

临近空间低速目标光学探测性指标评价体系

楼鑫¹, 赵阳¹, 聂永名², 倪淑燕¹

(1. 装备学院光电装备系, 北京, 101416; 2. 中国卫星海上测控部, 江苏江阴, 210047)

摘要 在详细分析基本探测效果评价指标参数、点目标评价参数以及面目标评价参数的基础上, 结合临近空间低速目标的光学特性, 利用光学谱段分段方法, 有效解决了目标背景受白天与黑夜的影响。结合光学探测器的谱段约束条件、位置约束条件、探测能力约束条件和可探测性评估参数, 设计提出了临近空间低速目标光学可探测性指标评价体系并给出评价标准与优化方案。通过数值模拟得到单个和多个探测器不同探测效果的等效面, 得出当目标位于期望探测效果等效探测曲面内部时, 探测效果优于期望, 满足探测要求; 反之, 探测效果劣于期望, 不能满足探测要求, 可以通过修改探测方案满足探测需求。这一结果证明了临近空间低速目标光学探测性指标评价体系的有效性。

关键词 临近空间飞行器; 探测; 性能; 评价体系

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.01.005

中图分类号 V566.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)01-0027-06

Index Evaluation System of Low Speed Target Detectability in Near Space Based on Optical Method

LOU Xin¹, ZHAO Yang¹, NIE Yongming², NI Shuyan¹

(1. Department of Equipment Acquisition, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 210047, Jiangsu, China)

Abstract: On the basis of the detailed analysis of the basic detection evaluation parameters, point target evaluation parameters and area target evaluation parameters, this paper effectively resolves the limitations of the day and night backgrounds by the optical spectral segment selecting according to the optical properties of the low speed target in the near space, and designs a near space low speed target detectability evaluation system and optimization scheme based on optical method. Moreover, in consideration of the spectral constraint condition the position constraint condition, the detection ability and the evaluation parameters of the optical detector in detailed through different equivalent effect curve surface of single and multiple detectors by numerical, the simulation result indicates that when the target is inside the equivalent curve surface, the detecting effect is better than that of the expectation and can meet needs of the detection requirements, on the contrary, the detection effect is worse than that of the expectation and cannot meet needs of the detection requirements, unless the detection scheme is modified. The results show that the near space low target detectable evaluation system is effective based on optical method.

Key words: near space vehicle; detection; performance; evaluation system

收稿日期: 2016-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(51276196)

作者简介: 楼鑫(1988-), 男, 浙江诸暨人, 硕士生, 主要从事空间信息获取与处理研究. E-mail: louxin1124@163.com

引用格式: 楼鑫, 赵阳, 聂永名, 等. 临近空间低速目标光学探测性指标评价体系[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(1): 27-32. LOU Xin, ZHAO Yang, NIE Yongming, et al. Index Evaluation System of Low Speed Target Detectability in Near Space Based on Optical Method[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(1): 27-32.

临近空间通常指距海平面 20~100 km,传统航空器的静升限和航天器的最低运行高度之间的空域,属于“空”与“天”的过渡区^[1]。曾经这一区域被忽略了,但近年来欧美日等发达资本主义国家十分注重临近空间飞行器技术的研发,取得一系列成果,诸如浮空气球、平流层飞艇、无人机等。随着临近空间飞行技术的进一步发展,对临近空间目标可探测性评价系统已成为至关重要的问题^[2]。目前国内探测性评价体系多集中在地面设备性能、目标特性及平台性能方面^[3-10],缺乏对系统的整体分析。且对临近空间高速目标的研究较多^[11-14],但是对低速目标的研究相对较少。虽然,目前国内外都还没有完善的临近空间目标光学探测理论和完全适用的光学探测设备。但光学探测设备在跟踪精度、测量精度、目标探测距离等方面与雷达相比有着很大的优势,尤其是光学探测的直观性以及造价相对低廉,使其在临近空间探测等领域发挥日益重要的作用。根据红外波段成像特性^[15-16],通过光学谱段选择,临近空间低速目标的背景受白天与黑夜的影响就可以得到有效的抑制。所以光学探测技术可以很好地解决临近空间目标白天可见光探测中背景信号较强以及晚上很难进行可见光探测的问题。通过不断的提升光学探测系统性能、开发信号提取以及信号处理相关技术^[17-20],就可以提高临近空间目标光学探测系统的探测能力。本文分析研究临近空间低速目标光学探测性指标评价体系的设计,对完善临近空间目标的预警,完成对临近空间目标的搜索与跟踪任务意义重大。有助于预警监视系统警戒与引导任务的加强以及低空补盲,在特殊地区和特殊任务背景下实现对低空超低空突防目标的早期预警。

