弹国家对抗 NMD 系统手段概述[J]. 863 先进防御技术通讯(A类), 2001, 7:27-46.
- [2] 舍曼·弗兰克尔. 用有源假目标挫败战区导弹防御雷达(连载一)[J]. 863 先进防御技术通讯(A类), 1997(11): 25-35.
- [3] 舍曼·弗兰克尔. 用有源假目标挫败战区导弹防御雷达(连载二)[J]. 863 先进防御技术通讯(A类), 1997(12): 30-39.
- [4] 周颖, 施龙飞, 等. 密集干扰环境下相控阵雷达资源管理优化研究[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 999-1003.
- [5] 施龙飞, 周颖, 等. LFM 脉冲雷达恒虚警检测的多目标干扰研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(5): 818-822.
- [6] 王雪松, 刘建成, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学(E辑, 信息科学), 2006, 36(8): 891-901.
- [7] 闵庆义. 有源假目标干扰及其抗干扰[J]. 航天电子对抗, 1996(1): 1-5.
- [8] 顾尔顺. 有源欺骗干扰的对抗技术[J]. 航天电子对抗, 1998(3): 13-16.
- [9] 李建勋, 秦江敏, 等. 运用模式分类的雷达抗转发式距离欺骗干扰方法[J]. 雷达与对抗, 2004(1): 30-32, 68.
- [10] 李永祺, 王雪松, 等. 基于 IPPV 的真假目标极化鉴别算法[J]. 现代雷达, 2004, 26(9): 38-42.
- [11] 王涛, 王雪松, 肖顺平. 随机调制单极化有源假目标的极化鉴别研究[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 611-617.
- [12] Chang C B. Ballistic Trajectory Estimation with Angle-only Measurements [J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1980, 25(3): 474-480.
- [13] Li X R, Jilkov V P. A Survey of Maneuvering Target Tracking—Part II: Ballistic Target Models[C]//Proceeding of SPIE Conference on Signal and Data Processing of Small Targets, San Diego, CA, 2001, 559-581.
- [14] Bar-Shalom Y, Li X R. Multitarget-multisensor Tracking: Principles and Techniques [M]. YBS, Storrs, CT, 1995: 444-445.
- [15] Kirubajan T, Bar-Shalom Y, Wang Y. Passive Ranging of a Low Observable Ballistic Missile in a Gravitational Field [J]. IEEE Transaction on AES, 2001, 37(2):481-494.
- [16] Bar-Shalom Y, Fortmann T E. Tracking and Data Association [M]. New York: Academic Press, 1988: 106-118.

