

基于仿真场景的天基红外探测系统性能评估

曹移明,李志国,冷传航,李彬,蔡昱
(中国运载火箭技术研究院研究发展中心,北京 100076)

摘要:利用仿真生成的二维辐射场景数据,提出了一种探测系统性能的评估分析方法,建立了美国天基红外高轨探测系统(SBIRS-H)总体指标与探测性能的关系。该方法以统计的杂波等效目标定量描述了场景杂波大小,并利用信杂比综合表征探测性能,反映出不同系统参数下的探测性能变化规律,可应用在红外探测系统方案分析、设计与评估阶段。

关键词:红外场景;性能评估;探测能力

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.08.008

Performance evaluation of space-based infrared detection system based on simulated scene

CAO Yi-ming, LI Zhi-guo, LENG Chuan-hang, LI Bin, CAI Yu

(China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Center, Beijing 100076, China)

Abstract: An evaluation and analysis method for space-based infrared system (SBIRS-H) performance is proposed based on the simulated radiation scene data. The relationship between overall specifications of detection system and detection performance is built. The scene clutter is quantitatively described by introducing the clutter-equivalent-target. The signal-to-clutter ratio is used to characterize the integrate detection performance, and this method can reflect change rule of detection performance at different parameters. The proposed method could be applied for the analysis, design and evaluation of the infrared detection system.

Key words: infrared scene; performance evaluation; detection ability

1 引言

天基红外探测高轨系统(SBIRS-H)是美国反导防御系统的重要组成部分,对战略战术导弹的预警具有不可替代的作用^[1-2]。SBIRS-H红外探测系统的性能评估是系统方案优化、性能预测的重要依据与手段。

红外探测系统的性能研究方法有三种:性能模型法、仿真法与试验法。国外学者在进行导弹天基红外预警系统性能评估时指出,采用仿真法比性能理论模型有更高的可信度,它避免了对复杂自然场景的模型表征,因而具有更广的应用范围,在红外探测系统方案分析、设计与评估阶段均具备广泛的适

应性。美国在SBIRS系统发展过程中,开发了若干高逼真度的仿真系统,用于评估系统的性能,典型的评估系统包括美国通用研究公司开发的先进监视系统测试平台(AST)^[3]、海军研究实验室开发的战略场景生成模型(SSGM)^[4]以及美国空间公司开发的可见光/红外相机优化、分析与仿真(VISTAS)。本文在仿真生成的红外场景基础上,提出一种可用于评估SBIRS-H红外探测系统性能的方法,建立了红外探测系统主要技术指标(如空间分辨率、像元非均匀性)与探测性能(虚警概率、最弱可探测目标)的关系,为系统方案优化与性能预测提供了方法手段。

2 SBIRS-H 红外探测系统性能表征

一般红外探测系统的性能表征采用信噪比模型,重点考虑了系统噪声的影响。由于噪声特性符合高斯分布,信噪比 SNR、虚警概率 P_f 与探测概率 POD 存在以下关系^[5-6]:

$$\begin{aligned} \text{POD} &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\operatorname{erfc}^{-1}(2P_f) - \frac{\mu}{\sqrt{2}\sigma} \right] \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\operatorname{erfc}^{-1}(2P_f) - \frac{\text{SNR}}{\sqrt{2}} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\operatorname{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-x^2) dx$ 为互补误差函数。

SBIRS-H 红外探测系统的任务是从复杂地球红外背景中检测出可疑的导弹目标点。从信号形成与处理流程看,背景与目标辐射场景进入探测系统后,经由光电变换形成二维图像,交由目标检测算法处理;首先对系统噪声与背景杂波进行抑制,然后从残余杂波图像中经多帧处理算法,进一步剔除杂波,检测目标条痕。若仅考虑系统的目标探测能力,主要体现在背景抑制后的信杂比(SCR)大小,信杂比越高,探测能力越强。

