

文章编号 1004-924X(2009)03-0676-07

星空背景数字图像的生成

张 伟,潘海斌,鲍文卓,丛明煜,曹移明,李克新

(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:提出了一种相机在回路的星空背景数字图像生成方法。依据光度量与辐射度量的关系,建立恒星成像信号强度模型,计算目标在焦面的成像强度。通过星图软件 SKYMAP 对天区内恒星数目及星等进行统计,拟合得到相机观测视场内恒星数目与星等的统计函数。使用该统计函数模拟相机视场内的恒星数目及其对应的星等。最后,基于成像信号强度模型、恒星数目及星等的统计函数以及恒星在焦面的成像特性,提出全天区统计的星空背景数字图像生成方法。基于具体的相机 CCD 与光学系统参数,对星空背景数字图像生成方法进行仿真验证。结果表明,该方法可生成较大星等(星等 >10)的星空背景图像,基本满足了现有空间目标检测与跟踪算法对星空背景数据的要求。

关键词:空间监视;星空背景;星等;数字图像;成像;灰度值

中图分类号:TP751;TP391.9 **文献标识码:**A

Digital image generation of star map

ZHANG Wei, PAN Hai-bin, BAO Wen-zhuo, CONG Ming-yu, CAO Yi-ming, LI Ke-xin

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

Abstract: A digital image generating method based on the CCD and optical parameters of sensor system was presented. According to the relation of photometry and radiometry, a model of star imaging gray value was produced to calculate the imaging intensity for target in focal plane. Then, the number and magnitude of stars in the space were counted to obtain the statistic regularity of stars in the field of view by star map software SKYMAP. Finally, the digital image generating method was set up according to the statistic regularity of stars in the space and star image characteristic on CCD focal plane. The digital image generating method was simulated based on CCD and optical system parameter, results show that the method can generate a star map with higher apparent magnitude (magnitude >10) and can satisfy the requirements of space object detection and surveillance for star map.

Key words: space surveillance; star map; star magnitude; imaging; gray value

1 引 言

空间目标检测与跟踪算法是实现空间目标的识别与跟踪、导弹寻的等仿真的关键技术之一。星空背景的景象生成技术仿真生成的注入式数据是验证空间目标检测与跟踪算法的必要条件^[1]。

目前对星空背景的仿真主要是基于星表数据的建模和仿真,即利用星表数据,首先经过一系列空间坐标转换,将恒星视位置坐标统一转换到观测点坐标,得到恒星在指定时刻相对于观测者的视位置,然后进行星等线性变换,最后生成在不同观测时刻和不同观测地点所观测到的星空背景^[2-6]。

验证空间目标检测与跟踪算法时,这种仿真方法的优点是可以准确生成指定时间指定地点的星空背景。缺点是:(1)基于公开星表数据所生成的星空背景中恒星最小星等远远低于现有监视系统的极限探测星等^[7-8],而大量的低星等离散恒星杂波是考验空间目标监视系统信号检测能力的重要因素;(2)星等与灰度线性变换。意味着恒星成像信号强度与灰度是非线性的,生成的星空背景数据严重失真;(3)受观测时刻、地点等条件约束过大。不同观测条件,生成不同的星空背景,数据量偏大。观测条件未知时,则无法生成星空背景。

为解决这一问题,本文依据光度量与辐射度量的关系,提出了恒星成像信号强度计算模型和恒星数目与星等的统计函数,并分析了恒星的成像特性。在此基础上对空间恒星进行建模仿真,提出了一种新的星空背景生成方法,为大气层外观测到的星空背景景象生成技术提供参考。

2 恒星成像信号强度计算模型

恒星的成像过程由恒星目标光学系统、CCD 探测器等环节组成。因此,影响恒星成像信号强度的因素有:恒星的星等和光谱,光学系统的入瞳、焦距、光谱透过率,CCD 的量子效率、积分时间、探测波段和光谱响应^[9-10]。图 1 给出了恒星视星等到成像信号电子数的转换关系。

