

文章编号: 0253-2239(2010)02-0445-06

一种深空背景空间小目标条痕检测算法

李克新 张 伟 丛明煜 孟祥龙 程 军 曹移明

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 针对深空慢速运动目标(目标在焦面的运动速度小于 1 pixel/frame)提出了一种最大似然条痕检测算法,能够在较低信噪比情况下实现有效的慢速目标检测。算法将目标脉冲形状信息引入信号模型中,是最大值投影算法的改进形式。建立基于高斯噪声分布的图像信号模型,在此基础上推导了最大似然条痕检测算法模型;分析该算法的实时性及其理论探测性能;采用蒙特卡罗仿真方法比较最大似然条痕检测算法与最大值投影检测算法的检测性能。仿真结果表明,输入信噪比为 3.5 时,最大似然条痕检测算法的探测概率为 95%,其相同探测概率条件下所需信噪比比最大值投影算法降低了 2.5(即最大值投影算法要达到 95% 的检测概率,所需信噪比为 6)。算法实时性分析表明,最大似然条痕检测算法的实时处理能力为 31.25 Mb/s。

关键词 目标检测;最大似然条痕检测算法;蒙特卡罗仿真;空间目标

中图分类号 TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0445

A Streak Detection Algorithm of Space Target in Deep Space Background

Li Kexin Zhang Wei Cong Mingyu Meng Xianglong Cheng Jun Cao Yiming

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract A maximum likelihood streak detection (MLSD) algorithm is presented for the slow moving target(target velocity in the focal plane array is smaller than 1 pixel per frame)in deep space, it can implement the detection of slow target under the low Signal to Noise Ratio (SNR) condition effectively. The target pulse shape information is included in the signal model, and it is an improved version of the Maximum Value Projection Detection (MVPD) algorithm. The image signal mathematics model is built based on gaussian noise distribution, Its theory detection performance model and the real-time performance are analyzed. Monte Carlo simulation technique is adopted in comparing and analyzing the detection performance of MLSD and MVPD algorithm using simulated sequence images. The result shows that the detection probability of the MLSD reaches to 95 percent when the input SNR is 3.5, and the input SNR required for the MLSD is 2.5 lower than MVPD under the same detection probability. (required an input SNR of 6 for the MVPD). The real-time processing capability of the MLSD can obtain 31.25 Mb/s.

Key words target detection; maximum likelihood streak detection algorithm; Monte Carlo simulation; space target

1 引 言

天基探测系统具有比地基探测方式更好的优势,得到了广泛的应用^[1],而星空背景空间目标检测算法是其关键技术之一。现有的星空背景空间目标检测算法研究均是针对目标运动速度大于 1 pixel/frame

的条件下开展的。最具代表性的是应用于美国 MSX 卫星天基可见光相机(SBV)上的最大值投影算法(MVPD)^[2,3]以及最大似然条痕检测算法^[4,5]。最大值投影算法处理目标速度大于 1 pixel/frame 时的检测性能为:在恒虚警率(10^{-3})条件下,检测概率为

收稿日期: 2009-03-14; 收到修改稿日期: 2009-04-09

基金项目: 国家 863 计划(2006AA1280)资助课题。

作者简介: 李克新(1977—),男,博士研究生,主要从事空间目标检测方法方面的研究。E-mail: dillonlkx@163.com

导师简介: 张 伟(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光学工程方面的研究。

E-mail: wzhang@hit.edu.cn

95%，能够满足 MSX 目标探测要求。而该算法在处理目标速度小于 1 pixel/frame 时，检测性能下降很多（信噪比大于 6）^[6]。国内关于星空背景空间目标的检测方法主要集中于邻帧差分技术检测空间目标。文献[7]提出利用双差分法实现星空背景下的快速目标检测，对连续采集的三帧图像中的前两帧和后两帧分别进行配准、差分和二值化，然后将两幅二值化图像进行逻辑乘，以检测出目标；文献[8,9]在假设背景近似服从匀速直线运动时，通过背景运动估计进行图像配准，实现低信噪比条件下的空间目标检测；文献[10]首先通过构建局部最小线段特征来计算出两幅星图间各对应像素的位移关系，完成相邻星图的配准；基于帧间差分去除恒星背景；最后采用动态规划方法实现运动目标的检测^[11,12]。上述方法可以实现对速度大于 1 pixel/frame 的目标的有效检测，但当目标运动速度小于 1 pixel/frame 时，上述算法通过邻帧差分去除背景的同时，也会消去目标，因此不能解决慢速运动目标的检测问题。