1 理论分析与建模

1.1 临近空间低速目标可探测性评价参数

为了获得临近空间低速目标探测效果的定量描述,我们设定以下参数作为其可探测性的评价参数。

1.1.1 目标可见性 $C_V(c_{vs}, c_w)$

临近空间低速目标的可见性表示临近空间目标针对某一探测设备是否可见,用一个双布尔量 $C_V(c_{vs}, c_w)$ 参数来表示。

c_{vs} 代表目标物理空间可见性,当 c_{vs} 为 1 时,表示探测设备可以通过调整姿态探测到目标;当 c_{vs} 为 0 时表示无论探测器怎样调整姿态都无法探测到目标。

c_w 代表目标光学可见性。当 c_w 为 1 时,表示探测设备可以发现并识别目标;当 c_w 为 0 时,表示目

标在探测设备的探测能力以外,无法发现和识别目标。

1.1.2 目标成像类型 C_I

目标成像类型 C_I 是一个布尔量,用于衡量目标在探测器成像平面上以点目标或面目标的形式存在。当 C_I 为 1 时,表示探测目标在成像平面上以面目标形式成像;当 C_I 为 0 时,表示探测目标在成像平面上以点目标形式成像。

C_I 决定了目标探测细节特征分辨能力,当目标成像为面目标时,可以提取更多的特征信息用于目标识别和姿态确定,而点目标则无法获取目标的几何结构特征信息。它主要由目标可见面积 S 、目标与探测器的距离 d 、探测器的焦距 f 和探测器成像阵列单位面元尺寸 $u \times v$ 决定。

1.1.3 点目标评价参数 $C_P(m, r, k_p)$

点目标等效星等 m 是当目标成像为点目标时,衡量在探测器入瞳处目标亮度的一个指标。取零等星为参考星,其大气层外照度值 E_0 为 2.65×10^{-6} lx,则某一入瞳处照度为 E 的目标的等效视星等值为:

$$m = -13.98 - 2.5 \lg\left(\frac{E}{E_0}\right) \quad (1)$$

点目标像点弥散半径 r 是指点目标成像像素团的中心到边缘所占的像素数,主要由光学系统产生的像点弥散,大气抖动引起的弥散以及目标像点相对运动引起的弥散引起。

点目标对比度 k_p 是指成像平面目标亮度与背景亮度之比,点目标的对比度是衡量点目标从背景中检测难易度的一个指标。

$$k_p = \frac{L_S}{L_B} \quad (2)$$

1.1.4 面目标评价参数 $C_M(L_A, N, k_m)$

面目标成像大小 N 是指面目标在成像平面所占的像素个数,面目标平均亮度 L_A 是成像平面目标总亮度被目标成像大小 N 等分所得到的面目标在其覆盖范围内平均每个像素上的亮度值。

$$L_A = \frac{L_S}{N} \quad (3)$$

面目标平均亮度 L_A 是衡量面目标成像亮度的一个参数。

k_m 是衡量面目标亮度与背景亮度之比的一个参数,可以表示为:

$$k_m = \frac{L_A}{L_B} \quad (4)$$

基本探测效果评价指标参数按照探测效果分为 6 级,级别越高,探测效果越好。探测具体评价标准和优化方案见表 1。

表 1 基本探测效果评价标准与优化方案

Tab. 1 Evaluation criteria and optimization scheme of basic detection results

评价等级	描述	参数区间	优化方案
1	物理空间不可见	$c_{ts} = 0$	重新部署探测器位置。
2	光学不可见	$c_{ts} = 1; c_{vo} = 0$	增加曝光时间;更换大口径探测器。
3	点目标模糊成像	$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 0; m > 10$	增加曝光时间;增加焦距;更换大口径探测器。
		$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 0; r < 3$	增加焦距。
4	点目标清晰成像	$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 0; m < 10; r > 3; k_p > 2$	增加焦距;更换探测器。
		$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 1; N < 25$	增加焦距。
5	面目标模糊成像	$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 1; L_A$ 过小	增加曝光时间;更换大口径探测器。
		$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 1; k_m < 2$	更换低噪声探测器;背景光抑制;信号增强。
6	面目标清晰成像	$c_{ts} = 1; c_{vo} = 1; C_I = 1; N > 25; L_A$ 较高; $k_m > 2$	无需优化