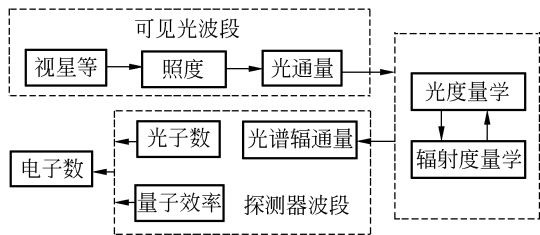


图 1 恒星视星等与成像信号电子数的转换关系示意
Fig. 1 Transfer relation of star magnitude and imaging intensity

2.1 星等与光通量的函数关系

目前已知大气层外太阳光照度 E_s 为 135 000 lx,星等为 -26.73。根据太阳的照度与星等,可以得出恒星的星等 m 与照度 E_t 关系:

$$E_t = E_s \times 10^{0.4(-26.73 - m)}, \quad (1)$$

相机入瞳处的光通量与星等关系可表示为:

$$F = E_t \times A_{pupil} = E_s \times A_{pupil} \times 10^{0.4(-26.73 - m)}, \quad (2)$$

其中, A_{pupil} 为入瞳面积。

2.2 光通量与光谱辐通量的函数关系

光源在可见光区无穷小波长范围内发射的光度量称为光谱光度量。则光通量 F 应表示为:

$$F = \int_{0.38}^{0.78} F_\lambda d\lambda, \quad (3)$$

其中, F_λ 为光谱光通量。

根据辐射度参量与光度参量的关系,光谱光通量 F_λ 与光谱辐通量 Φ_λ 的关系如下式所示:

$$F_\lambda = K(\lambda)\Phi_\lambda, \quad (4)$$

其中, $K(\lambda)$ 为正常人眼的明视觉光谱光视效能,如图 2 所示。

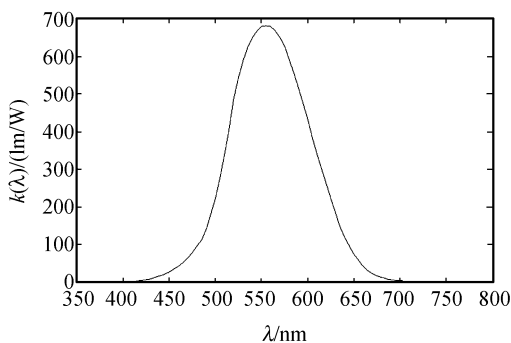


图 2 光谱光视效能曲线

Fig. 2 Curve of spectral luminous efficiency

光谱辐通量 Φ_λ 随波长 λ 的分布曲线称为该光源的绝对光谱辐通量分布曲线。该曲线任一波

长的光谱辐通量 Φ_λ 等于光谱辐通量最大值 $\Phi_{\lambda_{\max}}$ 乘以相对光谱辐通量 $\Phi(\lambda r)$:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\lambda_{\max}} \times \Phi(\lambda r), \quad (5)$$

将式(7)、(8)代入式(6),得到:

$$F = \int_{0.38}^{0.78} K(\lambda) \Phi_{\lambda_{\max}} \times \Phi(\lambda r) d\lambda. \quad (6)$$

由式(5)、(6)得到光谱辐通量与光通量 Φ_λ 的函数关系:

$$\Phi_\lambda = \Phi_{\lambda_{\max}} \times \Phi(\lambda r) = \frac{F \times \Phi(\lambda r)}{\int_{0.38}^{0.78} K(\lambda) \times \Phi(\lambda r) d\lambda}. \quad (7)$$

2.3 星等与成像信号强度的函数关系

CCD 像元是一种光电器件,通过接收光子转化为电子来产生电信号,这种转化效率称为量子

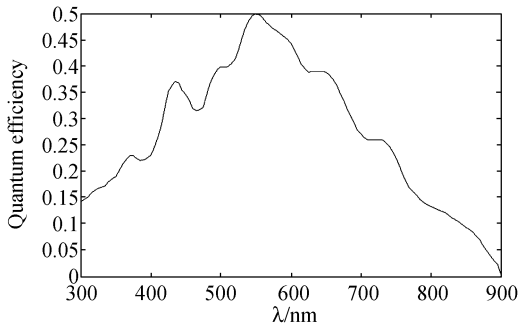


图 3 CCD 量子效率曲线

Fig. 3 Curve of CCD quantum efficiency

效率,图 3 为 SBV 的 CCD 量子效率。单色量子效率 η_λ 等于在单位时间内光电器件产生的电子数 $n_e(\lambda)$ 与单位时间内接收某波长 λ 的光子数 $n_v(\lambda)$ 之比。

