

扫描非均匀性对点目标探测影响

巩晋南¹, 侯晴宇¹, 邓盼², 张伟¹

- (1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 湖北航天技术研究院总体设计所, 湖北 武汉 430040)

摘要: 为了深入研究物方扫描机构与点目标探测性能的关系, 定义了度量扫描机构运动特性的扫描非均匀性指标。根据扫描成像的物理过程, 建立了线阵探测器扫描成像模型, 并以目标信噪比为核心分析了 TDI 探测器下扫描非均匀性的影响。首先, 根据物方扫描工作特点设置了与扫描机构工作方式相配合的探测器积分时序, 并建立了扫描非均匀性度量参量; 其次, 在经典成像模型的基础上建立了符合积分时序和 TDI 工作原理的点目标成像模型, 并结合探测器噪声模型和 TDI 工作原理推导了目标信噪比计算公式, 通过该公式分析了不同光学系统、TDI 级数及目标尺度条件下目标信噪比与扫描非均匀性的关系; 最后, 从保证能够目标检测性能的角度给出了在相对信噪比限制条件下扫描非均匀性上限。所建立的成像模型准确反映了扫描探测系统各部分特性, 分析结果对探测系统的总体设计和指标分配具有指导意义。

关键词: 点目标; 时间延迟积分器件; 扫描非均匀性; 扫描成像模型

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3282-06

Detecting performance effect on point target by scanning inhomogeneous

Gong Jinnan¹, Hou Qingyu¹, Deng Pan², Zhang Wei¹

- (1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;
2. Designing Insitute of Hubei Space Technology Academy, Wuhan 430040, China)

Abstract: In order to deeply explore the relationship between detecting point target and scanning device, indicator to measure scanning feature called scanning inhomogeneous was established. According to the physical process of scanning imaging, an imaging model for scanning system with linear detector was established. Based on that model, scanning inhomogeneous affected on TDI detector for point target detecting was analyzed as the core of SNR. Firstly, integration timing order of single detector was set coordinating with the characteristics of scanning structure, and scanning inhomogeneous metric was established in the meanwhile. Then on the basis of the classical imaging model, an imaging model for point target in scanning system was established with the principle of integration order and detector systems. The SNR calculation formula was deduced combining with TDI working principle and detector noise model. With this formula, the performance of detecting point target was analyzed emphatically

收稿日期: 2015-03-11; 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 中国航天科技集团公司航天科技创新基金; 国家自然科学基金(61308100)

作者简介: 巩晋南(1986-), 男, 博士生, 研究方向为目标检测性能评价、光学目标检测。Email: gongjinnan1986@gmail.com

通讯作者: 侯晴宇(1982-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为小目标探测与辨识、空间目标捕获。Email: houqingyu@126.com

under conditions of optical systems, target scales and TDI levels. Finally from the view point of ensuring target detection performance, the upper limits of scanning inhomogeneous ratio in optical system was given. The established model reflects the characteristics of scanning detecting system accurately, and the analysis results are significant to guide for system design and index allocation.

Key words: point target; TDI; scanning inhomogeneous; imaging model in scanning system

0 引言

光学目标搜索与跟踪系统核心是探测远距离、亚像元尺度点目标,其性能不仅与光学系统设计水平、探测器性能相关,还与其他辅助成像机构性能相关。受限于光学系统口径与探测器规模,一般红外成像系统往往均在光学系统前放置扫描机构,利用物方扫描方式,即扫描镜在物方的连续往复运动来扩展可探测范围^[1-2]。这就要求扫描机构的扫描速度与探测器积分时间严格配合,即严格保持匀速运动。若扫描机构的扫描速度不均匀,将会使场景各部分在探测器上的驻留时间出现差异,使目标可收集能量出现偏差,进而影响系统探测性能,并且随着光学系统性能和目标几何尺度的不同,扫描机构的运动偏差对目标探测的影响程度也不同。因此除了目标自身能量光学系统性能外,扫描机构运动特性也对目标信噪比有至关重要的影响。

