

船用星敏传感器探测灵敏度计算及分析

佟 帅 李 辉 王安国

(海军大连舰艇学院航海系, 辽宁 大连 116018)

摘要 星敏传感器作为一种被广泛应用于各种载体上的高精度自主导航定位设备,探测灵敏度影响着其工作效率及测量精度。与航天器载体上的星敏传感器不同,船用星敏传感器工作在海平面环境下,其探测灵敏度不仅由镜头及成像传感器的各项参数决定,还要受到夜空背景以及大气透射等外部因素的影响。为了给船用星敏传感器的研制与应用提供理论依据,通过对星光传播、传感器成像以及信号提取过程的研究分析,推导出了船用星敏传感器探测灵敏度的计算模型,并通过实验验证了该模型的有效性,在此基础上,分析了各项因素对船用星敏传感器探测灵敏度的影响情况,根据分析结果对船用星敏传感器系统的设计研制提出了相应建议。

关键词 探测器;天文导航;船用星敏传感器;探测灵敏度;计算模型;影响因素

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1004003

Calculation and Analysis of Detection Ability for Shipboard Star Sensor

Tong Shuai Li Hui Wang Anguo

(Department of Navigation, Dalian Naval Academy, Dalian, Liaoning 116018, China)

Abstract As an accurate independent navigation equipment, star sensor is widely used on different kinds of platform. The detection ability directly influences the efficiency and measurement accuracy of the star sensor. Shipboard star sensor works on the sea, which is different from the space, the detection ability is influenced not only by the parameters of the lens and the image sensor, but also by the night sky background and the atmosphere. In order to provide theoretical basis for research and application of shipboard star sensor, a calculation model of the detection ability for shipboard star sensor is deduced according to the study and analysis of star light propagation, imaging and signal extraction process, and the correctness of the model is verified by experiment. All the influencing factors are analyzed with the model. In the end, several suggestions on design and development of shipboard star sensor are proposed based on the analysis results.

Key words detectors; celestial navigation; shipboard star sensor; detection ability; calculation model; influencing factors

OCIS codes 040.1880; 040.5160; 280.4788

1 引 言

作为一种高精度的自主导航定位设备,星敏传感器一直是天文导航的重要研究方向。目前的星敏传感器已经发展至第二代^[1],可获得高达角秒量级的姿态信息,精度与大型惯导系统相当甚至更高,且不存在惯导系统的误差积累问题,能够长时间独立工作。同时,星敏传感器还具有体积小、重量轻、结构简单、成本低廉等优点,因而被广泛应用在卫星、导弹、飞机、

舰船等载体的定位测姿上^[2]。

探测灵敏度决定了星敏传感器能在一定视场内探测到多少恒星,影响着星敏传感器的工作效率和测量精度^[3]。星敏传感器探测恒星的过程受到恒星星等、背景辐射、镜头、传感器及噪声等诸多条件和因素的影响^[4],因此对其探测灵敏度的计算需要考虑到探测过程中的各个环节。目前的星敏传感器的应用主要集中于航天领域^[5~11],对于星敏传感器探测灵敏度的

收稿日期: 2014-03-27; 收到修改稿日期: 2014-05-13

基金项目: 国家科技支撑计划(2012BAH36B00)

作者简介: 佟 帅(1987—),男,博士研究生,主要从事天文导航、图像处理方面的研究。E-mail: tongs05@163.com

导师简介: 王安国(1954—),男,博士,教授,主要从事军事航海、天文导航方面的研究。E-mail: wagoffice@163.com

研究大都设定在宇宙空间环境条件下,对位于地表(海平面)环境下的星敏感器的探测灵敏度研究尚不多见。

船用星敏感器工作在海平面环境下,其探测灵敏度分析除需考虑上述各项因素外,还需要考虑夜空背景亮度,大气透射等因素。为了给船用星敏感器的设计研究以及应用提供一定理论依据,本文对船用星敏感器探测灵敏度的计算模型进行了推导,并进行了实验验证。在此基础上,对各项因素对于探测灵敏度的影响情况进行分析,给出若干船用星敏感器设计研制方面的建议。