$$\eta_\lambda = \frac{n_e(\lambda)}{n_v(\lambda)}, \quad (8)$$

因此 CCD 像元单位时间内产生的电子数为

$$n_e = \int_0^\infty n_v(\lambda) \eta_\lambda d\lambda. \quad (9)$$

而单位时间内接收的某波长 λ 光子数 $n_v(\lambda)$ 等于波长 λ 处的光谱辐通量 Φ_λ 除以该波长 λ 的光子能量。

$$n_v(\lambda) = \Phi_\lambda / h\nu = \frac{\Phi_\lambda \times \lambda}{h \times c}, \quad (10)$$

其中 c —外太空光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s;

h —普朗克常量, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s。

将式(10)代入式(9),得到 CCD 像元单位时间内产生的电子数与光谱辐通量的关系:

$$n_e = \int_0^\infty \frac{\Phi_\lambda \times \eta_\lambda \times \lambda}{h \times c} d\lambda, \quad (11)$$

将式(7)代入式(11),得到 CCD 像元单位时间内产生的电子数与光通量的关系:

$$n_e = \int_0^\infty \frac{F \cdot \Phi(\lambda r) \cdot \eta_\lambda \cdot \lambda}{h \cdot c \cdot \int_{0.38}^{0.78} K(\lambda) \cdot \Phi(\lambda r) d\lambda} d\lambda. \quad (12)$$

CCD 像元在积分时间产生的电子在经过 AD 量化后得到成像信号强度。将式(2)代入式(12),得到成像信号总强度的与视星等的函数关系:

$$I_t = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E_s \cdot A_{\text{pupil}} K_T \Phi(\lambda r) \eta_\lambda s_{\text{integ}}}{10^{0.4(26.73+m)} \cdot hc \sigma_{\text{quan}} \int_{0.38}^{0.78} K(\lambda) \Phi(\lambda r) d\lambda} d\lambda, \quad (13)$$

其中, λ_1, λ_2 为天基望远镜探测波段上下限;

A_{pupil} 为入瞳面积;

K_T 为系统平均光谱透过率,取 0.8;

s_{integ} 为帧积分时间;

σ_{quan} 为 AD 量化因子;

η_λ 为 CCD 量子效率;

$\Phi(\lambda r)$ 为恒星的相对光谱辐通量函数;

$K(\lambda)$ 为正常人眼的明觉光谱光视效能函数。

上述参数除 $\Phi(\lambda r)$ 与 $K(\lambda)$ 外都与探测器参数有关,一旦探测器选定,上述参数都可知。

$\Phi(\lambda r)$ 与恒星光谱有关,而天区中恒星的光谱范围相当宽,恒星光谱按着谱线的种类和相对强度分类,主要分为 O, B, A, F, G, K 和 M 等主型,其中 A, G, M 型光谱的波长在 0.45~0.71 μm 之间,数量最多的恒星为 G 型。文献[11]中,对于 5 等星以上的恒星光谱统计结果表明,0.549 μm 可作为恒星辐射强度峰值的参考波长^[11]。

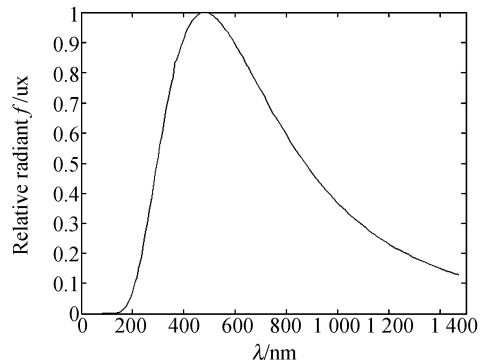


图 4 峰值波长 0.549 μm 的恒星相对光谱辐通量曲线

Fig. 4 Spectral radiant flux of a star at peak of 0.549 μm

假定恒星为峰值波长 $0.549 \mu\text{m}$ 绝对黑体,通过维恩位移定律 $\lambda_{\text{peak}} T = b (b = 2\,897 \mu\text{m} \cdot \text{K})^{[12]}$,求得 $T = 5\,276 \text{ K}$. 计算得到温度 $5\,276 \text{ K}$ 的绝对黑体相对光谱辐通量曲线,如图 4 所示。