近年来,随着时间延迟积分器件(TDI)在扫描探测系统中的广泛应用^[3-4],在 TDI 探测器对积分时序与场景移动速度的配合要求下^[5],扫描机构不仅用于扩展系统的成像范围,还是保证 TDI 各级次能够进行准确累加的关键,对扫描机构的运动速度要求更为严格。而目前,国内在光学系统设计过程中,扫描成像目标信噪比计算模型与凝视成像模型相同^[6-7],没有体现扫描运动特性对目标信噪比的影响。对 TDI 及扫描运动的相关分析中,均将对成像质量影响作为分析出发点^[7-9],对于扫描均匀性等的要求还停留在对 MTF 特性^[10]、测角精度特性^[11]等成像特性的分析上。而对目标探测系统来说,由于目标尺度小,检测过程往往首先需要对高关联度背景进行抑制^[12-13],并通过目标能量特性实现检测^[14],因此成像质量不能决定探测系统性能,分析结果难以支持目标探测系统的设计。与此同时,作为光学系统的重要设计指标,扫描机构运动参数在光学系统总体指标的指定

与分配过程中并未面向目标探测性能,结合光学系统特性、探测器特性进行制定具有较大的局限性。

为此,文中以目标信噪比为核心,在经典光学系统成像模型^[7,15]的基础上构造了度量扫描机构运动特性的扫描非均匀性指标,并针对扫描系统特点,结合光学系统及探测器特性建立了物方扫描系统的点目标成像模型,在该模型的基础上推导了目标信噪比计算公式,根据该公式分析了在不同光学系统、不同 TDI 级次及不同目标几何尺度条件下,扫描非均匀性对目标探测性能的影响。最后,从保证目标信噪比的角度给出了不同光学系统参数和 TDI 探测器配合下的扫描非均匀性上限,为光学系统的总体设计与指标分配提供依据。

1 扫描机构运动特性描述

1.1 扫描积分时序设置

在物方扫描系统中,扫描机构处于光学系统的最前端,一般采用平面镜完成扫描。由于仅折转入射平行光线,因此不对成像质量产生影响。目前广泛采用的是—维连续扫描系统,在这种情况下,扫描机构沿一个方向进行往复扫描。这里定义探测器坐标系,如图 1 所示,坐标系原点位于探测器中心, X 轴指向

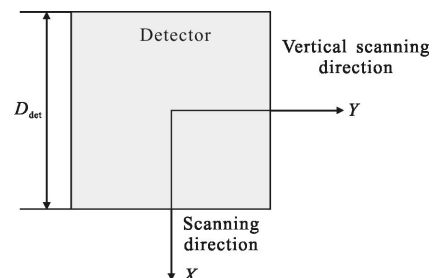


图 1 探测器坐标系定义

Fig.1 Definition of detector coordinate system

扫描方向,在积分时间内,光轴沿 X 轴扫描,图中 D_{det} 为探测器尺寸。在积分时序设计上,为了目标能量在

探测器上的驻留时间最长,积分时序设置为:在起始积分 $t=t_0$ 时刻,光轴位置在直线 $x=-\frac{D_{\text{det}}}{2}$ 上;在积分结束 $t=t_0+T_{\text{int}}$ 时刻,光轴在直线 $x=\frac{D_{\text{det}}}{2}$ 上。则在这种积分时序设置下,扫描过程如图 2 所示。