为了解决空间探测场景出现的慢速运动目标检测问题，提出了一种慢速运动目标最大似然条痕检测算法，将目标脉冲形状信息引入信号模型中，该算法是最大值投影算法的改进形式，并利用最大似然理论推导出了最大似然条痕检测算法模型。

2 信号模型

以美国的 STSS(Space Tracking and Surveillance Systems)系统为背景，研究星空背景空间目标检测算法。该系统由轨道高度为 1600 km、24 颗卫星组成覆盖全球的卫星网^[13]，可实现对低轨空间目标的监视探测。由于地球及其大气系统的长波红外辐射很强，STSS 系统的红外相机在探测空间目标时，必须避开地球及其大气系统红外辐射的干扰。因此，其光学镜头只能朝向宇宙冷背景探测目标。其目标探测几何示意如图 1 所示。

只研究[100,800] km 空域范围的目标。根据文献[14,15]对 SBIRS-Low 传感器与目标的最大最小距离分析结果可知，对[100,800] km 空域的目标进行观测时，STSS 系统相机与目标的最小距离为 1500 km，最大距离为 5000 km（假定相机的最大探测距离为 5000 km）。由开普勒定律可知，STSS 的卫星速度为 7 km/s，低轨空间目标的速度约为 7 km/s，则卫星与目标的相对运动速度范围为 0~14 km/s。若相机的积分时间为 10 ms，角分辨率为 90 μ rad，可计算出目标在焦平面上的速度范围为

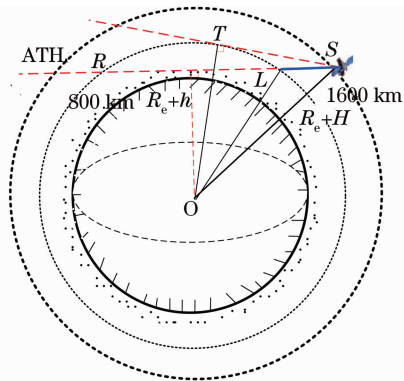


图 1 STSS 空间目标探测几何示意

Fig. 1 Geometry of space target detection for STSS
0~1.04 pixel/frame，积分时间为 20 ms 时，目标在焦面的速度为 0~2.07 pixel/frame。STSS 系统探测空间目标时将会面临慢速运动目标检测问题($v < 1$ pixel/frame)。

接收到目标信号的探测器像元同时包含了背景和噪声信号，其信号模型采用“加性”模型。在采样时刻某一给定像元的输出信号 Z_k 为

$$Z_k = af_k + b + n_k, \quad (1)$$

式中 $k = 1, 2, \dots, N$ ，为采样时间序列； a 为目标峰值幅值； f_k 为目标脉冲形状系数； b 为背景信号（短时不变）； n_k 为方差为 σ^2 的高斯白噪声。

3 慢速运动目标最大似然条痕检测算法数学模型

(1)式用矢量/矩阵符号表示为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} = [\mathbf{f}; \mathbf{e}] \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + \mathbf{n} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

式中 \mathbf{f} 是节点加权系数组成的向量。当没有目标信号光子入射到探测器上时，该向量元素为零，并且有以下关系成立：

$$\mathbf{x}^T = [a, b], \quad (3)$$

$$\mathbf{e}^T = [1, 1, \dots, 1], \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{f}; \mathbf{e}]. \quad (5)$$

假设噪声为高斯白噪声，则对数似然函数与数据残差平方和 L 成比例：

$$L = -2 \lg \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x}) / \sigma^2 \right] \right\} = (\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T (\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x}) / \sigma^2. \quad (6)$$

\mathbf{x} 的最大似然估计可以从下式得到

$$\partial[S(\mathbf{x})]/\partial\mathbf{x} = 2(\mathbf{z} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T \mathbf{A} / \sigma^2 = 0, \quad (7)$$

即

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N f_k^2 & \sum_{k=1}^N f_k \\ \sum_{k=1}^N f_k & N \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^N f_k z_k \\ \sum_{k=1}^N z_k \end{bmatrix}. \quad (8)$$