除基本参数外,所涉及的约束条件除了包括大气环境、目标的材质结构和位置等外,还包括由目标探测的方案决定的探测器指标、探测器的部署、探测时段等,这类参数可以通过方案的优化获得提高目标的探测效果,因而我们主要对方案约束条件进行分析。

1) 探测谱段约束条件

探测谱段约束条件主要是指临近空间低动态目标探测的谱段选择。

2) 探测位置约束条件

探测位置约束条件是指参与临近空间低动态目标的所有探测器的确切位置,包括地基、空基、临基和天基探测器的固定位置或运动轨迹。对于临近空间低动态目标光学探测而言,探测器位置决定了目标探测的光程,其中决定目标探测效果的因素主要涉及探测距离、探测方位、目标相对姿态、大气传输路径等。

探测位置约束条件格式为 $R_L(c_i, q_i)$ 。其中, c_i 为探测器编号,代表第 i 个探测器; q_i 为约束条件,根据探测器位置属性的不同,约束条件格式也有所不同,主要格式包括:固定探测位置约束条件 q_i (fix, B, L, H),其中, fix 为标识位,表示该约束条件为固定探测位置约束, B, L, H 分别表示探测器的纬度、经度和大地高。

移动探测位置约束条件 q_i (mov, t, b, l, h),其中 mov 是标识位。 (t, b, l, h) 为四维数组,用于记录探测器若干关键时刻的位置参数,探测器在任意时刻的位置由其前后相邻关键时刻的时间和位置进行差分得到。

轨道探测位置约束条件 q_i ($orb, i, a, e, \Omega, \omega, \theta$),其中, orb 是标识位。 $i, a, e, \Omega, \omega, \theta$ 为确定卫星位置

的 6 根数。

3) 探测器能力约束条件

探测器能力约束条件是指参与探测的探测器的性能对探测效果的约束。总的说来,探测器能力约束条件大致分为探测器静态探测能力约束条件和探测器动态探测能力约束条件 2 类。

4) 可探测性评估参数

对临近空间目标可探测性进行动态评估,除了考虑到基本探测效果评价参数的对比之外,还涉及到组合探测性能、目标跟踪性能、探测成本等方面的评价参数,要从以下几个方面进行评价。

可探测范围是衡量试验方案探测能力的一个基本指标,指试验方案所部署的探测器网络的探测覆盖能力。可探测范围主要由探测器部署位置和探测器性能参数决定。为了对试验方案的可探测范围进行评估,我们构建了等效探测曲面参数对目标相对于探测网络的可探测性进行衡量。

1.2 临近空间低速目标可探测性评价体系

临近空间低动态目标可探测性评价体系见图 1,其工作流程如下:

第 1 步 输入临近空间低动态目标探测试验方案的各种设定信息,包括目标信息、探测器性能参数、探测器部署、探测时间、探测需求等信息。

第 2 步 分别计算针对每个探测器的目标探测效果评价参数,并构建等效探测曲面,生成整个网络的等效探测曲面,输出满足探测需求的探测范围,并进行可探测性评估。若均不能满足探测需求,跳转至试验方案优化模块。

第 3 步 针对每个探测器进行探测时段分析,确定符合探测需求的时段,并选择能够同时被最多探测器探测的时段作为试验时段,并进行可探测性评

估,如果在该时段内个别探测器不能满足探测需求,则调整该探测器的位置或轨迹,返回第2步重新生成试验网络等效探测曲面。

第4步 对确定方案进行目标可跟踪性、探测稳定性评估,如果某探测设备的目标可跟踪性或探测稳定性与需求相差太远,则考虑更换设备或者进行方案优化,返回第2步重新生成试验网络等效探测曲面。