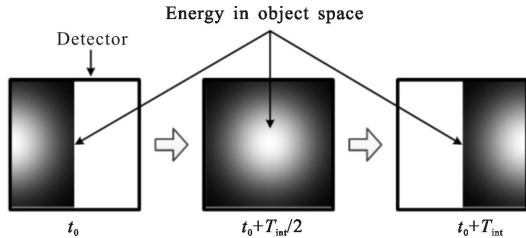


图 2 物方扫描积分时序

Fig.2 Integration timing order of object space scanning

1.2 扫描机构运动特性度量

可以看出,像方光轴移动的角速度应设置为:

$$v_0 = \frac{D_{\text{det}}}{T_{\text{int}}} \quad (1)$$

根据物方扫描特点,光轴运动角速度是扫描机构移动速度的 2 倍,两者为一次线性关系。为计算方便,以下对扫描机构的运动速度计算在像方进行,对扫描机构的运动分析也在像方展开。可以看出,在积分时间参数、探测器参数确定的条件下,扫描机构运动特性直接影响目标探测器上的驻留时间,使探测器收集到的目标能量发生变化。对于探测系统来说,任务核心是保证随机出现小尺度目标的能量被准确收集,因此在积分时间内的扫描机构运动特性至关重要。考虑积分时间为 T_{int} 为短时段,在积分时间内运动可视为匀速运动,即:

$$\bar{v} T_{\text{int}} = \int_{t_0}^{t_0+T_{\text{int}}} v(u) du \quad (2)$$

为了定量描述各种因素对扫描机构运动特性的影响,定义扫描非均匀性指标 Δ :

$$\Delta = \frac{\bar{v} - v_0}{v_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: \bar{v} 和 v_0 分别为在积分时间内扫描机构的平均速度与设计速度。

2 扫描成像模型的建立

2.1 单级探测器目标成像模型

设目标为朗伯体,且积分时间内能量保持不变,

则在垂直扫描方向,即 Y 方向上,目标能量分布为:

$$E_{\text{image}}(y, \lambda) = PSF_{\text{system}}(y) * L_{\text{tar}}(y, \lambda) \quad (4)$$

式中: $L_{\text{tar}}(y, \lambda)$ 为目标在 Y 方向的光谱辐射亮度; PSF_{system} 为光学系统的点扩散函数。当系统采用单级探测器时,目标在扫描方向能量分布为扫描速度及时间的函数。在 $t \in [t_0, T_{\text{int}}+t_0]$ 时刻,目标像在该方向能量分布为:

$$E_{\text{image}}(x, \lambda, v, t) = PSF_{\text{system}}(x) * L_{\text{tar}}(x'(t), \lambda) \quad (5)$$

其中

$$x'(t) = x + \frac{D_{\text{det}}}{2} - \int_{t_0}^{t_0+t} v(u) du \quad (6)$$

结合公式(2)、(3),公式(5)修正为:

$$E_{\text{image}}(x, \lambda, v, t) = PSF_{\text{system}}(x) * L_{\text{tar}}\left(x + \frac{D_{\text{det}}}{2} - (1+\Delta)v_0 t, \lambda\right) \quad (7)$$

从公式(7)可以看出,当扫描机构运动速度完全与设计值相同时,在积分时间内目标能量能够完全被探测器收集,而当 $\Delta < 0$ 时,实际速度小于设计速度,在积分时间内探测器无法收集目标所有能量;当 $\Delta > 0$ 时,实际速度大于设计速度,积分时间内目标能量虽然可以被探测器完整收集,但由于驻留时间缩短,收集能量减少。焦平面上目标能量分布为:

$$E_{\text{image}}(x, y, \lambda, t, v) = E_{\text{image}}(x, \lambda, t, v) \cdot E_{\text{image}}(y, \lambda) \quad (8)$$

积分时间内,目标能量转化的电子数为:

$$S(v, F) = \frac{\pi}{4F^2 hc} \iint_{(x,y) \in \Omega_{\text{det}}} \int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} \int_{t_0}^{t_0+T_{\text{int}}} \eta(\lambda) \tau(\lambda) \cdot E_{\text{image}}(x, y, \lambda, t, v) d\lambda dt dx dy \quad (9)$$