因为 σ^2 是不变的, 故可从(8)式中消去噪声方差项。

进一步解(8)式, 可得

$$[\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & -\hat{f} \\ -\hat{f} & f_k^2/N \end{bmatrix} (\Delta)^{-1}, \quad (9)$$

式中

$$\hat{f} = \sum_{k=1}^N f_k / N, \quad (10)$$

$$\Delta = \frac{1}{N} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^N f_k^2 & \sum_{k=1}^N f_k \\ \sum_{k=1}^N f_k & N \end{vmatrix} = \sum_{k=1}^N (f_k - \hat{f})^2. \quad (11)$$

因此目标峰值幅值估计是

$$\hat{a} = \sum_{k=1}^N f_k (z_k - b^*) / \Delta, \quad (12)$$

这里“准背景估计”为

$$b^* = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N z_k, \quad (13)$$

目标幅值估计误差方差为

$$\sigma_a^2 = \sigma^2 / \Delta. \quad (14)$$

对于含目标的图像序列, b^* 含目标信号部分, 在 a 与 b 估计中要考虑它的影响, 即最终的背景估计为 $\hat{b} = b^* - a$ 。

(12)式是对单个像元目标估计得出的结果, 若将接收到目标信号光子的所有探测像元(假设为 M 个)的估计组合起来就得到了目标幅值, 它是每个估计的加权平均。其中加权系数与估计误差方差成反比。用 m 表示 M 个像元之一, 则目标的组合幅值估计(条痕求和)为

$$\hat{a} = \left\{ \sum_{m=1}^M [\sigma_a^2(m)]^{-1} \right\}^{-1} \left\{ \sum_{m=1}^M [\hat{a}(m) / \sigma_a^2(m)] \right\} = S \left\{ \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M [f_{km} (z_{km} - b_m^*)] \right\}, \quad (15)$$

式中幅值误差方差, 或者称为“尺度因子” S 如下所示

$$S = \left[\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M (f_{km} - \hat{f}_m)^2 \right]^{-1}. \quad (16)$$

这是一个三维匹配滤波器(条痕探测器), 称之为最大似然条痕检测器, 用来计算穿过焦平面阵列的假设目标轨迹的目标幅值估计, 轨迹求和结果大于某一门限的估计将被识别为候选目标探测。

4 目标像元信号模型

4.1 目标亚像元位置定义

假设目标起始位置分别位于一个像元的四个不同位置, 如图 2 所示。W 表示正西方向, WS 表示西南方向, S 表示正南方向, C 表示中心位置。 θ 为目标速度方向与水平方向的夹角。

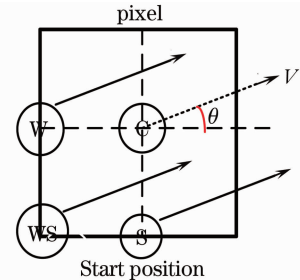


图 2 目标亚像素位置定义

Fig. 2 Definition for sub-pixel position of target

4.2 算法实现

最大似然条痕检测算法假设目标速度已知, 利用最大似然函数对目标和背景幅值进行最大似然估计, 估计出背景之后用信号值减去背景值得到残差图像; 根据已知目标脉冲矢量对残差图像进行加权匹配滤波, 含有目标的信息被提取出来; 在假设目标轨迹上对目标幅值估计进行累加, 大于某个门限的轨迹为候选目标轨迹。其流程如图 3 所示。

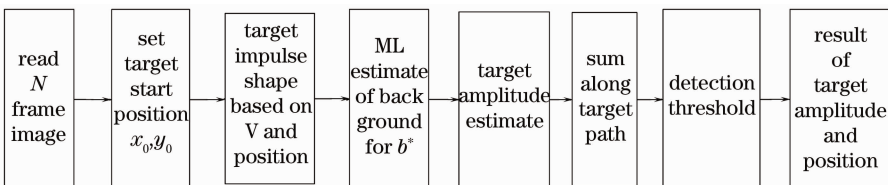


图 3 慢速运动目标最大似然条痕检测算法流程框图

Fig. 3 Block diagram of MLSD for slow target

算法实现步骤如下:

1) 假设亚像元目标的起始位置 (x_0, y_0) (亚像元位置)。

2) 根据目标速度 (V_x, V_y) 及位置 (x_0, y_0) 可以得到目标脉冲形状矢量 f 。

3) 根据(10)式和(11)式计算脉冲形状均值 \hat{f} 及脉冲形状残差平方和 Δ 。

4) 根据(13)式计算准背景估计 b^* 。

5) 根据式 $Z_k - b^*$ 去除背景, 得到背景去除数据残差 X_k 。

6) 根据(12)式计算目标幅值估计 a 。

7) 根据(15)式在假设目标轨迹上进行累加求和, 大于某个门限 T 的轨迹判为为目标轨迹。

$$\text{detection} = \begin{cases} \text{target track,} & \sum_{k=1}^N a(k) > T \\ \text{none,} & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

8) 根据步骤 7) 得到的目标轨迹, 求出相应的目标位置和幅值。

4.2 算法实时性分析

假设目标起始位置位于一个像元的 4 个不同的位置。慢速最大似然条痕探测算法, 完成步骤(3)需要 $2N$ 次加法、 N 次减法、 N 次平方、1 次除法; 完成步骤(4)需要 mnN 次加法、 mn 次除法; 完成步骤(6)需要 mnN 次加法、 mnN 次乘法、 mn 次除法; 完成步骤(7)需要 mn 次逻辑运算。(m, n 为图像行和列数)

故对于一个 mnN 的图像序列, 所需加减法运算量为 $2N + N + 2mnN + mnN = 3N + 3mnN$; 所需乘法运算量为 $N + mnN$; 除法运算量为 $1 + 2mn$; 逻辑运算量为 mn 。所需帧数为 N (指令周期)。

对于图像为 $128 \times 128 \times 10$ 的序列, 所需加减法运算量为 491550, 所需乘法运算量为 163850, 所需除法运算量为 32769, 所需逻辑运算量为 16384。假设加减法运算均花费 1 个指令周期, 乘法运算需要 2 个指令周期, 除法运算需花费 4 个指令周期, 逻辑运算花费 1 个指令周期, 则该算法对上述大小的图像序列需要 $491550 + 163850 \times 2 + 32769 \times 4 + 16384 = 966710$ 个 (指令周期)。在主频为 100 MHz 的 DSP 处理器上运行需要 0.0096671 s。则该慢速最大似然条痕探测算法的处理能力为 250 pixel/frame (图像大小为 128 pixel \times 128 pixel), 即 31.25 Mb/s (8 bit)。

4.3 算法信噪比增益

对于该理想检测算法, 其输出信噪比 $R_{\text{SN-out}}$ 与输入信噪比 $R_{\text{SN-in}}$ 的关系为

$$R_{\text{SN-out}} = \frac{\left(a \sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2}{\sigma_a^2} = \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2 \frac{a^2}{\sigma_a^2} = \left[(S)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2 \right] \frac{a^2}{\sigma^2} = \left[(S)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2 \right] R_{\text{SN-in}}. \quad (18)$$

可知对于理想检测算法, 其输出信噪比是输入信噪比的 $(S)^{-1} \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2$ 倍, 即信噪比增益为

$$R_{\text{SN-G}} = \left[\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M (f_{km} - \hat{f}_m)^2 \right] \left(\sum_{k=1}^N \sum_{m=1}^M f_{km} \right)^2. \quad (19)$$

图 4 和图 5 所示是信噪比增益与处理的图像帧数和目标速度的关系曲线。由图可知, 信噪比增益取决于算法所处理的帧数 (N) 与目标的速度 (v)、方向 (θ) 及目标轨迹起始点位置 (W, WS, S, C)。

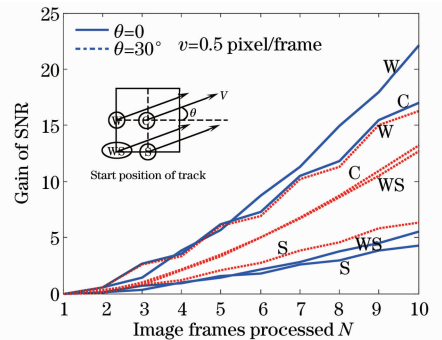


图 4 信噪比增益与处理的图像帧数的理论曲线

Fig. 4 Theoretical curve of SNRG with frames processed

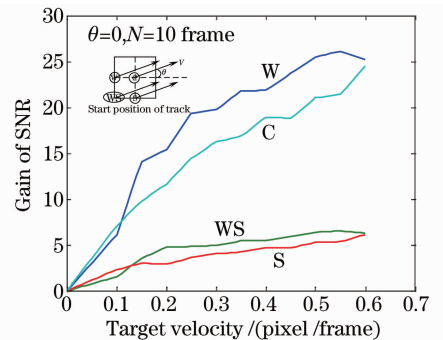


图 5 信噪比增益与目标速度的理论曲线

Fig. 5 Theoretical curve of SNRG with target velocity

5 算法性能仿真实验

取仿真生成的 128×128 的深空背景红外序列图

像(1000 frame)分成 100 组,每组大小为 128 frame×128 frame×10 frame,图 6 为其中一组数据。利用蒙特卡洛法技术仿真不同输入信噪比条件下的目标检