第5步 计算当前方案基本探测成本,如果需要优化,根据优化方案计算优化成本,如果成本满足需求则执行优化,否则重新对方案进行优化设计。

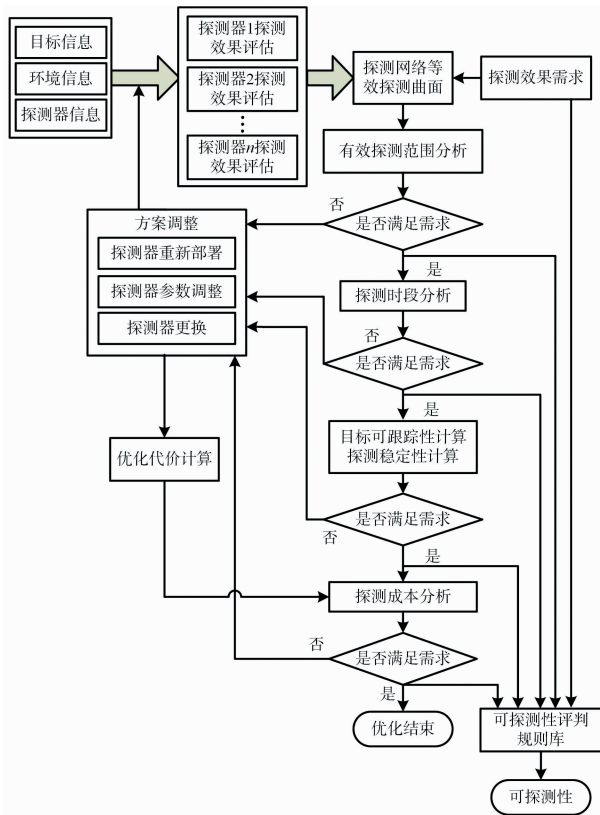


图1 临近空间低动态目标可探测性评价体系

Fig.1 Evaluation system of the low dynamic target detection in the near space

2 数值仿真模拟

对于单个探测器而言,其探测范围理论上是一个以探测器所在位置为顶点的球锥,见图2,球锥内不同曲面代表不同探测效果的等效面。

球锥的半径 R 理论上等于探测器的探测距离 d ,顶角 α 由探测器的俯仰角下限 θ_{\min} 决定:

$$\alpha = 180 - 2\theta_{\min} \quad (5)$$

在实际试验过程中,由于地形限制,以及光照环境和大气环境各向的不均匀性,探测器的可探测范

围往往不是一个规则的球锥或球体,结合探测效果评价指标参数,将具有相同探测效果的点连接起来,可以构成一个曲面 Φ ,当不考虑目标姿态的情况下,目标在此曲面上任意点时,探测器的探测效果相同,因而可以将此曲面称为等效探测曲面。等效探测曲面的形状主要由光照环境和大气环境的不均匀性决定影响,由于探测器性能在各个方向一致,因而其只影响等效探测曲面与探测器的平均距离,而不会影响等效探测曲面的形状,见图3。

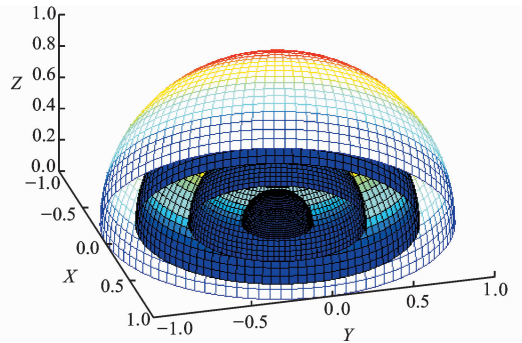


图2 单个探测器理想探测范围示意图

Fig.2 Schematic diagram of ideal detection range of a single detector

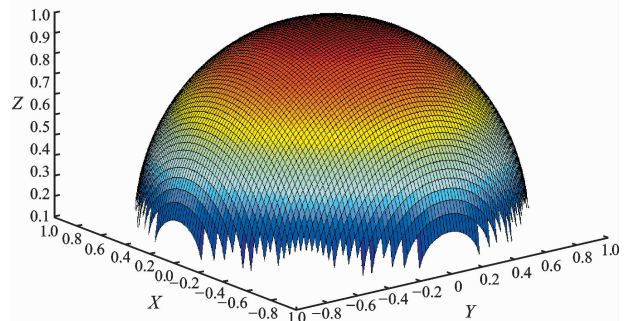


图3 实际单一探测器等效探测曲面形状示意图

Fig.3 Schematic diagram of the equivalent detecting surface shape of the actual single detector

