

# 全天时星敏感器光学系统设计参数选择

樊巧云 李小娟\*

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘要** 光学系统设计是星敏感器设计的关键, 光学系统参数决定将影响星敏感器的性能指标, 而参数的选择需要考虑天空背景辐射、图像传感器参数等多种因素。采用 Modtran 软件仿真分析了不同情况下的天空背景辐射。在此基础上, 通过引入能量集中度以及传感器噪声, 推导出更精确的可探测极限星等公式, 并深入分析了星敏感器可探测极限星等、探测概率以及探测精度与各影响因素的关系。对典型设计参数的可行性进行了分析, 分析结果可为全天时星敏感器光学系统设计提供参考。

**关键词** 光学设计; 星敏感器; 全天时; 光学系统设计; 参数选择

**中图分类号** V448.22 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1122001

## Selection of Optical-System Parameters for an All-Day Used Star Sensor

Fan Qiaoyun Li Xiaojuan

(School of Instrumentation Science and Opto-Electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract** The selection of optical-system parameters plays a key role in star sensors, which can affect the sensor's performance. When determining the parameters, sky background radiance and parameters of image sensors should be considered. Sky background radiance under different situations is simulated by Modtran. A more accurate formula to estimate the detectable stellar magnitude limit is proposed, considering the effects of energy focusing degree and sensor noise. With this formula, the factors affecting the detectable stellar magnitude, detection probability and accuracy are deeply analyzed. The feasibility of typical optical-system parameters is studied. The results offer important references in the determination of optical system of all-day used star sensors.

**Key words** optical design; star sensor; all-day used; optical-system design; parameter selection

**OCIS codes** 220.4830; 040.1520; 230.0040; 040.1490

## 1 引 言

基于星光导航的星敏感器是目前各种姿态测量部件中精度最高的姿态敏感器之一, 在大气层外的卫星平台上得到了广泛应用, 但在大气层内的空间飞行器上, 如飞艇、浮空气球、高空长航时无人机甚至导弹上还没有得到广泛应用。白天的强背景是阻碍星敏感器全天时应用的主要因素, 传统的星敏感器主要是光学系统设计不能满足白天观星的要求, 因而应用受到限制。因此对全天时星敏感器的关键技术瓶颈——光学系统的深入分析具有重要意义。

Dietz 等<sup>[1~3]</sup>研制了不同的白天星敏感器或星跟踪器, 但其光学系统是针对各自特定的应用设计的, 并没有从理论上分析不同的应用环境条件下, 星敏感器性能与不同光学系统设计参数的关系。万敏等<sup>[4]</sup>提出利用形态学方法对图像进行预处理, 从而提高白天观测星体信噪比的方法。魏合理等<sup>[5,6]</sup>分析了星敏感器在  $3^\circ \times 3^\circ$  视场下, 可探测极限星等以及恒星-背景对比度随观测高度、太阳天顶角、波段和恒星光谱的变化情况, 这些结果可用于星敏感器在大气层内白天观星的星等极限估计。而星敏感器

**收稿日期**: 2011-04-18; **收到修改稿日期**: 2011-05-25

**基金项目**: 国家自然科学基金(61008032)与长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)资助课题。

**作者简介**: 樊巧云(1978—), 女, 讲师, 主要从事图像处理、光电测量、天体敏感器及天文导航方面的研究。

E-mail: fqy2003@aspe.buaa.edu.cn

\* **通信联系人**。E-mail: leelittle1986@163.com

的光学系统设计,不仅要考虑其可探测极限星等,还要考虑其探测概率、探测精度等方面的性能,只有综合考虑这些因素,才能为光学系统设计参数的选择提供依据。另外在魏合理等<sup>[5,6]</sup>研究中,可探测极限星等估计公式的推导没有考虑星点光斑能量集中度的影响,而且对各影响因素的分析还不够全面,比如星敏器性能与视场范围、观测方位、光斑能量集中度以及光斑中心分布等的关系。为此,本文在上述工作基础上,考虑光斑能量集中度以及分布特征,全面分析星敏器可探测极限星等、探测概率以及探测精度与各影响因素的关系,并对典型设计参数的可行性进行分析。

## 2 不同情况下的天空背景辐亮度

星敏器全天时应用的难点在于白天天空背景辐射过强,因此在分析星敏器性能与各影响因素关系之前,需要知道不同情况下的天空背景辐射强度。利用分辨率大气辐射软件 Modtran 对天空背景辐亮度进行了仿真。

