

文章编号:1001-9014(2009)03-0218-06

中段弹道目标群的红外成像仿真研究

林两魁^{1,2}, 谢恺³, 徐晖¹, 安玮¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 94810 部队, 江苏 南京 210007;

3. 炮兵学院 军用光电工程教研室, 安徽 合肥 230031)

摘要:建立中段弹道目标的简化辐射模型和基于点扩散与拖尾的红外焦平面模型,结合目标群中各目标的运动位置和空间目标投射到二维焦平面位置坐标的计算,仿真天基低轨红外传感器对中段弹道目标群的成像.分析仿真结果,发现中段弹道目标群的存在对天基红外传感器的目标探测与跟踪提出了新的要求,并给出一些解决途径.

关键词:中段弹道;目标群;探测;超分辨;跟踪

中图分类号:TN21 **文献标识码:**A

RESEARCH ON INFRARED IMAGING SIMULATION OF MIDCOURSE BALLISTIC OBJECT TARGET COMPLEX

LIN Liang-Kui^{1,2}, XIE Kai³, XU Hui¹, AN Wei¹

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

2. 94810th Unit, Nanjing 210007, China;

3. Military photoelectricity Engineering T&R Section, Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: The simplified radiance model of midcourse ballistic target and the infrared focal plane model based on point spread function and target tail were presented. By integrating the calculations for target space position and the position in 2-D focal plane projected from 3-D space, the imaging of midcourse ballistic object target complex in space-based infrared sensor was simulated. By analysing the simulation results, it was found out that the midcourse ballistic object target complex would give rise to new challenges for detection and tracking techniques of space-based infrared sensor. The methods to solve these challenges were given here.

Key words: midcourse ballistic; object target complex; detection; super-resolution; tracking

引言

对中段弹道目标的探测跟踪是弹道导弹防御的重要环节.通过低轨红外传感器组网,能对中段弹道目标进行全程跟踪,且其较高的分辨率可提供目标的高精度位置和速度信息.因此,利用天基低轨红外传感器探测中段弹道目标已成为未来弹道导弹防御系统的重要探测手段^[1,2].

然而,出于突防需求,一旦弹道导弹进入弹道中段, PBV (Post-Boost Vehicle) 将释放出多种不同类型目标;这些目标一般包括弹头、诱饵、残骸、姿态控制器、铂条等,相互之间距离很近,且具有相似的弹道特性,构成了密集目标群,挑战弹道导弹防御系统的

红外目标探测、跟踪和识别能力.

国外对中段弹道目标群的红外成像仿真方面进行过深入的研究,并形成工业标准软件^[1-4],所采用的技术尚未见于相关文献.

本文研究天基低轨红外传感器对中段弹道目标群的成像仿真问题,以支撑对中段弹道目标群的探测、超分辨与组跟踪算法研究,并依据仿真结果,探讨中段弹道目标群的存在对天基红外传感器的目标探测与跟踪技术提出的新要求,并给出解决途径.

1 中段弹道目标模型

中段弹道目标模型一般考虑两个方面:目标辐射模型和目标群的运动模型.本文仅考虑目标群对

收稿日期:2008-9-16,修回日期:2008-12-26

基金项目:中国博士后科学基金(20080430223)

作者简介:林两魁(1980-),男,福建东山人,博士生,主要研究方向为空间信息对抗、综合电子战系统与技术.

Received date: 2008-9-16, revised date: 2008-12-26

传感器的目标探测跟踪所造成的影响,对目标辐射模型进行适当简化。

1.1 目标辐射模型

目标的温度、在焦平面上的投影面积和翻滚率是目标辐射模型的 3 个要素^[5]。

根据普朗克公式,黑体的辐射出射度如下

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{hc/(\lambda KT)} - 1}, \quad (1)$$

其中, h 为普朗克常量, c 为光速, K 为波尔兹曼常数; T 为黑体的绝对温度, λ 为波长。视黑体为理想漫反射体,则辐射亮度为

$$L(\lambda, T) = M(\lambda, T)/\pi. \quad (2)$$

采用长波段对深空背景下的中段弹道目标进行探测,在波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 对辐射出射度积分,

$$L(\lambda_1, \lambda_2, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(\lambda KT)} - 1} d\lambda. \quad (3)$$