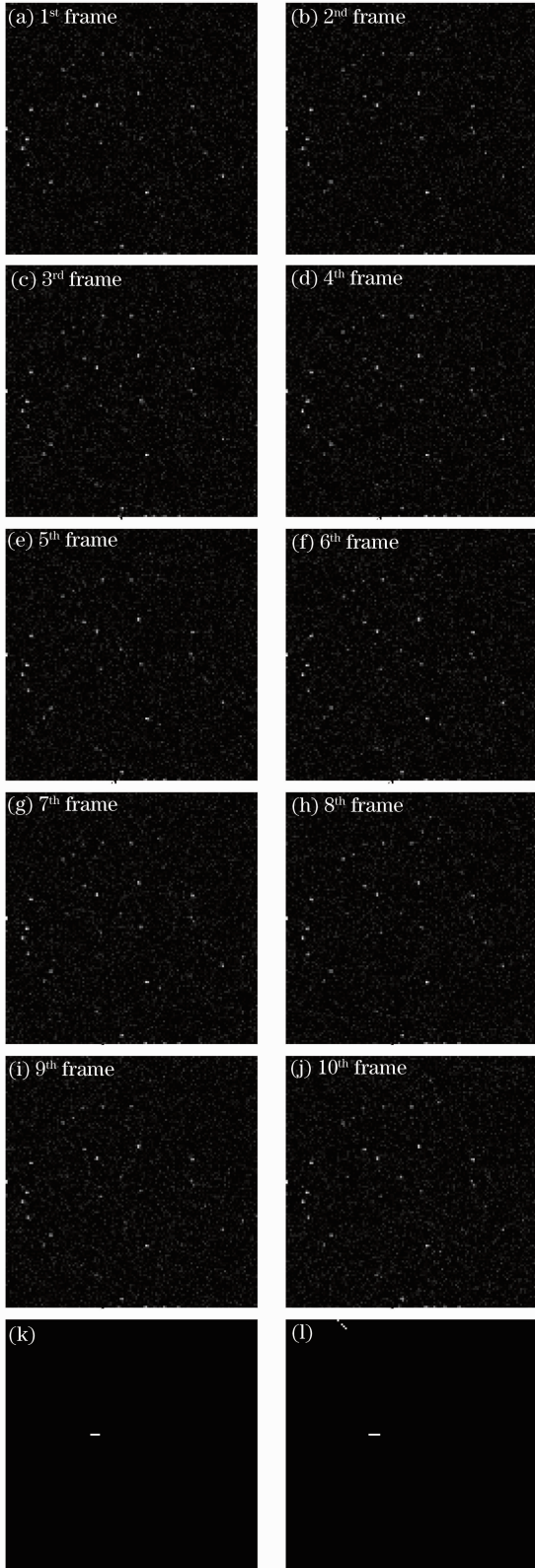


图 6 序列图像目标检测结果

Fig. 6 Detection result of target for MLSD and MVPD

测概率统计,每组数据仿真次数 200 次。序列图像目标检测结果如图 6 所示(从左至右,从上至下依次为第 1 到第 10 帧)。图 7 为算法仿真探测性能曲线。假设目标起始位置为 W ,目标速度 $v=0.5$ pixel/frame,则目标脉冲形状为 $f_k=[0.5,1,0.5]$ 。分别在图像序列中加入信噪比从 2~10 的目标。设置二值化门限使 1%的像素通过($T_{mlsd}=16, T_{mvpd}=6$)。