3 空间恒星成像特性分析

恒星距离地球非常遥远,几乎所有恒星的三角视差都 $< 0.1''$ (绝大部分 $< 0.01''$),远远小于现有相机的像元分辨率,因此光学系统对空间恒星成像时,理想像为点,但受到圆孔衍射的影响,可能导致恒星在焦面的成像由点成像扩散为多像元成像。扩散像元数的多少与目标成像信号总强度及像元尺寸有关。根据圆孔衍射的相对强度分布公式^[13]:

$$\frac{I}{I_0} = \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (14)$$

$$Z = ka\theta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot a \cdot \frac{r}{f} = \frac{\pi r}{\lambda F}, \quad (15)$$

其中, F 为光学系统 F 数;

J_1 为一阶贝塞尔函数。

由式(14)、(15),可得到圆孔衍射环半径 r 处的相对强度为:

$$\frac{I}{I_0} = \left[\frac{2J_1(\pi r/\lambda F)}{\pi r/\lambda F} \right]^2, \quad (16)$$

因此,某一波段($\lambda_1 \sim \lambda_2$)内圆孔衍射环半径 r 处的相对强度可表示为:

$$\frac{I}{I_0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{2J_1(\pi r/\lambda F)}{\pi r/\lambda F} \right]^2 d\lambda. \quad (17)$$

图 5 给出了 $0.3, 0.55, 0.9 \mu\text{m}$ 处及 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段内 F 数为 3 时,相对强度随衍射环半径的变化曲线。

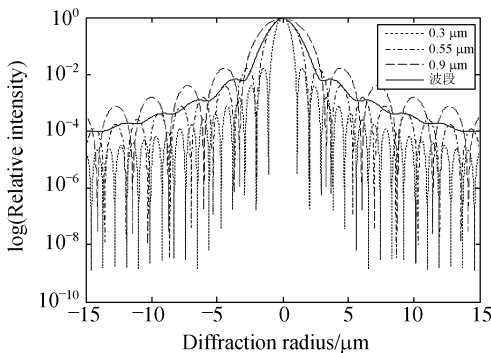


图 5 相对强度随衍射环半径的变化曲线

Fig. 5 Curve of relative intensity and diffraction radius

由式(17),可得到波段内半径为的圆孔衍射环内信号相对强度可表式为:

$$\frac{I}{I_0} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^r \left[\frac{2J_1(\pi R/\lambda F)}{\pi R/\lambda F} \right]^2 dR d\lambda. \quad (18)$$

根据式(18),图 6 给出了 $0.3, 0.9 \mu\text{m}$ 处及 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段 F 数为 3 时圆内信号相对强度随衍射环半径的变化曲线。表 1 给出了 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 成像波段内衍射圆环半径与圆内相对信号强度的关系。

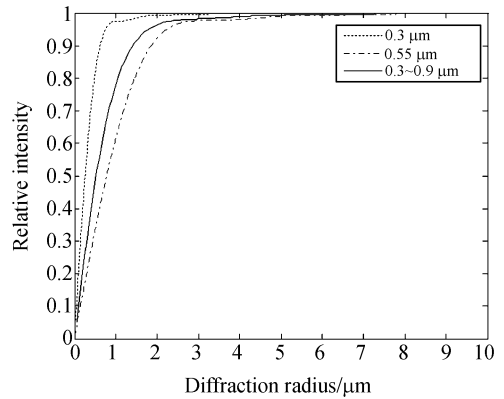


图 6 圆内相对信号强度随衍射圆环半径的变化曲线

Fig. 6 Curve of relative intensity in circle and diffraction radius

表 1 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段内衍射圆环半径与圆内信号相对强度的关系

Tab. 1 Relation of relative intensity in circle and diffraction radius from $0.3 \mu\text{m}$ to $0.9 \mu\text{m}$