中段弹道目标可视为灰体,考虑上述要素,其辐射强度可由下式模拟

$$I_i(t) = A_i(1 + A_n \cos(\theta_i + R_i t)) \varepsilon_i L_i(\lambda_1, \lambda_2, T_i), \quad (4)$$

式中, A_i 为目标 i 在焦平面的平均投影面积; A_n 为目标 i 投影面积的变化幅度值; θ_i 为目标 i 初始指向角; R_i 为目标 i 翻滚率; t 为传感器对目标 i 的观测时间; ε_i 为目标 i 辐射率; L_i 为目标 i 在 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 波段的辐射亮度。

利用辐射照度度量入射到接收孔径上的辐射能量,

$$E_i = \tau_i I_i / r_i^2, \quad (5)$$

其中, τ_i 为传感器光学系统的透过率; r_i 为目标与传感器之间的距离。

焦平面接收到的目标辐射能量由下式确定,

$$S_i = \Delta t_i \cdot \int_{\text{aperture}} E_i ds = \frac{\tau_i \pi D^2}{4} \frac{I_i \Delta t_i}{r_i^2}, \quad (6)$$

其中, D 为传感器孔径直径, Δt_i 为探测元驻留时间。利用式(6)即可方便快捷计算出目标投射于红外焦平面的辐射能量值。

1.2 目标运动模型

对于目标群的释放,可假定群中各个目标在同一时刻从 PBV 中释放出来,这些目标获得瞬时初速度往随机方向扩散,构成三维空间目标群^[6]。

以目标群质心为原点,建立轨道坐标系,采用相对运动法在该坐标系下计算各目标在释放后任意时刻的坐标位置,具体可参考文献^[7]。

2 焦平面成像模型

传统的成像焦平面模型仅考虑传感器光学系统的模糊效应,以点扩散函数来模拟。本文综合考虑传感器光学系统的模糊效应和传感器自身的抖动对成像的影响,并对传感器和目标之间的相对运动造成目标在积分时间内在焦平面上的滑动进行拖尾计算,建立了比较准确的焦平面模型。

2.1 点扩散函数

传感器光学系统的模糊效应以及传感器自身的抖动,使得点目标在红外焦平面的响应将扩散到邻近的若干像素点。描述这种成像模糊效果的重要概念是点扩散函数 PSF(Point Spread Function)。

设点目标 i 具有单位辐射能量幅度, (x_i, y_i) 为其在焦平面坐标系下的连续坐标值。则 PSF 由下式给出^[3],

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_{PSF}^2} e^{-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\sigma_{PSF}^2}}, \quad (7)$$

其中, (x, y) 焦平面坐标系下的坐标,为连续值; σ_{PSF} 是 PSF 的标准方差,描述 PSF 扩散的范围。

焦平面由一系列具有相同尺寸的正方形探测元组成,每个探测元宽度为 d , (x_c, y_c) 为探测元中心,如图 1 所示。

采用 σ_{jitter} 描述传感器的抖动对成像造成的影响,本文将 σ_{jitter} 设定为固定值;而光学系统的模糊对 PSF 的影响则以 σ_{blur} 表示。

与 σ_{blur} 密切相关的物理概念是“EOD”^[3,4,8] (Energy-on-Detector),指当目标点落于探测元中心时,该探测元所捕获到的目标能量百分比。 σ_{blur} 由 EOD 确定,有如下关系,

$$\begin{aligned} \sqrt{EOD} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{blur}^2}} \int_{x-\frac{1}{2}d}^{x+\frac{1}{2}d} e^{-\frac{(x-x_c)^2}{2\sigma^2}} dx \\ &= \Phi\left(\frac{d}{2\sqrt{2}\sigma_{blur}}\right) \end{aligned}, \quad (8)$$