### 2.1 不同轨道高度的天空背景辐亮度

图 1 和图 2 分别给出天空背景辐射的分布及天空背景辐亮度与海拔高度的关系。从图中可以看出:1)天空背景辐亮度主要集中在短波段,峰值在  $0.3\sim 0.4\ \mu\text{m}$  之间,在  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  处,天空背景辐亮度衰减很快;2)随着轨道高度的增加,天空背景辐亮度减小幅度很大,在  $0.4\sim 1.0\ \mu\text{m}$  处与轨道高度近似成指数关系。 $10\ \text{km}$  处的天空背景辐亮度近似为  $50\ \text{km}$  处的 420 倍。

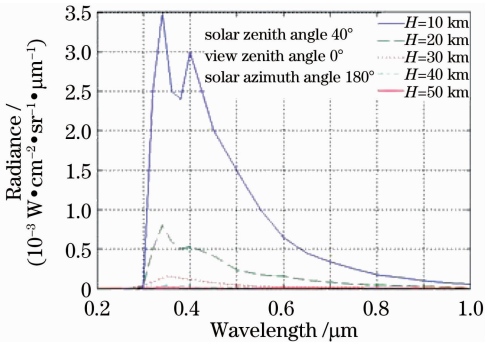


图 1 天空背景辐亮度分布

Fig. 1 Distribution of sky background radiance

### 2.2 不同太阳天顶角、观测天顶角及观测方位角的天空背景辐亮度

不同太阳天顶角、观测天顶角和观测方位角情况下的天空背景辐射不同,它们之间的关系较复杂。下面对两种典型情况进行分析研究:观测方位角

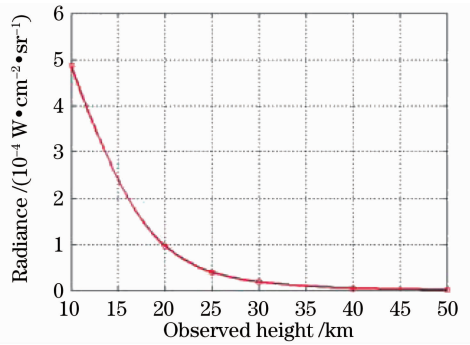


图 2 海拔高度与天空背景辐亮度的关系

Fig. 2 Observed height versus sky background radiance  $180^\circ$ (与太阳入射方向相反)和观测方位角  $0^\circ$ (与太阳入射方向一致),分别如图 3(a)和(b)所示。

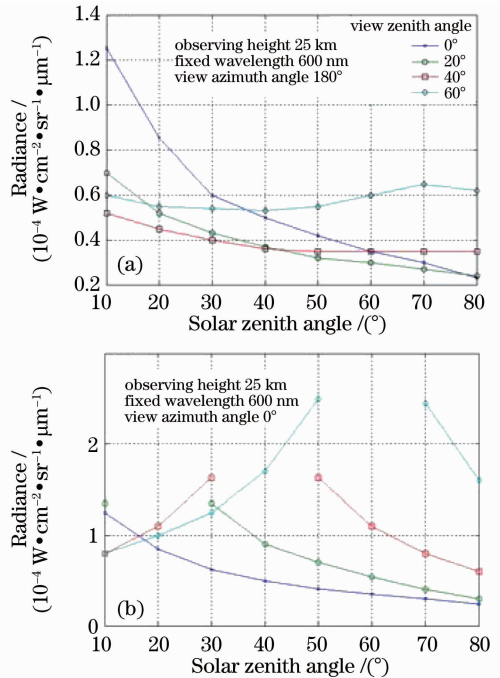


图 3 各种方位下的天空背景辐亮度仿真。

(a)背向太阳;(b)面向太阳

Fig. 3 Sky background radiance under different locations of star sensor. (a) Against the sun; (b) towards the sun

从图 3(a)可以看出:1)当观测天顶角小于等于  $40^\circ$  时,天空背景辐亮度随太阳天顶角的增加而减小,观测天顶角越小,减小的幅度越大;大于  $40^\circ$  时,减小的幅度大大缩小,到  $60^\circ$  时几乎不受太阳天顶角的影响。2)当太阳天顶角小于等于  $40^\circ$  时,天空背景辐亮度随观测天顶角的增加而减小,太阳天顶角越小,减小的幅度越大;大于  $40^\circ$  时,天空背景辐亮度随观测天顶角的增加而逐渐增加。