圆半径 (μm)	圆内相对信号强度	圆半径 (μm)	圆内相对信号强度
0.1	0.104 9	2.4	0.9770
0.6	0.556 8	4.8	0.9935
1.2	0.849 1	9.6	0.9983

从上述图表中可看出,恒星在 $0.3 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 波段,成像信号 85% 的能量集中在直径 $2.5 \mu\text{m}$ 的圆斑内,98% 的能量集中在直径 $5 \mu\text{m}$ 的圆斑内。

4 恒星数目与星等的统计规律

本文通过 SKYMAP 星图软件,对全天区内 $0 \sim 17$ 星等的恒星数目进行统计,得到如图 7 所示的关系。

对全天区 0~17 星等的恒星统计数量进行拟合,可认为全天区恒星数量近似服从以下规律:

$$N(m) = 4.8221 \times e^{1.5732m - 0.0362m^2}, \quad (19)$$

式中, m 为恒星星等; $N(m)$ 为全天区星等小于或等于 m 的恒星数。

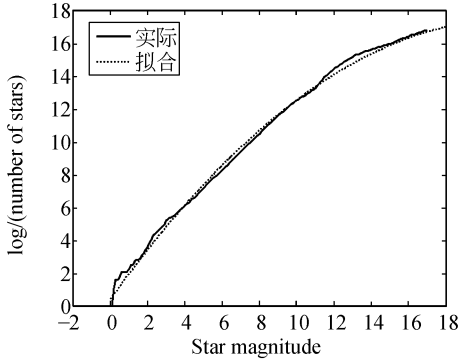


图 7 恒星数目与星等关系

Fig. 7 Relation between number of stars and star magnitudes

若相机视场为 $\theta \times \theta$, 所拍摄的天区占全天区的比例为: $\sin^2(\theta/2)/4\pi$ 。因此, 视场内捕获到的某星等范围($m_1 \sim m_2$)的恒星数量为:

$$N_{FOV} = (N(m_2) - N(m_1)) \cdot \sin^2(\theta/2)/4\pi = 0.145 \cdot (e^{1.5732m_2 - 0.0362m_2^2} - e^{1.5732m_1 - 0.0362m_1^2}) \cdot \sin^2(\theta/2). \quad (20)$$

5 空间恒星成像模拟

5.1 探测相机参数选择

本文选择美国 SBV 相机作为探测相机, 根据其光学及 CCD 参数来计算空间恒星的成像强度、成像能量分布及视场内数量。SBV 相机参数如下所示^[14]。

表 2 SBV 相机的 CCD 及光学参数

Tab. 2 CCD and optical parameters of SBV

光谱范围	0.3~0.9 μm
CCD 视场	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
像元尺寸	27 μm
孔径, F 数	15 cm, $F=3$
帧积分时间	0.625 s
帧像元数	420×420
量化位数	12 bit
AD 量化因子	$20e^-/\text{灰度}$

5.2 恒星成像信号强度

将表 2 中的 SBV 相机参数代入公式(13), 得到恒星的成像信号总强度与目视星等的关系如表 3 所示。

表 3 恒星的成像信号总强度与目视星等的关系

Tab. 3 Relation of imaging intensity and star magnitude

信号强度	星等	信号强度	星等	信号强度	星等
1	17.1	16	14.1	256	11.09
2	16.35	32	13.35	512	10.34
4	15.59	64	12.59	1 024	9.59
8	14.85	128	11.84	2 048	8.83

5.3 恒星成像能量分布

根据表 1, 恒星在 0.3~0.9 μm 波段成像信号 85% 的能量集中在直径 2.5 μm 的圆斑内, 98% 的能量集中在直径 5 μm 的圆斑内。而 2.5、5 μm 远小于 27 μm 的 SBV 相机 CCD 像元尺寸, 因此可认为恒星点像能量基本集中在一个像元内。

5.4 视场内恒星数量

根据公式(20), 表 4 给出了 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 视场内所拍摄到的几组星等区域($m_1 \sim m_2$)的恒星数量。