SCR 一方面取决于目标强度与场景复杂程度,另一方面还与系统频率传递特性、成像能力、分辨特性、背景抑制算法等因素密切关联。在评价系统探测能力时,可考虑在相同的场景下,比较所能探测到的最弱目标辐射强度大小。

在 SCR 的表征框架内,系统噪声由系统杂波替代;虚警概率由单帧过门限率(辐射强度超过辐射门限阈值的比率)代替。引入杂波等效目标(CET)表述背景抑制后的残余杂波辐射强度大小。CET 主要来自背景场景辐射的空间起伏、视线运动与抖动引起的杂波噪声,同时与背景抑制算法的阈值有关。其中背景抑制算法的阈值直接影响系统所能探测到的目标辐射强度的大小。在一定过门限率下,阈值辐射强度越小,系统的最弱可探测目标强度越低,代表系统能力越强。

根据式(1),对高斯型噪声(或杂波),信噪比、探测概率与虚警概率(过门限率)的关系具有明确的关系;对地球场景而言,情况则不同。图1给出了典型地球场景经最大中值滤波器背景抑制后的特性统计,同时还给出了高斯分布噪声的处理结果,图1中 CET 为滤波后残余杂波的等效目标强度,Thre 为阈值强度大小, P_{fa} 为单帧过门限率大小。可以看出,场景的幅值分布明显偏离高斯分布,这主要是由于地球背景复杂的辐射分布结构造成,此时不再有

一个类似信噪比与探测能力的解析式(如式(1))可以简单确定系统的性能。需要引入其他非解析方法评估不同系统间的性能差异。

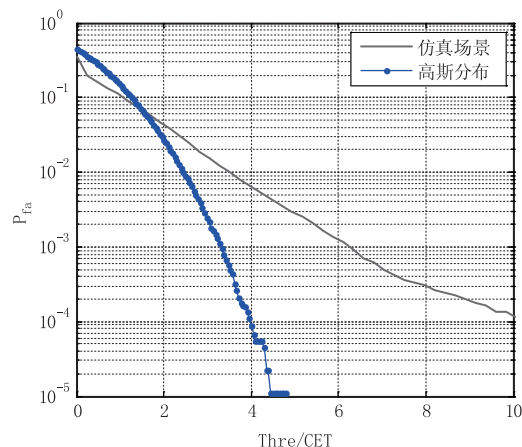


图1 仿真地球场景与高斯分布噪声经滤波后的统计特性

Fig. 1 Statistics characteristics of filtered simulation scene and Gaussian distribution

3 基于仿真场景的性能评估方法

3.1 二维辐射场景分布生成

天基红外探测系统的场景主要包括三部分组成:背景辐射分布、目标与系统噪声。由于导弹与平台间的相对运动,以及目标与背景特性的动态变化,应结合平台与目标的相对运动关系仿真生成动态探测图像。将叠加后的背景与目标场景变换至像面坐标系,加入视轴运动与抖动模糊,经探测器采样后变成空间离散化的信号,叠加探测器噪声,得到光电变换前的二维辐射场景分布。具体流程如图2所示。

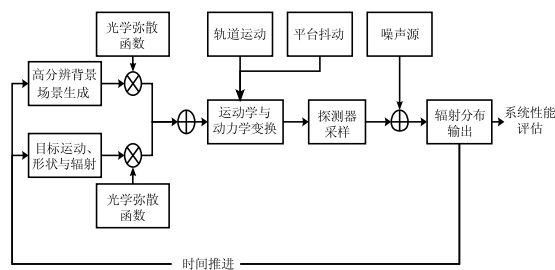


图2 SBIRS-H 红外探测系统图像仿真总体流程

Fig. 2 General flowchart of image simulation for SBIRS-H infrared detection system

3.2 性能评估过程

首先利用高分辨率二维辐射场景对待分析的相机系统进行成像仿真,得到二维空间离散信号;经由选定的目标(预)检测算法进行滤波处理,处理后的二维数据经标定得到目标辐射强度量纲下的数据;分析标定后的二维数据,得到系统探测性能,如单帧过门限率;通过改变相机系统待分析(设计)的参数,循环上述过程,得到不同参数值下的系统探测性