从图 3(b)可以看出,天空背景辐亮度随太阳天顶角和观测天顶角的变化情况较复杂,当太阳天顶

角等于观测天顶角时(即正对太阳),天空背景辐亮度达最大,两者的角度越接近,天空背景辐亮度越大,同等条件下比观测方位角为 $180^\circ$ 时的辐亮度高一个数量级左右。

### 3 探测能力与各影响因素关系分析

星敏感器探测能力体现在其可探测极限星等和探测概率两方面,可探测极限星等和视场角确定后,探测到 $N$ 颗星的概率可估算为<sup>[7]</sup>

$$P_N = 1 - \sum_{k=0}^{N-1} \exp(-N_{\text{FOV}}) N_{\text{FOV}}^k / k!, \quad (1)$$

式中 $N_{\text{FOV}}$ 表示大于给定星等的平均恒星颗数。

可探测极限星等则与图像传感器参数、轨道高度、观测角度、工作光谱和光斑分布等因素有复杂的关系。

#### 3.1 可探测极限星等公式

文献[5]给出的可探测极限星等公式为

$$M_V = \lg \frac{\frac{1}{4} S_T}{5 \sqrt{\frac{1}{4} S_T + N_{\text{bkg}} + N_{\text{sensor}}^2}} / \lg 2.512, \quad (2)$$

式中 $M_V$ 为可探测极限星等, $S_T$ 为光斑信号总能量, $N_{\text{bkg}}$ 表示背景辐射能量, $N_{\text{sensor}}$ 表示探测器噪声。(2)式中假定光斑均匀分布在 $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel}$ 范围,所以单个像元上的能量为 $\frac{1}{4} S_T$ ,但实际的星点光斑能量通常呈近似正态分布。定义能量集中度 $K$ 值为中心像元能量占总能量的比值,其值可表示为

$$K = \int_{-0.5}^{0.5} \int_{-0.5}^{0.5} \frac{1}{2\pi\sigma_{\text{PSF}}^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\sigma_{\text{PSF}}^2}\right) dx dy. \quad (3)$$

用上述能量集中度 $K$ 值代替按照光斑均匀分布计算的单个像元能量,可推导出更为精确的探测极限星等公式

$$M_V = \lg \frac{S}{5 \sqrt{S + N_{\text{bkg}} + N_{\text{sensor}}^2}} / \lg 2.512, \quad (4)$$

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_0(\lambda) \tau_0(H, \mu, \lambda) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{\text{opt}}(\lambda) t \times \frac{1}{W_{\text{ph}}} Q_0(\lambda) K d\lambda, \quad (5)$$

$$N_{\text{bkg}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda, \mu, \mu_0, \phi, H) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{\text{opt}}(\lambda) t \times \frac{1}{W_{\text{ph}}} Q_0(\lambda) \Omega d\lambda, \quad (6)$$

式中 $S$ 为光斑中心像元能量, $F_0(\lambda)$ 表示零等星的光谱辐射出度, $\tau_0(\lambda, \mu, H)$ 表示在观测高度为 $H$ 、观测天顶角为 $\mu$ 时的大气透射率, $D$ 为光学系统通光口径, $\tau_{\text{opt}}(\lambda)$ 为光学系统透射率, $W_{\text{ph}} = h \frac{c}{\lambda}$ 表示单个光子的能量, $I_b(\lambda, \mu, \mu_0, \phi, H)$ 表示在观测高度为 $H$ 、观测天顶角为 $\mu$ 、太阳天顶角为 $\mu_0$ 、观测方位角为 $\phi$ 时到达探测器的天空背景辐亮度, $Q_0(\lambda)$ 是探测器量子效率, $\Omega$ 是单位像元所占的立体角, $t$ 为积分时间, $\lambda$ 是工作光谱波长。

#### 3.2 可探测极限星等与各影响因素的关系

对(2)式进行简化处理可知,可探测极限星等与工作光谱段的光谱响应量子效率的平方根、光学系统透过率的平方根近似成正比,与积分时间的平方根、通光孔径近似成正比,可探测极限星等与其他因素存在非简单的线性关系,下面做具体分析。分析中所涉及的固定参数分别取如下值:像元大小 $10 \mu\text{m}$ ,传感器尺寸 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,量子效率 $0.35$ ,积分时间 $0.1 \text{ s}$ ,光学镜头透过率 $0.85$ ,视场角 $3^\circ \times 3^\circ$ ,能量集中度 $0.25$ ,轨道高度 $25 \text{ km}$ ,观测天顶角 $0^\circ$ ,太阳天顶角 $40^\circ$ ,观测方位角 $180^\circ$ ,工作光谱波长 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。