对于单一探测器而言,当期望探测效果已知时,可以根据探测器参数和环境参数构建期望探测效果的等效探测曲面 $\Phi_e(r, \theta, \varphi)$,其中, r 为探测器到曲面上一点的距离, θ 为曲面上一点相对于探测器的俯仰角, φ 为曲面上一点相对于探测器的方位角。在实际试验过程中,当目标位于期望探测效果等效探测曲面内部时,探测效果优于期望,满足探测要求;当目标位于期望探测效果等效探测曲面外部时,探测效果劣于期望,不能满足探测要求,需要修改试验方案以满足探测需求。

当试验方案中存在多个探测器时,可以分别针对每个探测器构建一个等效探测曲面,通过等效探

测曲面的并集构建组合等效探测曲面,用于判断探测器所在空间位置能否满足探测需求,见图4,其等效探测范围剖面图见图5。

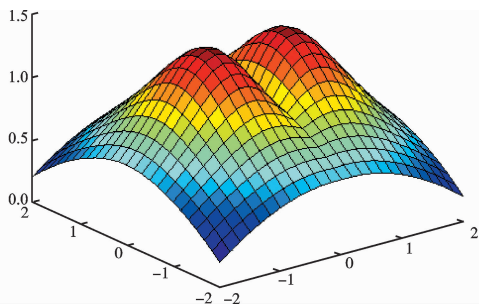


图4 双探测器等效探测曲面

Fig. 4 Equivalent surface detection of double detectors

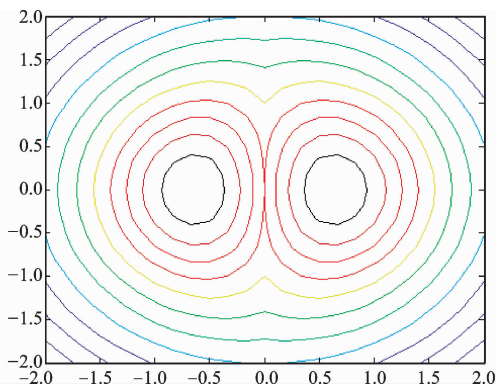


图5 双探测器等效探测范围剖面图

Fig. 5 Equivalent detection range profile of double detector

此外,探测时段即探测器对临近空间低动态目标的探测效果随时间变化的情况要求从时域对探测器的部署方案进行优化,在此不再赘述。

3 结语

本文首先从理论上设计了基本探测效果评价指标参数、点目标评价参数、点目标评价参数和面目标评价参数。在充分考虑探测谱段约束条件、探测位置约束条件、探测器能力约束条件和可探测性评估参数的基础上,构建了临近空间低速目标可探测性评价体系。通过数值模拟得到了单一探测器等效探测曲面、双探测器等效探测曲面以及双探测器等效探测范围剖面分布特性。

参考文献(References):

[1] 刘军. 国外低速临近空间飞行器与技术发展[J]. 中国航天, 2012(1): 31-35.
LIU J. Development of Low Speed Near Space Vehicle and Technology in Foreign Countries[J]. Aerospace China, 2012(1): 31-35. (in Chinese)

[2] 董鹏曙,李宗亭,张朝伟. 平流层飞艇载综合脉冲孔径雷达系统研究[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(5): 446-452.
DONG P S, LI Z T, ZHANG C W. Research on Stratospheric Airship SIAR System[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(5):446-452. (in Chinese)

[3] 门涛,徐蓉,刘长海,等. 光电望远镜暗弱目标识别算法及探测能力[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 587-592.
MEN T, XU R, LIU C H, et al. Dark Target Identification Algorithm and Detecting Ability of Optoelectronic Telescopes[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3):587-592. (in Chinese)