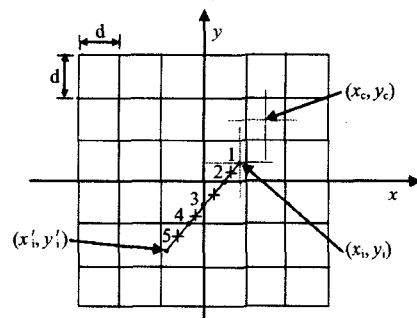


图 1 目标在焦平面上的投射
Fig. 1 Projection of target in focal plane

$$\sigma_{blur} = \frac{d}{2\sqrt{2}\Phi^{-1}(EOD)}, \quad (9)$$

最终,

$$\sigma_{PSF} = \sqrt{\sigma_{jitter}^2 + \sigma_{blur}^2}, \quad (10)$$

将 PSF 在探测元上进行积分可得到该探测元对点目标的响应,

$$g(x_c, y_c) = \int_{x_c-\frac{1}{2}d}^{x_c+\frac{1}{2}d} \int_{y_c-\frac{1}{2}d}^{y_c+\frac{1}{2}d} p(x, y) dx dy. \quad (11)$$

2.2 目标拖尾

在实际成像过程中,传感器和目标之间的相对高速运动,将导致目标在积分时间内在焦平面上滑过一段距离,这种现象称为目标拖尾^[9].

天基红外跟踪传感器的积分时间短,且与目标距离很远,由于目标和传感器的相对运动造成目标在焦平面上的拖尾可近似为一条直线,如图 1 中的 (x_i, y_i) 到 (x'_i, y'_i) 的连线. 可认为目标以恒定速度滑过该直线.

图 1 中, (x_i, y_i) 为开始积分时刻目标落在焦平面上位置点,记为起点; (x'_i, y'_i) 为积分结束时刻目标落在焦平面上的位置点,记为终点.

按下述方法建立目标拖尾模型.

- i. 计算积分时间内目标落在焦平面上的起点和终点,连成线段,该线段即为目标在焦平面上的拖尾轨迹,如图 1 的 1、5 点及两点的连线;
- ii. 计算该线段与探测元边缘的交点坐标,如图 1 中的 2、3、4 点;
- iii. 根据 i、ii 计算出的各点坐标,计算相邻各点之间的中点坐标(如图 1 中的“+”点),并计算线段滑过的各探测元的长度,从而计算出目标在各探测元的驻留时间 Δt_i ;
- iv. 在 iii 计算出的各坐标点处,分别计算 PSF 并对焦平面各探测元进行积分;
- v. 将 iv 计算出来的各探测元响应进行线性叠加,即完成目标拖尾的计算.

2.3 焦平面响应

在焦平面的各探测元上,对每个目标的响应进行线性叠加,构成线性焦平面模型^[2,3].

设目标群有 n 个点目标,在第 k 个成像积分时间内滑过 m_{ik} 个探测元,坐标表示为

$$(x_{ij}(k), y_{ij}(k)), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m_{ik}.$$

焦平面由 $u_{\max} \times v_{\max}$ 探测元组成,对目标群的响应由下式确定,

$$\mathbf{z} = \mathbf{G}\mathbf{s} + \mathbf{n}, \quad (12)$$

\mathbf{z} 是焦平面的响应,为 uv 维列向量; \mathbf{G} 是导向矩阵,

为 $u_{\max} v_{\max} \times \sum_{i=1}^n m_{ik}$ 维,且

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [g(u, v, x_{11}, y_{11}), \dots, g(u, v, x_{nm_{nk}}, y_{nm_{nk}})]_{\substack{u=1, \dots, u_{\max} \\ v=1, \dots, v_{\max}}}$$

\mathbf{s} 是目标入射到焦平面的辐射能量矢量,

$$\mathbf{s} = \frac{\tau\pi D^2}{4} [I_1 \Delta t_{11}/r_1^2 \quad I_1 \Delta t_{12}/r_1^2 \quad \dots \quad I_n \Delta t_{nm}/r_n^2];$$

\mathbf{n} 是噪声矢量,为 uv 维列向量. 各探测元的噪声独立. 本文设定焦平面噪声服从零均值高斯分布.

噪声分布方差由信噪比(SNR)来指定^[3,10].

$$SNR = 10 \log_{10} (\hat{s}_{pixel}^2 / \sigma_n^2), \quad (13)$$

其中,

$$\hat{s}_{pixel}^2 = \sum_{i=1}^{u_{\max} v_{\max}} s_i^2 / (u_{\max} v_{\max}), \quad (14)$$

因此,有

$$\sigma_n^2 = \hat{s}_{pixel}^2 / (10^{SNR/10}). \quad (15)$$

3 目标与焦平面相对几何关系的确定

天基红外传感器对中段弹道目标的成像,将三维空间的目标投射到二维的焦平面. 投射过程涉及到多个空间坐标系的变换. 这些坐标系包括轨道坐标系、传感器坐标系和焦平面坐标系. 坐标系之间的变换通过旋转和平移来实现.