##### 3.2.1 与轨道高度、观测角度的关系

依据上述不同高度、不同太阳天顶角及观测方位角的天空背景辐射仿真分析结果及可探测极限星等公式,可分析出可探测极限星等与轨道高度、太阳天顶角及观测方位角的关系,分析结果如图4和图5所示。可以看到:1)可探测极限星等随高度的增加近似线性增加,对于G2型恒星 $50 \text{ km}$ 高度比 $10 \text{ km}$ 高度所对应的极限星等增加约 $3.5$ 个星等;2)可探测极限星等与太阳方位的关系,与天空背景辐射与太阳方位的关系呈相反的趋势;3)在观测方向与太阳入射方向相反(观测方位角为 $180^\circ$ )的情况下,对于G2型恒星,当观测天顶角为 $0^\circ$ 时,太阳

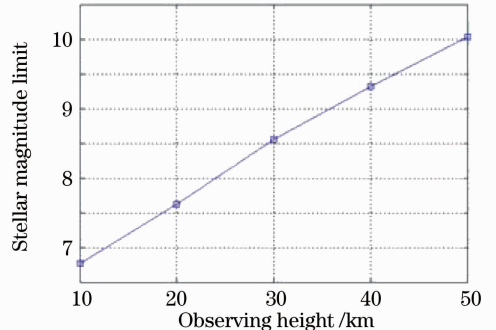


图4 轨道高度与可探测极限星等的关系

Fig. 4 Stellar magnitude limit versus observing height

天顶角为  $80^\circ$  时比  $10^\circ$  时极限星等值增加约 0.8 个星等,当观测天顶角为  $40^\circ$  时,极限星等值增加仅 0.2 个星等,当观测天顶角为  $60^\circ$  时,极限星等几乎没有变化;4)当观测天顶角不为  $0^\circ$  时,同等条件下,观测方位角  $0^\circ$  时的可探测极限星等明显比  $180^\circ$  时低,至少低 0.6 个星等,同时当太阳天顶角等于观测天顶角,即正对太阳观测时,可探测极限星等无限小,星敏传感器无法工作。

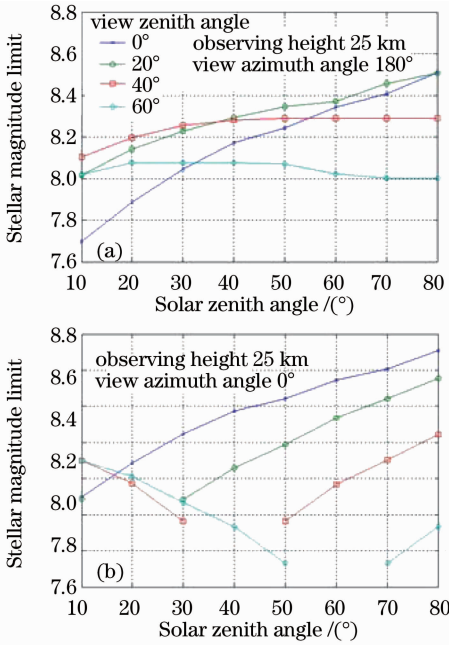


图 5 星敏传感器各种方位下的可探测极限星等仿真。  
(a)  $108^\circ$ ; (b)  $0^\circ$

Fig. 5 Detectable stellar magnitude limit under different locations of star sensor. (a)  $108^\circ$ ; (b)  $0^\circ$

### 3.2.2 与工作光谱的关系

从天空背景辐亮度的仿真分析结果可知:轨道高度不同,天空背景辐亮度差别很大,但有一个共同的特点,就是在  $0.6 \mu\text{m}$  以外能量很低。恒星类型不同,光谱分布也不同,如 G2 型恒星光谱峰值约在  $0.5 \mu\text{m}$ , K2 型恒星在  $0.6 \mu\text{m}$ , M2 型恒星在  $0.8 \mu\text{m}$ 。可见光图像传感器光谱响应一般在  $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ,因此根据天空背景和恒星不同的光谱分布特征,可以选择最优的工作光谱段来提高信噪比<sup>[8]</sup>,从而提高星敏传感器的探测能力。图 6 是对不同恒星类型,选择不同的工作光谱段所对应的可探测极限星等。

从图 6 可以看出:1)恒星类型不同,同等条件下可探测的极限星等值不同,峰值波段越靠近短波,可探测的极限星等值越高;2)恒星类型不同,最优的工作光谱段也不同,对峰值波段小于  $0.7 \mu\text{m}$  的恒星