式中: Ω_{det} 为单像元区域; T_{int} 为积分时间; F 为光学系统的 F 数; h 为普朗克常数; c 为光速; $\eta(\lambda)$ 为探测器光谱量子效率; $\tau(\lambda)$ 为光学系统的光谱透过率; λ_{max} 和 λ_{min} 分别为系统光谱响应的上限和下限。积分时间内,探测器产生的噪声电子数为^[13]:

$$\text{Noise} = \sqrt{\bar{n}_{\text{ph}}^2 + \bar{n}_{\text{FPN}}^2 + \bar{n}_{\text{read}}^2 + \bar{n}_{\text{dark}}^2} \quad (10)$$

式中: \bar{n}_{ph} 、 \bar{n}_{FPN} 、 \bar{n}_{read} 、 \bar{n}_{dark} 分别为探测器光子噪声、固定图形噪声、读出噪声和暗电流噪声的均方根值。探测器噪声仅与光学系统特性、积分时间和探测器制造水平有关,与相机工作方式、目标能量等因素无关。因此探测器和积分时间等电子学参数确定后,探测器噪声量也随之确定。目标信噪比可以表示为:

$$\text{SNR} = \frac{S(v, F)}{\text{Noise}} \quad (11)$$

总的来说,扫描光学系统可获取的目标信噪比

不仅取决于目标能量、光学系统性能和探测器性能,还与扫描机构扫描速度变化密切相关。根据公式(7),在光学系统、探测器等参数相同时,即使扫描速度严格与公式(1)相同,扫描成像模型也与凝视成像模型不同,当实际扫描速度相对公式(1)出现偏差时,目标信噪比会出现衰减。也就是说,在扫描光学系统中,扫描机构运动特性将会影响光学系统探测性能。

2.2 TDI 探测器扫描成像模型

当系统采用多元串扫形式,即使用时间延迟积分器件(TDI)时,积分过程如图 3 所示。由于 TDI 累积过程中场景移动需与积分时序严格配合,则在上述积分时序设置时,对级数为 N_{TDI} 的 TDI 探测器,第 $i(1 \leq i \leq N_{TDI})$ 级次 X 方向能量分布为:

$$E_{image}^{TDI}(x, \lambda, v, t, i) = PSF_{system}(x) * L_{tar} \left(\left(x + \frac{D_{det}}{2} + \Delta x_{TDI}(i) \right) - x'(t), \lambda \right) \quad (12)$$

式中: $\Delta x_{TDI}(i)$ 为上级次扫描累积误差参数。表达式为:

$$\Delta x(i) = \int_{t_0}^{t_0 + (i-1) \cdot T_{in}} v dt - (i-1) \cdot D_{ect} \quad (13)$$

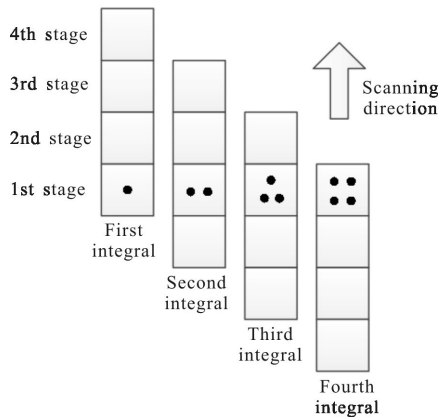


图 3 TDI 探测器积分时序

Fig.3 Integration sequence of TDI detector

根据公式(2)、(3),公式(12)、(13)修正为:

$$E_{image}^{TDI}(x, \lambda, v, t, i) = PSF_{system}(x) * L_{tar} \left(x + \frac{D_{det}}{2} - (1+\Delta)v_0 t - \Delta x(t), \lambda \right) \quad (14)$$

$$\Delta x(i) = (1-i) \cdot [(1+\Delta)v_0 T_{int} - D_{ect}] \quad (15)$$

可以看出,严格匀速扫描是保证 TDI 能够准确累加的关键。一旦扫描速度出现误差,不仅该级次目标能量收集会出现影响,而且误差在向下累加的同时,还会被以下各级次逐步放大,产生较单级探