表 4 视场内几组星等区域的恒星数量

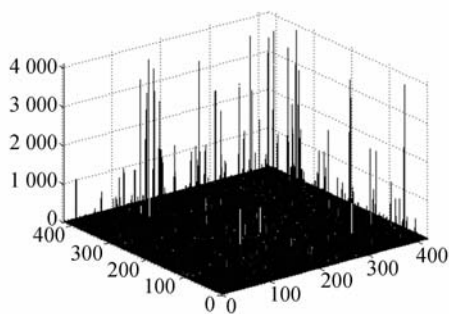
Tab. 4 Number of stars in several groups of magnitude range in field of view

数量	星等区域	数量	星等区域	数量	星等区域	数量	星等区域
2 118	17.1~16.35	1136	14.85~14.1	378	12.59~11.84	84	10.34~9.59
1816	16.35~15.59	830	14.1~13.35	242	11.84~11.09	46	9.59~8.83
1468	15.59~14.85	574	13.35~12.59	144	11.09~10.34	25	> 8.83

5.5 空间恒星成像模拟

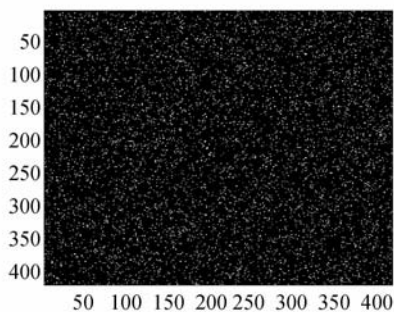
本文模拟恒星成像时, 对星等进行采样, 选择星等采样宽度 Δm , 计算 $m \sim m + \Delta m$ 范围内恒星数量, 将 $m + \Delta m$ 所对应的成像强度作为这个星等区域的成像强度。假定恒星在焦面坐标系中横坐标 X 与纵坐标 Y 都服从均匀分布 $X, Y \sim U[0, 420]$ 。

当星等采样宽度为 0.76 星等时, 结合表 2 与表 4 中数据模拟 SBV 相机视场 $1.4^\circ \times 1.4^\circ$ 内成像强度 > 1 的所有恒星。星图模拟结果如图 8(a)、8(b)、8(c)与 8(d)所示。



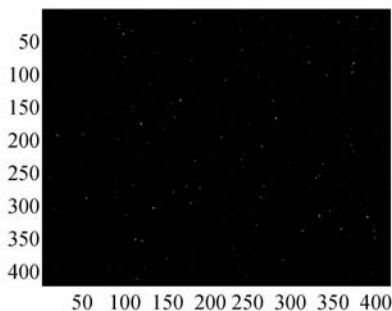
(a) 模拟星图幅值图

(a) Simulated values of stars



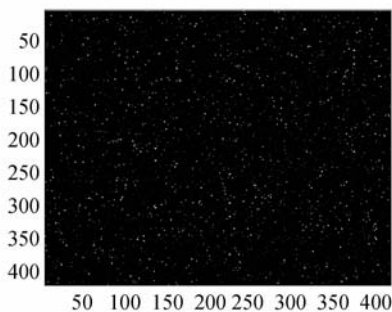
(d) 二值化灰度图

(d) Gray map of 0-1 gray scale



(b) 0-4 096 灰度等级的灰度图

(b) Gray map of 0-4 096 gray scale



(c) 0-128 灰度等级的灰度图

(c) Gray map of 0-128 gray scale

图8 恒星成像模拟图

Fig.8 Simalated map of star imaging

通过图8,可以看出在星图中绝大部分恒星都集中在低幅值区域,形成了恒星杂波。这些离散的低幅值恒星杂波增加了空间弱小目标检测与跟踪的难度。

6 结 论

(1) 根据相机在回路的恒星成像信号强度模型计算的星空背景或空间目标成像信号能量的精度较高,该模型具有一定的实用性。

(2) 准确表达了成像能量在空间上的分布函数,可更准确地模拟恒星在焦面上的成像特性。

(3) 通过天区内恒星数量的统计规律函数,生成较大星等(星等 >10)的星空背景图像,可更好地满足星空场景仿真系统的工程应用的要求。

(4) 依据星空背景数字图像生成方法生成的星图是基于全天区统计的,因此在全天区内具有普遍适用性,可更好验证空间目标检测与跟踪算法。

空间科学技术,1999(3):46-50.