(如 G2 型、K2 型),  $0.7 \mu\text{m}$  截止为最优的工作光谱段,而对峰值波段大于  $0.7 \mu\text{m}$  的恒星(如 M2 型),  $0.8 \mu\text{m}$  截止为最优的工作光谱段;3)峰值波段越靠近长波的恒星,选取最优工作光谱的优势越明显,如对 M2 型恒星,选择  $0.8 \mu\text{m}$  截止的工作光谱段比全波段能提高 0.8 个星等左右。在此基础上,还对不同轨道高度、不同视场范围所对应的工作光谱段与探测能力的关系做了分析,结果显示,轨道高度和视场范围对最优工作光谱段的选择没有太大影响。

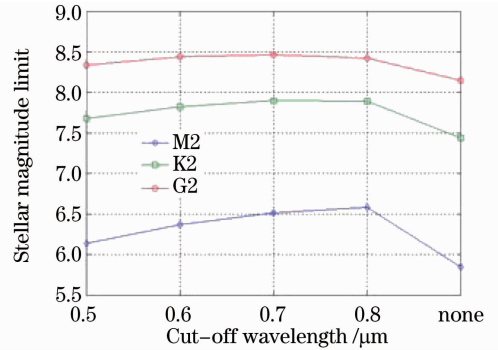


图 6 工作光谱对可探测极限星等的影响

Fig. 6 Relationship between detectable stellar magnitude limit and spectral range for different star types

根据上述分析结果,在全天时星敏传感器的光学系统中可以设置光谱滤光片,使其工作在最优的光谱段,从而提高全天时星敏传感器性能。

### 3.2.3 与星点光斑分布的关系

星敏传感器可探测极限星等与星点光斑的光强分布有密切的关系,包括光斑的能量集中度、光斑中心与像元中心的偏离度等。极限星等探测能力分析应以光强最大的像元所能够探测到的最暗星的星等作为标准,但在实际应用中,一般需要  $2 \text{ pixel} \times 2 \text{ pixel} \sim 4 \text{ pixel} \times 4 \text{ pixel}$  均能探测到相应的星等才能有效提取星点位置,所以实际的有效探测星等一般要比理论计算的极限星等低 2 个星等左右。

分别取能量集中度  $K = 0.7172, 0.4054, 0.2191, 0.1229$  时对可探测极限星等进行仿真,仿真结果如图 7(a) 所示,可以看到,随着能量集中度的增加,探测极限星等值近似成线性增加。

另外,在实际测量中,光斑中心不一定和像元中心重合,这也会使探测能力下降。当光斑分布的中心坐标沿着像元中心的对角线移动时,光斑中心与像元中心的偏移量对探测能力的影响如图 7(b) 所示,可以看到,光斑中心偏离对极限星等探测能力的影响比能量集中度对探测能力的影响小,当偏离达最大,即光斑中心处于像元边界时,所能探测的极限



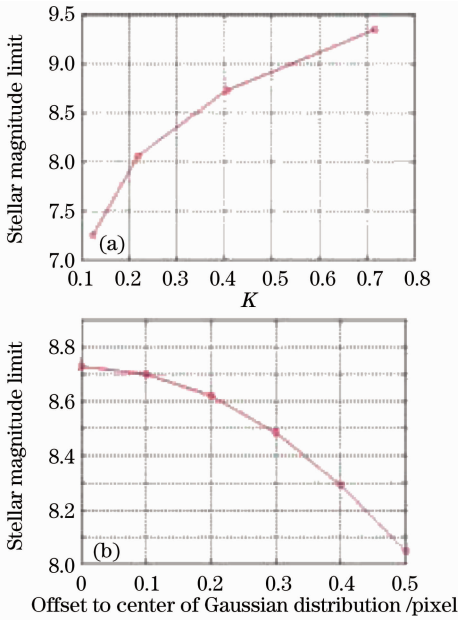


图7 光斑分布对可探测极限星等的影响。

(a) 能量集中度; (b) 偏离量

Fig. 7 Effect of spot distribution on detectable stellar magnitude limit. (a) Energy focusing degree; (b) offset

星等下降约 0.7。

### 3.2.4 与图像传感器像元尺寸、像元数的关系

图8是图像传感器像元尺寸和像元数对可探测极限星等的影响,可以看到,增加像元尺寸和像元数都可以提高可探测极限星等值,像元数对可探测极限星等值的影响近似呈正比例关系,而像元大小超过  $15 \mu\text{m}$  时,对可探测极限星等值的影响会减弱。