2 船用星敏感器探测灵敏度计算模型

2.1 计算模型推导建立

天文上通常以零等星在大气层外的照度 $E_0 = 2.65 \times 10^{-6} \text{ lx}$ 为基准^[8],以“星等每相差 5 等照度相差 100 倍”为规则来计算不同恒星的视星等。因此,恒星的视星等 M_V 与其在大气层外照度 E_{M_V} 之

间的关系可表示为

$$M_V = \lg \frac{E_0}{E_{M_V}} / \lg 2.512. \quad (1)$$

而在大气层内(海平面上)的恒星照度还需要考虑大气透射的影响,恒星大气层内照度 E'_{M_V} 与大气层外照度 E_{M_V} 之间的关系为

$$E'_{M_V} = E_{M_V} \cdot \tau_\lambda^{\sec Z}, \quad (2)$$

式中 Z 为天顶距, τ_λ 为波长 λ 光的大气透射率

$$\tau_\lambda = \exp[-(0.009\lambda^{-4} + 0.223)]. \quad (3)$$

尽管不同类型的恒星由于温度不同(如织女星为 A 类星,温度 10000 K),其光谱也不相同,但是在计算视星等时只依据恒星在可见光波段内的辐射强度(照度),采用可见光波段成像传感器,因此只讨论恒星在可见光波段(360~780 nm)的辐射情况。这种情况下,可见光波段总光子流密度是以不同波长光子流密度乘以该波长的人眼视效率系数 S_e 累加计算而得,实测可见光不同波长的视效率系数 S_e 是离散的,如表 1 所示。

表 1 人眼视效率系数

Table 1 Human sight efficiency parameters

λ / nm	S_e	λ / nm	S_e	λ / nm	S_e	λ / nm	S_e
360	0	470	0.13902	580	0.87	690	0.0082
370	0.00001	480	0.20802	590	0.757	700	0.0041
380	0.00004	490	0.323	600	0.631	710	0.00209
390	0.00012	500	0.503	610	0.503	720	0.00105
400	0.0004	510	0.71	620	0.381	730	0.00052
410	0.00121	520	0.862	630	0.265	740	0.00025
420	0.004	530	0.954	640	0.175	750	0.00012
430	0.0116	540	0.99495	650	0.107	760	0.00006
440	0.023	550	1	660	0.061	770	0.00003
450	0.038	560	0.995	670	0.032	780	0.00001
460	0.067	570	0.952	680	0.017		

因此,对可见光波段进行离散划分:以表 1 中所列波长为各波段中心波长,波段范围为中心波长 $\pm 5 \text{ nm}$,对第 k 个可见光波段 λ_k ,以其中中心波长视效率系数做为波段视效率系数 $S_e(\lambda_k)$, $\varphi_0(\lambda_k)$ 表示波段光子流密度。已知零等星大气层外的总光子流密度 $\Phi_0 = 5 \times 10^{10}$,则 λ_k 波段的实际光子流密度 $\varphi_0(\lambda_k)$ 计算如下:

$$\begin{cases} \varphi_0(\lambda_k) = \Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \\ \bar{S}_e(\lambda_k) = \frac{S_e(\lambda_k)}{\sum_k S_e(\lambda_k)}. \end{cases} \quad (4)$$

进而可以得到大气层内 M_V 等恒星和夜空背景的光子流密度 φ_S 、 φ_B 分别为

$$\varphi_S = \sum_k \frac{\varphi_0(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\sec Z}}{2.512^{M_V}} = \sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\sec Z}}{2.512^{M_V}}, \quad (5)$$

$$\varphi_B = \sum_k \frac{\varphi_0(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\sec Z}}{2.512^{M_B}} = \sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\sec Z}}{2.512^{M_B}}, \quad (6)$$

$$M_B = \lg \frac{E_0}{E_B} / \lg 2.512. \quad (7)$$

M_B 为夜空背景亮度的等价星等。在计算各波段大气透射率时,近似取波段中心波长 λ_k 的透射率作为整个波段的大气透射率。

则成像传感器最终探测到恒星信号和夜空背景信号光子数 S 和 B 分别为

$$S = \varphi_S \cdot A \cdot K \cdot Q \cdot \mu \cdot T = \sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\text{secZ}} \cdot A \cdot K(\lambda_k) \cdot Q(\lambda_k) \cdot \mu \cdot T}{2.512^{M_V}}, \quad (8)$$

$$B = \varphi_B \cdot A_P \cdot K \cdot Q \cdot T = \sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\text{secZ}} \cdot A_P \cdot K(\lambda_k) \cdot Q(\lambda_k) \cdot T}{2.512^{M_B}}, \quad (9)$$