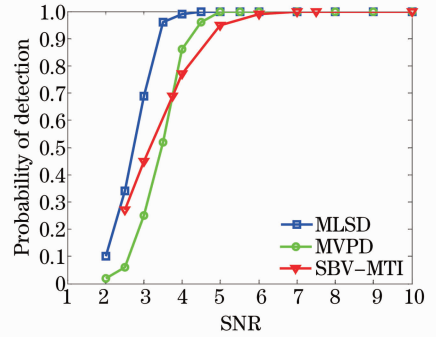


图 7 MLSD 算法与 MVPD 性能比较

Fig. 7 Comparison of detection performance for MLSD and MVPD

由图 7 可知,相同虚警概率下(0.01),最大似然条痕检测算法在信噪比大于 3.5 时,检测概率可达 95%以上,而 SBV 的最大值投影要达到相同检测概率所需的信噪比为 6(见表 1 数据)。即 MLSD 算法灵敏度比最大值投影算法提高了 2.5。图 7 中三角形图例的曲线由文献[15]提供。

6 结 论

提出的最大似然条痕检测算法能够解决深空背景下慢速运动目标的检测问题。建立了最大似然条痕检测算法模型,推导出 MLSD 的信噪比增益与所处理的图像帧数、目标速度和目标轨迹起始位置的函数关系,给出了性能曲线。得出的结论,输入信噪比为 3.5 时,最大似然条痕检测算法的检测概率为 95%(虚警概率为 0.01 条件下),其相同探测概率条件下所需信噪比比最大值投影算法降低了 2.5(即最大值投影算法要达到 95%的检测概率,所需信噪比为 6)。算法实时性分析表明,最大似然条痕检测算法实时处理能力为 31.25 Mb/s[主频 100 MHz 的数字信号处理器(DSP)条件下],具有一定的工程应用价值。

参 考 文 献

1 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(6): 1178~1182

- 张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. 光学学报, 2008, **28**(6): 1178~1182
- 2 A. M. Sessler, J. M. Cornwall, B. Dietz *et al.*. The measurement and discrimination capabilities of SBIRS-low, countermeasures [R]. Union of Concerned Scientists, 2000, 125~129
- 3 Yang Hua. An analysis of range of the infrared detecting system in SBIRS-low satellites[J]. *Modern Defence Technology*, 2006, **31**(3): 45~47
- 杨华. SBIRS-low 卫星红外探测系统探测距离分析[J]. 现代防御技术, 2003, **31**(3): 45~47
- 4 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 5 P. L. Chu. Optimal projection for multidimensional signal detection [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, **36**(5): 775~786
- 6 Sharma Jayant, Wiseman Andrew J, Zollinger George. Improving space surveillance with space-based visible sensor[J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2001, **13**(2): 223~236
- 7 S. C. Pohlig. Maximum likelihood detection of electro-optic moving targets[P]. USA, ADA249442. 1992-01-16
- 8 J. N. Sanders-Reed. Maximum likelihood detection of unresolved moving targets [J]. *IEEE Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, 1998, **34**(3): 844~859
- 9 Liu Hui, Hu Bingliang, Zhou Jinsong. The algorithm of research for target detection of micro-spacecraft target detector [J]. *Computer Simulation*, 2007, **24**(5): 34~36
- 刘 辉, 胡炳梁, 周锦松. 微型航天探测器目标识别算法研究 [J]. 计算机仿真, 2007, **24**(5): 34~36
- 10 Zhang Chunhua, Chen Biao, Zhou Xiaodong. Small target trace acquisition algorithm for sequence star images with moving background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(3): 524~530
- 张春华, 陈 标, 周晓东. 运动背景星空图像中小目标的运动轨迹提取算法[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(3): 524~530
- 11 Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gu Guohua *et al.*. Dim target detection based on optical flow histogram in low frame frequency in clouds background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1496~1501
- 管志强, 陈 钱, 顾国华等. 基于光流直方图的云背景下低帧频小目标探测方法[J]. 光学学报, 2008, **28**(8): 1496~1501
- 12 Qi Changsong, Liu Enhai, Zhong Jianyong. Discussion on space-based deep space small moving target detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 28~32
- 漆长松, 刘恩海, 钟建勇. 天基平台深空运动小目标检测[J]. 光电工程, 2008, **35**(5): 28~132
- 13 Congyi Liu, Zhongliang Jing, Gang Xiao *et al.*. Feature-based fusion of infrared and visible dynamic images using target detection[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(5): 274~277
- 14 Peng Zhang, Jianxun Li. Target detection under sea background using constructed biorthogonal wavelet [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(12): 697~700
- 15 P. L. Chu. Efficient detection of small moving objects[P]. AD-A213314. 1989-07-221