测器更严重的影响,且 TDI 的级数越多,这种影响就越严重。

在 Y 方向,目标能量与单级探测器模型相同。则第 i 级目标的光生电子数为:

$$S(v, F, i) = \frac{\pi}{4F^2 hc} \iint_{(x,y) \in \Omega_{tar}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \int_{t_0}^{t_0+T_{in}} \eta(\lambda) \tau(\lambda) \cdot E_{image}(x, y, \lambda, t, v, i) d\lambda dt dx dy \quad (16)$$

其中

$$E_{image}(x, y, \lambda, t, v, i) = E_{image}^{TDI}(x, \lambda, t, v, i) \cdot E_{image}(y, \lambda)$$

通过累加,总电子数为:

$$S_{TDI}(v, F) = \sum_{i=1}^{N_{TDI}} S(v, F, i) \quad (17)$$

而累加过程中,噪声量为各级次噪声的均方和:

$$Noise_{TDI} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{TDI}} Noise^2} = \sqrt{N_{TDI}} Noise \quad (18)$$

最终,目标信噪比可以表示为:

$$SNR(v, F) = \frac{S_{TDI}(v, F)}{\sqrt{N_{TDI}} Noise} \quad (19)$$

理论上,采用 TDI 探测器能够提高信噪比 $\sqrt{N_{TDI}}$ 倍,即级数越多,TDI 对目标信噪比的提升就越明显。但与此同时,级数越多,各级次对扫描机构运动误差放大效果就越明显,对扫描机构运动均匀性要求就更严格。因此在 TDI 级数选择上,不仅要考虑目标信噪比提升情况,还需要分析扫描非均匀性目标信噪比的影响。

3 点目标探测性能分析

3.1 输入参数设置

这里以理想光学系统为例,结合相关输入参数分析系统目标信噪比与扫描非均匀性的关系。光学系统层面,理想衍射受限系统点扩散函数可表征为中心波长和系统 F 数的函数,即:

$$PSF(x, y) = \left(\frac{2J_1(\Phi)}{\Phi} \right)^2 \quad (20)$$

式中: $\Phi = \frac{\pi \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda F}$; $J_1(x)$ 为一阶贝塞尔函数。这里,取中心波长 $\lambda = 4 \mu m$ 。在目标仿真方面,建立形如公式(17)的小目标能量模型:

$$L_{tar}(x, y, \lambda) = L_{eng} \frac{e^{-\frac{x^2 + y^2}{2s^2}}}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{x^2 + y^2}{2s^2}} dx dy} \quad (21)$$

式中: L_{eng} 为目标总能量; s 为目标能量弥散参数。根据高斯分布相关原理, 目标 99.7% 的能量集中在 $[-3s, 3s]$ 空间内, 即 $6s$ 为目标几何尺度。最后, 采用相对信噪比 (R_{SNR}) 表征系统的实际探测能力, 其定义式为:

$$R_{\text{SNR}} = \frac{\text{SNR}}{\text{SNR}_d} \quad (22)$$

式中: R_{SNR} 为相对信噪比; SNR 为实际扫描成像获取的目标信噪比; SNR_d 为系统设计的目标信噪比。由于扫描成像系统的 SNR_d 与凝视系统信噪比计算公式相同, 因此 R_{SNR} 不仅能够反映在相同光学系统及探测器条件下凝视成像模式和扫描成像模式的差异, 还可以量化扫描非均匀性对点目标探测性能的影响。根据定义, R_{SNR} 不大于 1。