式中 A 为镜头入瞳面积, $K(\lambda_k)$ 为光学系统对 λ_k 波段中心波长的透过率, $Q(\lambda_k)$ 为成像传感器对 λ_k 波段的中心波长的量子效率, T 为积分时间, A_P 为成像传感器单个像元角面积, μ 为单个像元信号能量系数(像元角面积与弥散斑角面积的比值)。

成像传感器噪声主要包括转移噪声, 输出噪声, 暗电流噪声以及信号提取电路噪声, 其中转移噪声和输出噪声在采用相关双采样技术的情况下已可以基本忽略。因此, 成像过程中总噪声为^[8]

$$N = (n_S^2 + n_B^2 + n_D^2 + N_C^2)^{1/2} = (S + B + N_C^2)^{1/2}, \quad (10)$$

式中 N_C 为成像传感器噪声, 包括暗电流噪声 n_D 和

信号提取噪声 N_{CIR} , n_S 和 n_B 分别为星光入射光子散粒噪声和夜空背景入射光子散粒噪声。

星敏传感器探测应满足一定探测率与虚警率要求, 该要求与目标信噪比直接相关。一般要求探测率大于 95%, 虚警率小于 5%, 则此时探测信号的信噪比应不小于 $6^{[8]}$, 即

$$R_{\text{SN}} = S / (S + B + N_C^2)^{1/2} \geq 6, \\ S \geq 18 + 6 \sqrt{B + N_C^2 + 9}. \quad (11)$$

将(9)和(10)式带入(13)式, 得到船用星敏传感器探测灵敏度计算模型

$$\sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\text{secZ}} \cdot A \cdot K(\lambda_k) \cdot Q(\lambda_k) \cdot \mu \cdot T}{2.512^{M_V}} \geq \left[18 + 6 \sqrt{9 + N_C^2 + \sum_k \frac{\Phi_0 \cdot \bar{S}_e(\lambda_k) \cdot \tau_{\lambda_k}^{\text{secZ}} \cdot A_P \cdot K(\lambda_k) \cdot Q(\lambda_k) \cdot T}{2.512^{\lg \frac{E_0}{E_B} / \lg 2.512}}} \right]. \quad (12)$$

2.2 计算模型验证

验证实验 1: 天顶距 $Z=0^\circ$; 镜头及成像传感器主要参数如下: 镜头对可见光透过率约为 $K=85\%$, 镜头入瞳直径 0.1 m, 焦距 $f=0.16$ m, 夜空

背景亮度约为 0.01 lx, 由成像传感器量子效率曲线近似估值得到不同波段中心波长处量子效率如表 2 所示。

表 2 不同波长量子效率

Table 2 Quantum efficiency of different wavelengths

λ / nm	$\eta / \%$	λ / nm	$\eta / \%$	λ / nm	$\eta / \%$	λ / nm	$\eta / \%$
360	14.5	470	47.0	580	59.0	690	56.0
370	15.5	480	49.5	590	59.0	700	55.0
380	21.0	490	52.0	600	59.5	710	54.0
390	25.5	500	53.0	610	60.0	720	52.5
400	30.0	510	54.0	620	60.0	730	50.5
410	34.5	520	55.0	630	60.0	740	48.5
420	38.0	530	56.0	640	60.0	750	47.0
430	41.0	540	57.0	650	60.0	760	45.5
440	42.5	550	58.0	660	59.5	770	44.5
450	44.0	560	58.5	670	58.5	780	42.0
460	45.5	570	58.5	680	57.5		

成像传感器信噪比 52 dB, 像元角面积 $A_P = 8.6 \times 8.3 / f = 4.46 \times 10^{-9}$, 信号能量系数 $\mu = \tau = 9$, 成像积分时间 $T = 0.04$ s, 解算模型得到探测灵敏度

$$M_V \leq 8.15M. \quad (13)$$

北京时间 2014 年 3 月 13 日 21 时 18 分, 实验地纬度 38.874° , 经度 121.667° , 海拔高度 0 m, 摄取星图如图 1 所示。采用重心法^[12]提取星点质心坐