轨道坐标系以目标群质心为原点, X_o 轴沿质心在 ECI 坐标系下的位置矢量方向, Y_o 轴在质心轨道面内垂直 X_o 轴指向运动方向, Z_o 轴则与 X_o 轴和 Y_o 轴成右手系.

传感器坐标系以传感器的透镜中心为其原点 O_s , Z_s 轴为传感器视线方向,在随动成像模式下 Z_s 轴近似指向目标群的质心位置, X_s 和 Y_s 分别与焦平面的两条轴线平行.

焦平面坐标系为二维坐标系,以焦平面中心为其原点 O_f , O_f 距传感器坐标系原点的距离为焦距 f . 传感器坐标系和焦平面坐标系之间的关系如图 2.

轨道坐标系到传感器坐标系的转换,如式(16)

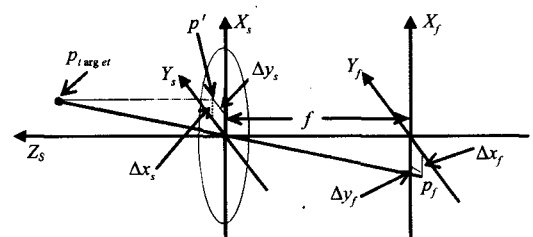


图 2 传感器坐标系与焦平面坐标系
Fig. 2 Sensor and focal plane coordinate frames

表 1 卫星参数

Table 1 Satellite parameters

卫星	高度 (km)	倾角 (deg)	升交点赤经 (deg)	历元时刻升交角距 (deg)
1	1150	55	297.4	110
2	1150	35	0	25

表 2 传感器参数

Table 2 Sensor parameters

焦距	光学 孔径	系统光 透射率	探测元 长度	探测元 个数	EOD
134cm	27cm	0.8	50 μ m	256 \times 256	0.46

$$\mathbf{r}_s = \mathbf{B}\mathbf{r}_o + \mathbf{D} \quad (16)$$

式中, \mathbf{r}_s 、 \mathbf{r}_o 分别为目标在传感器坐标系和轨道坐标系下的坐标; \mathbf{B} 为坐标系旋转矩阵; 而 $\mathbf{D} = [0 \ 0 \ R]^T$, R 为目标群质心到传感器坐标原点的距离。

图 2 中, P_{target} 为目标点, P' 是 P_{target} 在 $X_s Y_s$ 平面上的投影点, Δx_s 、 Δy_s 和 Δz_s 分别为 P_{target} 在传感器坐标系下 X_s 、 Y_s 和 Z_s 分量的长度。

P_{target} 透过传感器透镜中心 O_s 成像在焦平面上的 P_f 点, Δx_f 、 Δy_f 分别为 P_f 在焦平面坐标系下 X_f 、 Y_f 分量的长度, f 为光学焦距。

根据投影几何关系可得到下式:

$$\frac{\Delta x_f}{\Delta x_s} = \frac{\Delta y_f}{\Delta y_s} = \frac{f}{\Delta z_s} \quad (17)$$

因此, 传感器坐标到焦平面坐标的转换关系如下

$$\begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = -\frac{f}{z_s} \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} \quad (18)$$

4 仿真分析

4.1 仿真场景与参数

利用两颗圆轨道卫星对目标进行立体观测, 卫星参数如表 1 所列。

每颗卫星搭载相同的跟踪传感器, 传感器参数如表 2 所列^[4,11]。

目标发射点 (N29. 612°, E118. 944°), 落点 (N38. 779°, E144. 905°), 其远地点高度为 1032. 39km, 发射 60s 后释放目标。相对释放速度在 1 ~ 4m/s 随机取值。