能。以此来分析相机参数变化后系统探测性能的影响趋势,根据系统性能指标的总体要求对相机系统参数进行约束或选择,如图3所示。

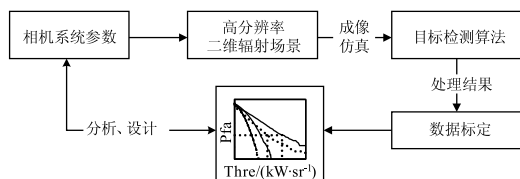


图3 基于仿真场景的探测性能分析

Fig. 3 Detection performance analysis based on scene simulation

4 试验与结果

下面举例来说明基于仿真场景的相机探测性能分析过程。场景大小 300×300 ;背景抑制算法选择最大中值滤波器,检测窗口大小为 3×32 ;像元空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 。这里分析不同像元非均匀性、不同空间分辨率下的相机探测性能,其他成像效应不予考虑。

图4给出了像元非均匀性为2%与10%,扫描方向由上至下的仿真场景及处理结果,均已标定为辐射强度量纲。根据图4(b)、图4(d)的结果统计不同阈值强度下的过门限率,如图5所示,同时给出了等杂波强度下高斯型场景的处理结果。令单帧过门限率为 10^{-3} ,当像元非均匀性2%时,相机可探测到辐射强度大于 944 W/sr 的目标;当像元非均匀性10%时,相机可探测到辐射强度大于 1180 W/sr 的目标。高斯型分布下的探测性能分别为 500 W/sr 与 670 W/sr 。

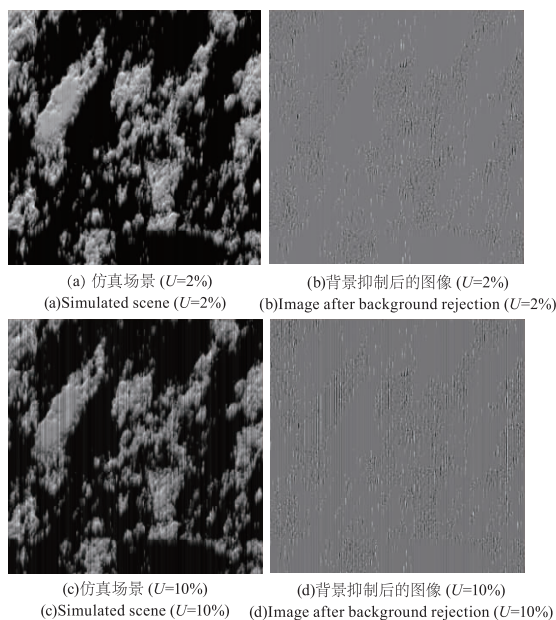


图4 不同像元非均匀性下的仿真场景及处理结果

Fig. 4 Simulated scenes and processed results at different pixel non-uniformities

此外,分析了不同空间分辨率下的相机探测性能,取空间分辨率分别为 1 km 与 2 km ,得到的探测性能结果见图6。令单帧过门限率为 10^{-3} ,当空间分辨率为 1 km 时,相机可探测到辐射强度大于 943 W/sr 的目标;当空间分辨率为 2 km 时,相机可探测到辐射强度大于 1360 W/sr 的目标。高斯型分布下的探测性能分别为 492 W/sr 与 738 W/sr 。

根据上述结果可分析得出:

1) 相机可探测到的最弱目标强度随像元非均匀性与空间分辨率的增大而提高,即非均匀性或像元空间分辨率的增大降低了系统的探测性能;

2) 当面临诸如地球/云层等非高斯型复杂背景杂波时,系统所能探测的最弱目标辐射强度大于高斯型噪声情况,即探测能力降低;