3.2 结果及讨论

图 4 给出了在光学系统 $F=2$ 、 $N_{\text{TDI}}=16$ 时扫描非均匀度目标探测性能的影响。可以看出, 在扫描过程中目标在探测器上连续移动, 使得目标在探测器上实际驻留时间小于凝视模式, 这样即使在扫描速度为设计速度时, R_{SNR} 也小于 1。当目标尺度增大时, 目标能量弥散范围也随之增加, 连续扫描造成的驻留时间影响也更加明显, 因此 R_{SNR} 也越小。当扫描速度偏离设计速度, 导致场景移动速度和积分时序出现偏差, 不仅 TDI 各级次难以完整收集目标能量, 还会导致各级次扫描误差造成的误差出现累加, 目标能量分散至其他像元, 在目标信噪比降低的同时, 目标位置还会出现偏差, 造成对目标的检测和定位出现错误。

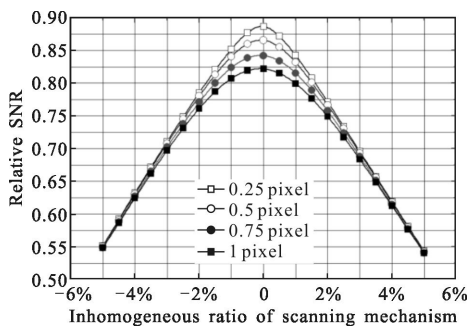


图 4 扫描非均匀性对探测不同尺度目标性能的影响

Fig.4 Effect of scanning inhomogeneous on detecting performance of target scales

图 5 给出了在目标尺度为 1 像元时扫描非均匀性对不同 F 数光学系统的影响。由于采用了理想衍

射受限光学系统, F 数在这里实际上表征了光学系统性能。可以看出, 不同 F 数光学系统, 扫描非均匀性与 R_{SNR} 关系曲线基本相同, 并且 F 数越小, R_{SNR} 越高。说明在扫描成像系统中, 光学系统性能仅影响目标的能量集中程度。

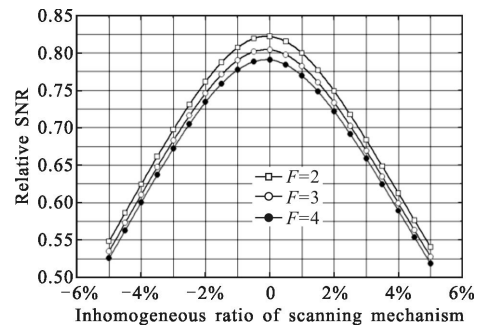


图 5 扫描非均匀性对不同 F 数光学系统探测性能的影响

Fig.5 Effect of scanning inhomogeneous on detecting performance of different F number optical systems

图 6 给出了在 $F=2$ 、目标几何尺度为 1 像元时扫描非均匀性对不同级次 TDI 探测器的影响。随着 TDI 级次的增加, 扫描误差累加现象就会越明显, 累加放大程度也越高。因此 TDI 级数越多, 扫描非均匀性对探测性能的影响也越明显, 甚至导致目标能量主要能量分散至其他像元, 导致目标位置出现偏差。因此在利用高级数 TDI 探测器时, 必须严格控制扫描非均匀性。

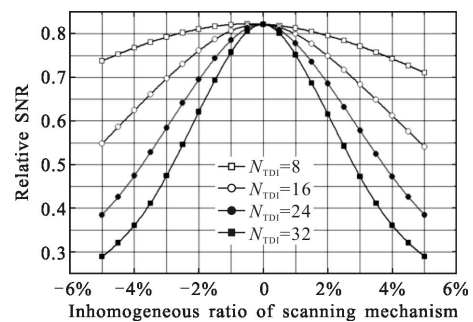


图 6 扫描非均匀性对不同 TDI 级数探测器的影响

Fig.6 Effect of scanning inhomogeneous on TDI levels

对点目标进行稳定检测的条件是目标具有高信噪比^[14], 这就要求扫描成像过程中必须保证目标能量具有高集中度, 且为了对目标准确定位, 其主要能量位置应不发生改变。为此, 将保证实际获取能量不小于理想获取能量的 90% 作为扫描非均匀性要求, 根