卫星平台与目标群质心的距离如图 3 所示, 以目标释放时刻为时间起点。

4.2 仿真结果

设定目标个数 30, SNR = 10dB。

下图 (a) ~ (d) 为卫星 1 传感器对目标群的成像仿真图; (e) ~ (h) 为卫星 2 传感器对目标群的红

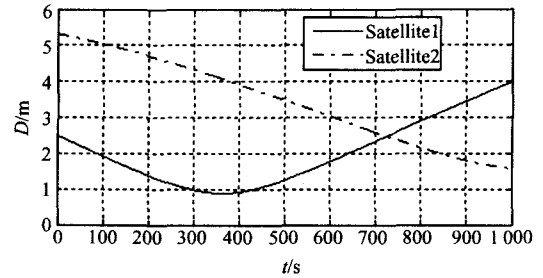


图 3 卫星与目标群质心的距离

Fig. 3 Range of center of target complex from satellites

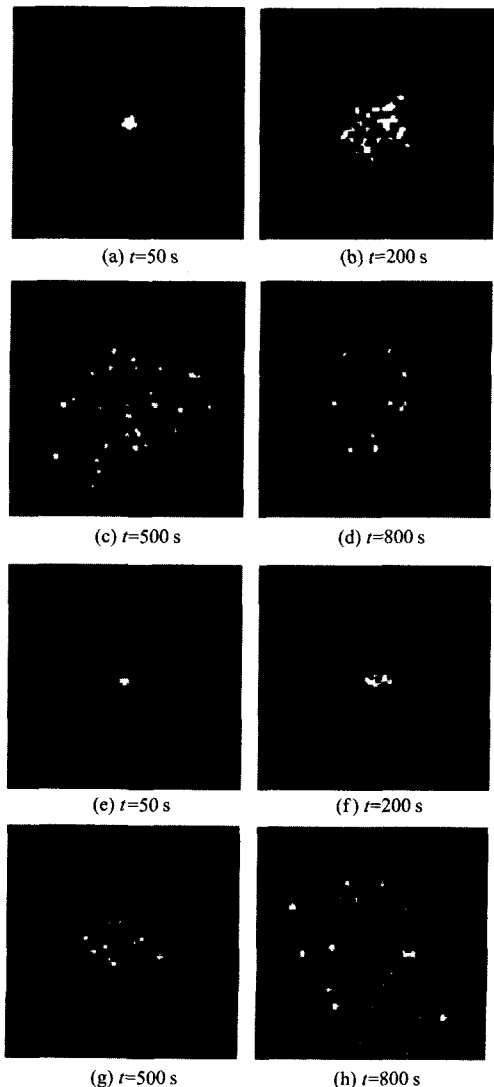


图 4 红外成像仿真结果

Fig. 4 Results of infrared imaging simulation

外成像仿真结果。

4.3 结果分析

在目标释放后初始的一段时间内, 目标相互之间的距离很近, 此外传感器有限的分辨率和传感器与

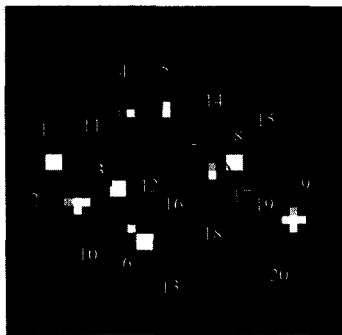


图5 卫星2传感器焦平面成像图
Fig.5 Imaging of focal plane simulation for 2nd Sensor

目标较远的距离,使得目标群投射到传感器焦平面上临近的一片探测元,形成亮斑,如图4(a)、(e)、(f);随着时间推移,目标群逐渐扩散,传感器得以逐渐分辨出其中的多个目标(或目标的组合),如图4(b)、(c)、(g)、(h)。

如图4(c)、(d)所示,一个有趣的现象是,卫星1传感器所成的像中,目标群在500s到800s之间呈现收缩趋势,依据式(16)、(18)可知,这是由于传感器平台和目标群的距离在该时间段内逐渐增大,而距离的增加对成像的影响超过了目标群扩散对成像影响的缘故。这种收缩趋势对目标跟踪监视极为不利。

由仿真结果还可看出,在目标释放后的大部分时间里,焦平面成像中的目标可分为3类。一类是由多个未分辨出的目标在焦平面上形成的具有一定形状的像斑,如图5中1~6,称为“目标簇”(Cluster),目标簇隐藏了其中不同目标的个数、位置和亮度信息,随着目标群的扩散目标簇中的多个目标(或目标组合)得以逐渐分辨出来;另一类目标称为“空间邻近目标”(CSOs, Closely Spaced Objects),是由在整个中段飞行过程中相邻之间距离均保持很近的目标组成,对这类目标传感器在几乎整个目标中段将无法分辨(图5中7~9);最后一类是已分辨出的单个目标(如图5中的10~20),其中目标12、16在焦平面成一条形,此即为目标拖尾产生的效果。