ZHANG J P, LIN T. A method of CCD star image simulation[J]. *Chinese Space Science & Technology*, 1999(3):46-50. (in Chinese)

[3] 郝胜国,郝志航.星敏传感器星象模拟软件的研究[J]. *光学精密工程*, 2000,8(3):208-212.

HAO SH G, HAO ZH H. Star image simulation software of star-tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(3):208-212. (in Chinese)

参考文献:

[1] 缪永伟,王章野,王长波.星空背景的建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2005,17(2):267-269.

MIAO Y W, WANG ZH Y, WANG CH B. Modeling and simulation of celestial background[J]. *Journal of System Simulation*, 2005,17(2):267-269. (in Chinese)

[2] 张钧萍,林涛.一种模拟 CCD 星图的方法[J]. *中国*

- [4] 全伟,房建成.高精度星图模拟及有效性验证新方法[J].光电工程,2005,32(7):22-26.
QUAN W, FANG J CH. High-precision simulation of star map and its validity check[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(7): 22-26. (in Chinese)
- [5] 朱华统.常用大地坐标系及其变换[M].北京:解放军出版社,2003.
ZHU H T. *Service Geodetic Coordinates and Transform*[M]. Beijing:Liberator Press,2003. (in Chinese)
- [6] 李春艳,李怀锋,孙才红.高精度星敏传感器天文标定方法及观测分析[J].光学精密工程,2006,14(4):558-563.
LI CH Y, LI H F, SUN C H. Astronomical calibration method and observation analysis for high-accuracy star sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4):558-563. (in Chinese)
- [7] GENE H M. Space surveillance[J].*United States Air Force Space Command*,2000;0-52.
- [8] SRIDHARAN R, PENZA A F. Space surveillance network capabilities [J]. *Proceedings of SPIE*, 1998,3434:88-99.
- [9] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏传感器探测灵敏度研究[J].光学精密工程,2006,14(4):553-557.
LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS star tracker[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):553-557. (in Chinese)
- [10] 张辉,钟建勇,袁家虎,等.电路噪声对星敏传感器星点定位精度的影响[J].光学精密工程,2006,14(6):1052-1056.
ZHANG H, ZHONG J Y, YUAN J H, *et al.*. Circuit noise effects on star sensor position accuracy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 1052-1056. (in Chinese)
- [11] 陈世平.空间相机设计与实验[M].北京:宇航出版社,2003.
CHEN SH P. *Design and Experiment of Space Sensor* [M]. Beijing: Acrospace Press, 2003. (in Chinese)
- [12] 吴宗凡,柳美琳,张绍局.红外与微光技术[M].北京:国防工业出版社,1998.
WU G F, LIU M L, ZHANG SH J. *Infrared and Micro-photo Technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 梁铨廷.物理光学[M].北京:机械工业出版社,1998.
LIANG Q L. *Physical Optics* [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [14] 张科科,周峰,傅丹鹰.天基空间目标监视可见光遥感器研究[J].航天返回与遥感,2005,26(4):10-13.
ZHANG K K, ZHOU F, FU D Y. Research on space-based space surveillance visible sensor[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(4):10-13. (in Chinese)

作者简介:



张 伟(1962—),男,黑龙江牡丹江人,教授、博士生导师,主要研究方向为空间光学工程。E-mail: wzhang@hit.edu.cn



潘海斌(1979—),男,浙江瑞安人,博士研究生,主要从事空间目标背景特性及检测算法的研究。E-mail: hitphb@126.com

鲍文卓(1983—),男,内蒙古通辽人,博士研究生,2007年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间光学工程研究。E-mail: latermouse@126.com

丛明煜(1964—),男,黑龙江省哈尔滨人,博士研究生,2001年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事空间光学工程研究。E-mail: mycong@hit.edu.cn

曹移明(1982—),男,江苏泰兴人,博士研究生,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事空间红外相机性能建模与仿真研究。E-mail: caoyiming888@126.com

李克新(1977—),男,河北保定人,博士研究生,2004年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,主要从事空间目标背景特性及检测算法研究。E-mail: dillonlkx@163.com