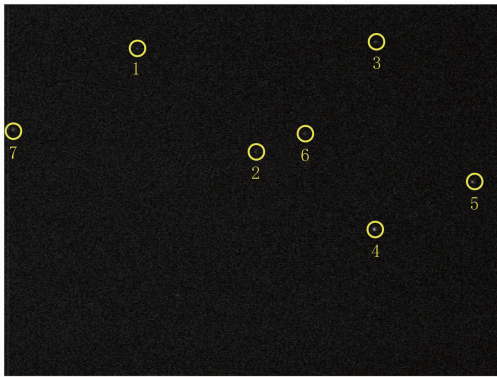


图 1 实验 1 拍摄星空图像

Fig. 1 Star image captured in experiment 1

标,采用 NASA SKY 2000 星表,以三角形法对进行恒星识别,结果如图 1 标注和表 3 所示,探测到最高星等为 8.17M。

表 3 实验 1 星识别结果

Table 3 Result of star recognition in experiment 1

Serial number	SKY 2000 star number	X coordinate	Y coordinate	Magnitude
1	14220079	207.23	69.10	8.17
2	14220003	390.45	229.00	7.94
3	14180104	575.77	58.60	8.14
4	14210027	575.28	349.59	6.91
5	14190008	727.93	276.14	6.86
6	14210007	467.11	202.18	7.64
7	14250073	13.03	195.78	7.29

实验 2:调整镜头令天顶距 $Z=45^\circ$,延长曝光时间为 $T=0.1\text{ s}$,其余参数不变,解算模型得到探测灵敏度

$$M_V \leq 9.01M. \quad (14)$$

北京时间 2014 年 5 月 12 日 21 时 05 分在相同地点拍摄星图如图 2 所示,实验结果如图 2 和表 4 所示,探测到最高星等为 8.97M。

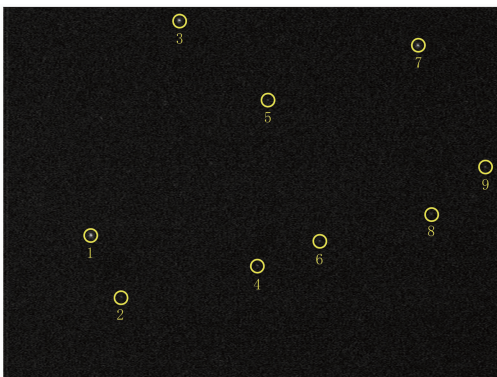


图 2 实验 2 拍摄星空图像

Fig. 2 Star image captured in experiment 2

表 4 实验 2 星识别结果

Table 4 Result of star recognition in experiment 2

Serial number	SKY 2000 star number	X coordinate	Y coordinate	Magnitude
1	19430196	136.44	353.26	5.86
2	19430116	152.06	172.85	8.97
3	19440175	272.40	21.64	6.40
4	19470212	393.75	400.05	8.26
5	19470055	408.20	144.75	7.90
6	19490073	488.55	361.00	7.53
7	19500151	640.17	60.95	5.69
8	19510192	660.91	320.47	7.73
9	19520223	744.50	247.05	7.72

两次实验结果与理论计算结果相差为分别为 0.02M 和 -0.04M,证明该理论模型能够较为准确的计算出船用星敏感器的探测灵敏度。实验中产生的误差主要是由测量误差以及部分数据估值误差导致的。

3 船用星敏感器探测灵敏度影响因素分析

根据船用星敏感器探测灵敏度计算模型,采用 2.2 小节验证实验中的系统参数作为基本参数取值,对各因素对船用星敏感器探测灵敏度的影响进行分析。

3.1 光学系统参数的影响

光学系统参数对探测灵敏度的影响如图 3 所示,分别是:(a)镜头透过率;(b)镜头入瞳直径;(c)镜头焦距;(d)成像传感器量子效率;(e)成像传感器像元面积;(f)成像传感器单个像元信号能量系数;(g)成像传感器暗电流;(h)成像积分时间。

除积分时间外,各因素均给出积分时间 $T=0.04\text{ s}$ 和 $T=0.5\text{ s}$ 两种情况下的影响曲线;图 3(h)积分时间给出的是镜头入瞳直径 $D=0.1\text{ m}$ 和 $D=0.05\text{ m}$ 两种情况下的影响曲线。结合实际情况得到分析结果如下:

1) 镜头透过率 K 和成像传感器量子效率 η (以峰值量子效率为参考值)对探测灵敏度的影响接近线性,影响幅度较小;

2) 镜头入瞳直径 D 对探测灵敏度的影响较大,特别是入瞳直径较小时,增大入瞳直径对探测灵敏度的提升效果更加显著,而增大入瞳直径带来的镜头体积和重量的增加对于舰船的影响基本可以忽略不计;

3) 镜头焦距 f 对探测灵敏度的影响非常小,基

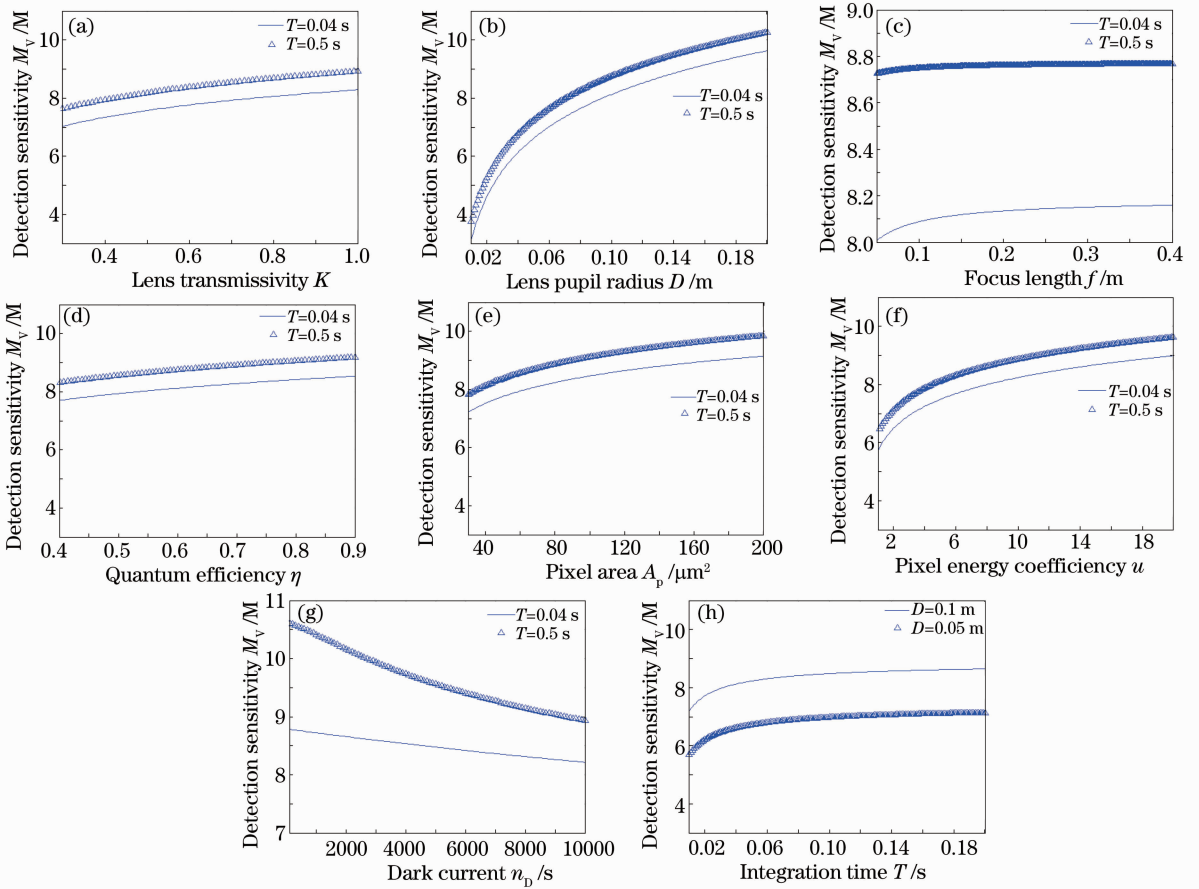


图 3 光学系统参数对探测灵敏度的影响。(a)镜头透过率;(b)镜头入瞳直径;(c)焦距;(d)成像传感器量子效率;(e)像元面积;(f)像元信号能量系数;(g)暗电流;(h)积分时间