进行十次蒙特卡罗仿真,图6给出了分辨的目标个数随时间变化的情况。可以看出,对卫星1传感器,在目标释放后100s到250s之间,分辨出的目标个数迅速增加;而对卫星2,分辨出来的目标个数稳步上升,在350s到550s之间目标个数增加较快;此外,由于CSOs的存在,对传感器1、2,全过程中均无法完全分辨出30个目标。

在成像过程中,目标群的扩散和传感器与目标

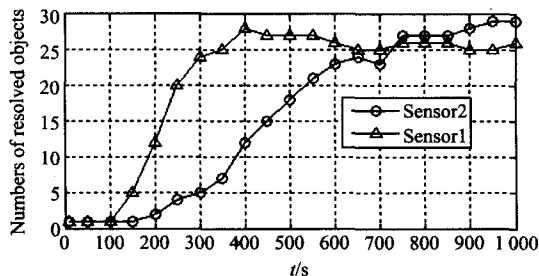


图6 分辨出的目标数目随时间的变化
Fig.6 Variation of resolved object numbers with the time

群的视线、距离等几何关系的变化,再加上传感器有限的分辨率,使得传感器焦平面对目标群的成像中上述3类目标的状态在不断的变化。不同的单目标和CSOs持续反复分离组合,在不同时刻构成不同的Cluster,且不同的传感器在相同时刻对同一组目标也会构成不同类型的目标。

大量已分辨和未分辨目标反复的组合分离构成动态变化的Cluster、CSOs和分辨出的单个目标,这些目标共同组成复杂的焦平面成像图,挑战基于焦平面的红外目标探测和跟踪技术。

对焦平面目标的探测必须充分利用目标形状信息和传感器与目标几何关系的信息,动态识别和修正目标类型。对于CSOs,由于受光学系统衍射和焦平面探测元尺寸的限制,从物理方法上将无法有效分辨出CSOs,这对于目标识别是致命的,只能从算法方面采取措施,这种情况下可采用超分辨(Super-resolution)技术对CSOs目标进行分辨。CSOs超分辨往往借助单传感器的多帧图像或多传感器对同一目标的成像进行融合分辨。

分辨出的目标个数在短时间内的迅速增加,对跟踪系统提出了新要求。一方面,若对分辨出的目标一一进行跟踪起始,将大大增加跟踪系统的数据处理负载,严重时可能瘫痪信息处理系统;另外一方面,目标的动态变化,对单个传感器,不同帧间目标分辨率的动态变化会导致冗余和错误的跟踪,因此往往采用多传感器对目标群进行融合跟踪,而对多个传感器,目标的动态变化使得不同传感器探测的目标类型不一致,而且这种不一致也是动态变化,在多传感器跟踪过程中不可避免将导致目标误关联^[1]。

为在监视系统有限的资源和对目标进行有效探测跟踪之间取得平衡,对目标群进行有效跟踪的一种方法是,在弹道中段对目标群分阶段实行不同跟踪模式^[12]。在目标群释放初期,适合对目标聚类编

组并进行组跟踪(Group Tracking),监视各目标组的质心和形状轮廓变化。一旦有目标从目标组中分离出来,可在维持组跟踪的同时对分离出的目标进行简化的单目标跟踪;随着目标组的进一步扩散,更多的目标得以分辨,此时可转为以单目标跟踪为主,组跟踪为辅助以对单目标跟踪提供信息支持的组合跟踪方式。一旦目标得到彻底分辨,摒弃组跟踪,维持对各分辨出的目标的单目标跟踪。

5 结论

弹道导弹在其弹道中段释放多个不同类型目标,构成目标群,挑战弹道导弹防御系统的红外目标探测、跟踪和识别能力。本文搭建了天基红外传感器对中段弹道目标群的成像仿真框架,建立了简化的目标红外辐射模型和较为真实的焦平面模型,可快速方便地仿真中段弹道目标群的红外成像。对仿真结果进行了详尽的分析,指出中段弹道目标群的存在对天基红外传感器的目标探测、跟踪提出了新的要求,并给出解决途径。