3) 利用本文提出的基于场景的性能评估方法,可以定量比较出不同系统参数下的性能差异,可为相关系统参数确定提供相对有用的参考依据。

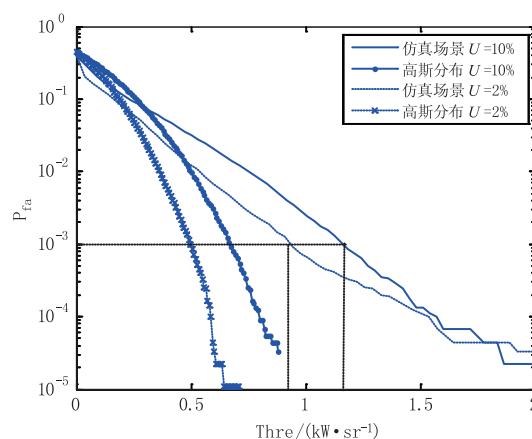


图5 不同像元非均匀性下的相机探测性能

Fig. 5 Detection performance at different pixel non-uniformities

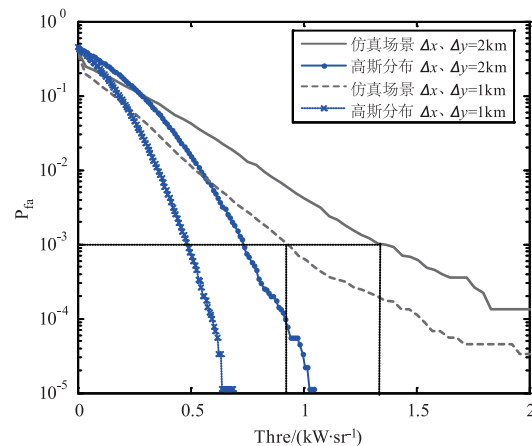


图6 不同空间分辨率下的相机探测性能

Fig. 6 Detection performance at different spatial resolutions

5 结 论

本文围绕 SBIRS-H 红外探测系统模型性能评估问题开展了探索性研究,提出了一种基于仿真场景的 SBIRS-H 红外探测系统性能评估方法。该方法利用仿真生成的场景辐射数据,建立了系统探测能力与系统性能指标的联系,避免了对复杂自然场景的模型表征,可以解决特定系统方案性能的准确评估,以及特定性能指标要求下的系统优化设计问题,可为我国天基红外探测系统设计与评估提供方法支撑。

参考文献:

- [1] LI Xiaojiang, JIN Shan, LIAO Hailing, et al. Analysis on infrared detecting and early warning capabilities of America's SBIRS GEO - 1 satellite. [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(1): 3 - 8. (in Chinese)
李小将, 金山, 廖海玲, 等. 美军 SBIRS GEO - 1 预警卫星探测预警能力分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(1): 3 - 8.
- [2] NI Guoqiang, HAO Qiwei, ZHANG Huaili, et al. Applications of multicolor FPA from the DSP and SBIRS space early warning systems [J]. Laser & Infrared, 2006, 36(11): 1016 - 1019. (in Chinese)
倪国强, 贺琦玮, 张怀利, 等. 从 DSP 与 SBIRS 空间预警系统看多色焦平面阵列的应用[J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1016 - 1019.
- [3] Lawrie D G, Lomheim T S. Space-based systems for missile surveillance[R]. The Aerospace Corporation, 2001.
- [4] Cota S A, Kalman L S, Keller R A. Advanced sensor simulation capability[C]. Proceedings of SPIE, The Aerospace Corporation, 1990, 1310: 134 - 149.
- [5] QI Meng. Detection probability of IR search and track system[J]. Laser & Infrared, 2004, 34(4): 269 - 271. (in Chinese)
祁蒙. 红外搜索跟踪系统的探测概率研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(4): 269 - 271.
- [6] R Rifkin. Comparison of performance measures for intercept detection[J]. IEEE, 1994: 278 - 293.