Fig. 3 Influence of optical parameters on detection sensitivity. (a) Lens transmissivity; (b) lens pupil radius; (c) focus length; (d) image sensor quantum efficiency; (e) pixel area; (f) pixel energy coefficient; (g) dark current; (h) integration time

本可以忽略——事实上,镜头焦距对星敏传感器性能的影响主要在视场大小以及测量精度两个方面^[7,10-11];

4) 尽管提高像元信号能量系数 μ 比单纯提高像元面积 A_p 对探测灵敏度的提升更明显,但由于散焦(增大弥散斑)的方式有利于提高星象质心提取的精度,因此,一般更多是通过提高像元面积(更换大像元传感器)来提升探测灵敏度;

5) 成像传感器暗电流 n_d 对探测灵敏度的影响程度受积分时间影响,成像积分时间越长,暗电流增大对探测灵敏度的影响(降低)越显著;

6) 成像积分时间 T 较短时,延长积分时间对提高探测灵敏度效果明显,但延长积分时间会因舰船摇荡振动的影响产生星象拖尾现象,因此,积分时间应当视具体舰船的的稳定程度(受排水量、海况等因素影响)而定。

3.2 大气及夜空背景的影响

大气透射率、天顶距及夜空背景对探测灵敏度的基本影响情况如图 4 所示。

各因素的分析均给出积分时间 $T=0.04\text{ s}$ 和 $T=0.5\text{ s}$ 两种情况下的影响曲线,得到分析结果如下:

1) 大气透射率(以人眼视效率系数 S_e 最高的 555 nm 波长光的透射率为参考值)低于 0.2 时,探测灵敏度对大气透射率降低下降很快,显然可见光波段探测在气象条件不佳时无法正常工作。对于宽天候条件探测,可以考虑在穿透能力更强的红外波段进行探测。

2) 天顶距大于 70° 时,探测灵敏度随着天顶距增大下降非常快,因此探测时应当保证天顶距不能大于 70° ,否则会严重降低探测灵敏度;

3) 夜空背景亮度对于船用星敏传感器探测灵敏度影响较小,在实际设计与应用中,主要考虑避免月

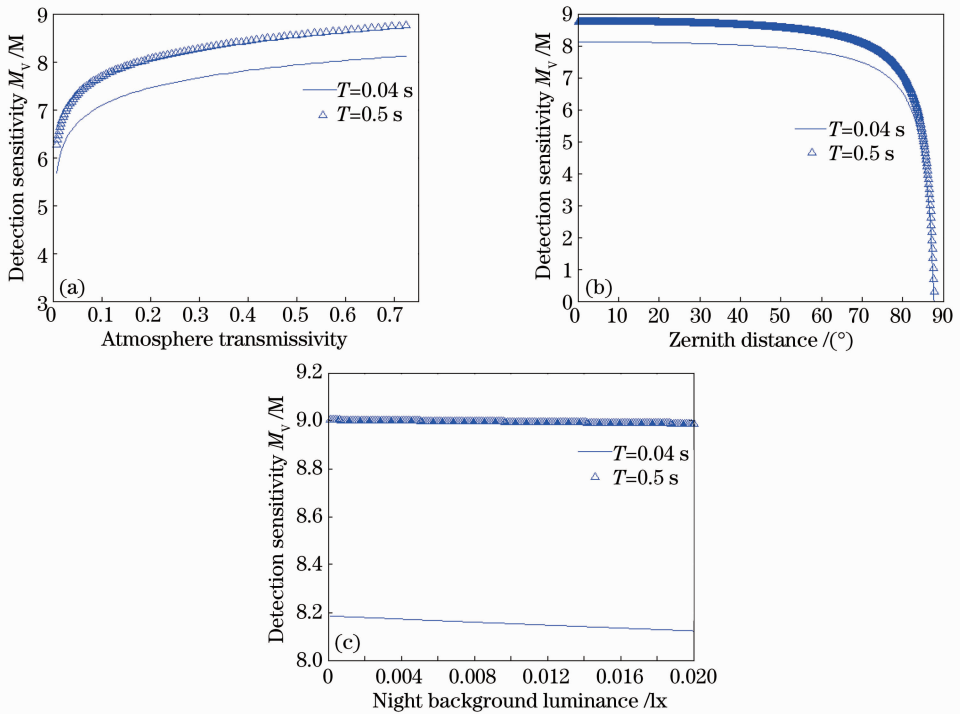


图 4 大气及夜空对探测灵敏度的影响。(a)大气透射率;(b)天顶距;(c)夜空背景亮度

Fig. 4 Influence of atmosphere and night sky on detection sensitivity. (a) Atmosphere transmissivity; (b) zenith distance; (c) night background luminance