利用本文仿真方法生成的仿真数据可直接运用于 CSOs 超分辨、目标群跟踪算法的研究;搭建的仿真框架可灵活嵌入各种目标辐射模型、运动模型和焦平面模型。其中,对于所建立的简化目标红外辐射模型的验证及建立基于辐射物理特性并考虑目标姿态变化的目标红外辐射模型将是下一步的研究工作。

REFERENCES

- [1] Gadaleta S, Poore A B, Slocumb B J. Pixel-cluster decomposition tracking for multiple IR-sensor surveillance [J]. *Proc. of SPIE*, 2003, **5204**: 270—282.
- [2] Rago C, Landau H. Stereo spatial super-resolution technique for multiple reentry vehicles [J]. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2004, 1834—1841.
- [3] Macumner D, Gadaleta S, Floyd A, et al. Hierarchical closely-spaced objects (CSO) resolution for IR sensor surveillance [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5913**, 591304.
- [4] Korn J, Holtz H, Farber M S. Trajectory estimation of closely spaced objects (CSO) using infrared focal plane data of an STSS (space tracking and surveillance system) platform [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5428**: 387—399.
- [5] Kerekes John P. Parametric analysis of target/decoy performance [J]. *Proc. of SPIE*, 1991, 1483: 155—166.
- [6] Perrella Albert J. Cluster dynamics and object resolution [J]. *Proc. of SPIE*, 1992, **1698**: 248—267.
- [7] LI Su-Dan, REN Xuan. Research of releasing decoy outside atmosphere [J]. *Journal of Astronautics*. (郇苏丹,任萱. 大气层外诱饵释放研究. *宇航学报*), 2001, **22** (2): 100—105.
- [8] LaCroix LEN, Kurzius S. Peeling the onion: an heuristic overview of hill-to-kill missile defense in the 21st century [J]. *Proc. of SPIE*, 2005, **5732**: 225—249.
- [9] Oswald M, Wiedemann C. Program for radar and optical observation forecasting [R]. Technical University of Braunschweig, Germany, 2006.
- [10] Reagan J T, Abatzoglou T J. Model-based superresolution CSO processing [J]. *Proc. of SPIE*, 1993, **1952**: 204—218.
- [11] Lomheim T S, Milne E L. Performance/sizing relationships for a short-wave/mid-wave infrared scanning point-source detection space sensor [J]. *IEEE Aerospace Conference*, 1999, **4**: 113—138.
- [12] Waxman M J, Orummond O E. A bibliography of cluster (group) tracking [J]. *Proc. of SPIE*, 2004, **5428**: 551—560.
- [13] WANG Li-Hui, YU Yun-Jian, LU Duan-Jun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (王立辉,郁蕴健,陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (1): 39—41.
- [14] ZHANG Bi-Yin, ZHANG Tian-Xu, SANG Nong, et al. Novel regularizing filtering method for realtime detecting IR dim small moving target [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张必银,张天序,桑农,等. 红外弱小运动目标实时检测的规整化滤波方法. *红外与毫米波学报*), 2008, **27** (2): 95—100.
- [15] Gray R L. A pure-cartesian formulation for tracking filters [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1993, **29** (3): 749—754.
- [11] Katkovnik V, Egiazarian K, Astola J. Adaptive window size image de-noising based on intersection of confidence intervals (ICI) rule [J]. *J. of Math. Imaging and Vision*, 2002, **16** (3): 223—235.
- [12] Li Shi-Peng, Li Wei-Ping. Shape-adaptive discrete wavelet transforms for arbitrarily shaped visual object coding [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2000, **10** (5): 725—743.
- [13] Guleryuz O G. Weighted averaging for denoising with over-complete dictionaries [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16** (12): 3020—3034.
- [14] Gleich D, Datcu M. Wavelet-based despeckling of SAR images using Gauss-Markov random fields [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45** (12): 4127—4143.
- [15] Donoho D, Johnstone I. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage [J]. *Biometrika*, 1994, **81**: 425—455.
- [16] Foi A, Katkovnik V, Egiazarian K, et al. Inverse half-toning based on the anisotropic LPA-ICI deconvolution [C]. In: *Proc. SMMSP 2004*, 2004: 49—56.

(上接 217 页)