据上面的分析结果,扫描机构稳定工作状态时相对信噪比在 0.82 左右,选择相对信噪 0.75 作为阈值,则在不同光学系统 F 数、不同级数 TDI 对应的扫描非均匀性量值上限的拟合结果如表 1 所示。

表 1 不同 F 数、TDI 级数配合下扫描非均匀性上限
Fig.1 Upper limit of scanning inhomogeneous with different F number and TDI levels

N_{TDI}	F number		
	2	3	4
8	3.8%	3.2%	2.7%
16	2%	1.7%	1.5%
24	1.3%	1.2%	1.0%
32	1.0%	0.9%	0.8%

4 结 论

根据扫描机构工作特性建立了扫描成像模型与点信噪比计算公式,并构造了扫描非均匀性指标。模型和指标能够准确反映扫描机构、光学系统及探测器特性与目标信噪比的关系。通过该模型分析了扫描非均匀性对点目标探测性能的影响,并进一步给出了在不同 TDI 探测器级数和光学系统配合条件下扫描非均匀性上限。分析结果能够支撑光学系统的总体设计,具有重要的理论和应用价值。

参考文献:

- [1] Andreas N S. Space-based infrared system(SBIRS) system of systems [C]//IEEE Aerospace Applications Conference Proceedings, 1997: 429-438.
- [2] Zhao Nan, Chang Jun, Sun Zhihui, et al. Summarize of conformal optical[C]//SPIE, 2008, 6624: 66241N1-66241N7.
- [3] Wang Tiebing, Li Miao, Lin Zaiping, et al. Comparative performance analysis of over-sampling scanning [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2015, 34(1): 87-91. (in Chinese)
- [4] Dong Yucui, Chen Fansheng, Su Xiaofeng, et al. Temporal-spatial oversampling system and its performance analysis point target detection [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9): 2498-2507. (in Chinese)
- [5] Wu Jiagu, Zheng Zhenzhen, Feng Huajun, et al. Restoration of TDI camera images with motion distortion and blur [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(8): 1198-1203.
- [6] Yan Xiaowei, Deng Jiahao, Sun Zhihui. Modelling and simulation of laser imaging system based on linear array detection [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(4): 456-459. (in Chinese)
- [7] Ratches J A. Static performance model for thermal imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(6): 525-530.
- [8] Wang Yiqun, Liu Wei, Yan Changxiang et al. Development of high-precision scanning mirror assembly of imaging spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(11): 2703-2708. (in Chinese)
- [9] Hu Yan, Jin Guang, Chang Lin, et al. Image motion matching calculation and imaging validation of TDI CCD camera on elliptical orbit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2274-2284. (in Chinese)
- [10] Li Jun, Xiu Jihong, Huang Pu, et al. Effect of scanning speed deviation on imaging in linear array detection [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 903-907. (in Chinese)
- [11] He Xiaojun, Qu Hongsong, Zhang Guixiang, et al. Impact of scan mirror stability on TDI CCD system measure accuracy [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 665-671. (in Chinese)
- [12] Wang Gang, Chen Yongguang, Yang Suochang, et al. Detection of infrared dim small target based on image patch contrast [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1424-1433. (in Chinese)
- [13] Li Yimang, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Infrared target detection and recognition using dimension reduction technology [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1297-1303. (in Chinese)
- [14] Zhang Guangming, Sheng Weidong, Fan Shiwei, et al. Analysis of detection performance of infrared image sequence based on multi-sensor data fusion algorithm [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2009, 28(1): 16-19. (in Chinese)
- [15] Fierte R D. Modeling the Image Chain of Digital Cameras [M]. US: SPIE Press, 2010.
- [16] Cao Yiming, Zhang Wei, Cong Mingyu. Analysis of signal-to-noise ratio calculation for satellite-based infrared staring sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 955-959. (in Chinese)