光直射以及其他人造光源对传感器成像造成的影响。

4 结 论

船用星敏传感器一般在晴朗夜晚工作于海平面环境下,以此为出发点,结合大气透射,成像传感器噪声因素等推导出船用星敏传感器探测灵敏度计算模型,实验证明该模型能够较为准确的计算出船用星敏传感器的探测灵敏度。最后,对影响船用星敏传感器探测灵敏度的因素进行了分析,根据分析结果总结得到若干针对船用星敏传感器设计研制方面的建议:

1) 提高船用星敏传感器探测灵敏度的最佳手段是增大镜头入瞳直径;

2) 多通道船用星敏传感器通过增大的通道夹角以减小测量误差,但考虑天顶距对大气透射率的影响,通道夹角最大不应超过 70° ,一般控制 60° 以内较为适宜;

3) 配合大入瞳直径、长焦距(小视场)的镜头结构,一般的工业相机(相比于科学级相机)也可以获得较高探测灵敏度和精度,成像传感器的选择应主要考虑其对海上工作环境的适应性;

4) 未来应在红外波段探测的船用星敏传感器方面展开更多研究。

参 考 文 献

- 1 G Borghi, A Buccheri, D Cumeni. Star detection and tracking using CCDs [C]. Automatic Control in Space, 1982, 1: 289-295.
- 2 Wang Anguo. Modern celestial navigation and key techniques [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2348-2353.
王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2348-2353.
- 3 Li Xiao, Zhao Hong, Lu Xin. Study on detection sensitivity of star sensor in dynamic state [J]. Aerospace Control and Application, 2010, 36(1): 37-41.
李 晓, 赵 宏, 卢 欣. 动态情况下星敏传感器探测灵敏度研究 [J]. 空间控制技术与应用, 2010, 36(1): 37-41.
- 4 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground based electro-optic system detection ability on space object [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.
- 5 Yang Haoming, Wang Lingjie, Weng Zhicheng, et al.. Optical system of light star tracker with wide field and large aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 151-154.
杨皓明, 王灵杰, 翁志诚, 等. 大孔径大视场轻小型星敏传感器光学系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 151-154.
- 6 Zhao Shufang, Wang Yu, Wang Hongtao, et al.. Research on space luminous environment of missile-borne star sensor [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(7): 729-734.
赵述芳, 王 渝, 王洪涛, 等. 弹载星敏传感器太空光环境研究 [J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(7): 729-734.
- 7 Zhong Xing, Jia Jiqiang, Jin Guang, et al.. Detect performance and overall design of airborne daytime star sensor for navigation [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2900-2906.

- 钟 兴, 贾继强, 金 光, 等. 机载导航白天星敏传感器探测性能及总体设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2900—2906.
- 8 Yuan Jiahu, Zhang Jianrong, He Shanjin. A study on detection sensitivity of navigation star sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(6): 1—6.
- 袁家虎, 张建荣, 贺善金. 导航星敏传感器探测灵敏度研究[J]. 光电工程, 1999, 26(6): 1—6.
- 9 Sun Ting, Xing Fei, You Zheng. Optical system error analysis of high accuracy star trackers [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0323003.
- 孙 婷, 邢 飞, 尤 政. 高精度星敏传感器光学系统误差分析[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0323003.
- 10 Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Design of wide band and large relative aperture star sensor optical system with asphere [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0822001.
- 巩 盾, 田铁印, 王 红. 含有非球面的宽波段大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0822001.
- 11 Li Jing, Yang Baoxi, Hu Zhonghua, *et al.*. Development and performance testing of optical system for star sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 522005.
- 李 璟, 杨宝喜, 胡中华, 等. 星敏传感器光学系统的研制与性能测试[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 522005.
- 12 K Mcaloon. Design considerations for imaging charge-coupled device (ICCD) star sensors [C]. SPIE, 265, 1981: 186—207.

栏目编辑：韩 峰