[4] 黄晨,梁小虎,王建军,等. 临近空间红外探测像面照度建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3217-3221.
HUANG C, LIANG X H, WANG J J, et al. Modeling and Simulation of Imaging Plane Irradiance for Near Space Infrared Detecting[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10):3217-3221. (in Chinese)

[5] 卢雪. 临近空间低速目标光学探测研究[D]. 西安:中国科学院西安光学精密机械研究所, 2014.
LU X. Investigation on the Detect System for Near Space Target [D]. Xi'an :Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[6] 樊浩,黄树彩,谢永才,等. 临近空间飞行器平台探测低空隐身目标分析[J]. 航空兵器, 2012(1):12-17.
FAN H, HUANG S C, XIE Y C, et al. Analysis of Detecting Low-Altitude and Stealthy Targets Based on Near Space Vehicle[J]. Aero Weaponry, 2012 (1):12-17. (in Chinese)

[7] RAGHEB H, HANCOCK E R. Lambertian Reflectance Correction for Rough and Shiny Surfaces [J]. IEEE Trans on ICIP, 2002, 2:553-556.

[8] 刘建斌,吴健. 空间目标的光散射研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(4):802-805.
LIU J B, WU J. Light Scattering of Spatial Target [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(4):802-805. (in Chinese)

[9] WU Z, LIU A. Scattering of Solar and Atmospheric Background Radiation from a Target [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2002, 23 (6):907-917.

[10] 梁国龙,何昕,魏仲慧,等. 临近空间目标飞行器地基探测技术研究[J]. 红外, 2013,34(7):1-5.

- LIANG G L, HE X, WEI Z H, et al. Study of Ground-based Detection Technology of Target Aircrafts in Near Space[J], *Infrared*, 2013, 34(7):1-5. (in Chinese)
- [11] 张国华. 临近空间目标探测分析[J]. *现代雷达*, 2011, 33(6):13-16.
- ZHANG G H. Analysis of Near Space Target Detection[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(6):13-16. (in Chinese)
- [12] 汪连栋, 曾勇虎, 高磊, 等. 临近空间高超声速目标雷达探测技术现状与趋势[J]. *信号处理*, 2014, 31(1):72-98.
- WANG L D, ZENG Y H, GAO L, et al. Technology Status and Development Trend for Radar Detection of Hypersonic Target in Near Space[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 31(1):72-98. (in Chinese)
- [13] 肖松, 谭贤四, 李志淮, 等. 雷达探测临近空间高超声速目标性能需求分析[J]. *现代防御技术*, 2013, 41(5):86-92.
- XIAO S, TAN X S, LI Z H, et al. Analysis of Detection Performance Requirement on Radar for Near Space Hypersonic Target[J]. *Modern Defence Technology*, 2013, 41(5):86-92. (in Chinese)
- [14] 肖松, 谭贤四, 王红, 等. 地基雷达探测临近空间高超声速目标优化部署方法[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(5):121-127.
- XIAO S, TAN X S, WANG H, et al. Deployment Optimization Method for Ground-based Radar to Detect Near Space Hypersonic Target[J]. *Journal of National University of Defence Technology*, 2015, 37(5):121-127. (in Chinese)
- [15] REINE M B. Status of HgCdTe Detector Technology [J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 443: 2-11.
- [16] TIDROW M Z. New Infrared Sensors for Ballistic Missile Defense [J]. *Integrated Optoelectronic Devices*, 2005, 42(3-5):333-336.
- [17] HARTMANN J, BROWN B, MUMMIDIVARAPU S S, et al. Target Detection Using Image Processing Techniques [R]. AIAA 2015-2030.
- [18] PARK J, KIM Y. 3D Shape Mapping of Obstacle Using Stereo Vision Sensor on Quadrotor UAV [R]. AIAA 2014-0975.
- [19] ASKAR H, LI Z M. A Dim Moving Point Target Detection Technique Based on Distribution Transform Method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(1):103-106.
- [20] DIANI M, CORSINI G, BALDACCI A. Space-Time Processing for the Detection of Airborne Targets in IR Image Sequences [J]. *IEE Processing on Vision, Image Signal Processing*, 2001, 148(3): 151-157.

(编辑:徐楠楠)