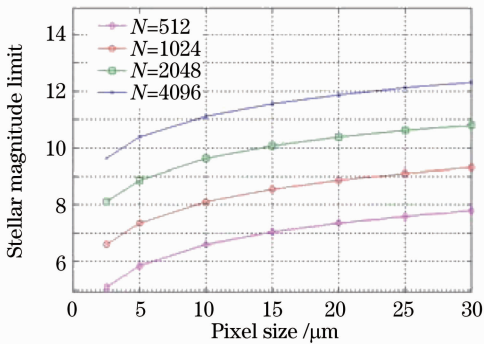


图8 图像传感器尺寸对可探测极限星等的影响

Fig. 8 Effect of image sensor's size on detectable stellar magnitude limit

### 3.2.5 与视场角的关系

图9是不同轨道高度可探测极限星等与视场角(FOV)的关系,可以看到,可探测极限星等随视场角增大而下降的关系在不同轨道高度一致,且均近似呈正比例关系。

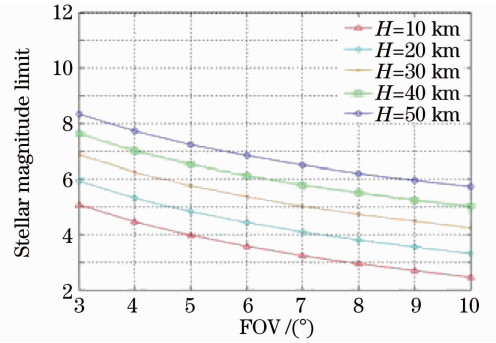


图9 视场角对可探测极限星等的影响

Fig. 9 Effect of FOV on detectable stellar magnitude limit

## 4 探测精度与各影响因素关系分析

衡量星敏感器精度的指标主要有单星测量精度和姿态角测量精度。影响单星测量精度的因素主要有 CCD 的角分辨率和星点定位算法精度等。单星测量精度可表示为<sup>[7]</sup>

$$\xi_{\text{singlestar}} = \delta_{\text{centroid}} = (\theta/N_{\text{pixel}})\sigma_{\text{centroid}}, \quad (7)$$

式中  $\delta$  表示 CCD 的角分辨率,  $\sigma_{\text{centroid}}$  表示星点定位算法精度,  $\theta$  表示视场角,  $N_{\text{pixel}}$  表示 CCD 的像元数。

姿态角测量精度与单星测量精度和视场内参与星识别和姿态计算的星的数量有关。星敏感器三轴姿态角测量精度包括横滚姿态精度、偏仰姿态精度和偏航姿态精度,分别可表示为

$$\sigma_{\text{roll}} = \sqrt{\frac{2}{N_{\text{FOV}} - 1}} \times \frac{2\xi_{\text{singlestar}}}{\tan \theta}, \quad (8)$$

$$\sigma_{\text{pitch}} = \sigma_{\text{yaw}} = \xi_{\text{singlestar}} / \sqrt{N_{\text{FOV}}}. \quad (9)$$

### 4.1 探测器参数对探测精度的影响

从(7)式可以看到星敏感器单星测量的高精度是建立在 CCD 像元的高角分辨率基础上的,所以在视场角确定的前提下,增大 CCD 像元数可以提高角分辨率,从而提高探测精度,但是这就要求减小小像元大小,从而影响探测概率。

### 4.2 星点定位算法精度对探测精度的影响

从(7)~(9)式可以看到,星点定位算法精度直接影响星敏感器的单星测量精度以及姿态测量精度,而对于白天应用的星敏感器,白天背景光是影响星点定位算法精度的主要因素。

在光学系统确定的前提下,对于给定星等的恒星,随着轨道高度的增加,探测精度随着背景辐射强度减小的平方根增加;在既定的轨道高度,星敏感器的信噪比越大,探测精度越高。

## 5 不同设计参数的可行性分析

在全天时星敏感器的应用中,优先选用灵敏度高的 CCD 图像传感器。目前 CCD 图像传感器的像元尺寸一般在  $5\sim 20\ \mu\text{m}$  范围,像元数一般为 512、1024、4096,量子效率一般为 35% 左右,最高可达 90% 以上<sup>[9,10]</sup>。以现有的可见光 CCD 图像传感器

和光学镜头加工水平为基础,依据星敏感器探测能力、探测精度与各参数的关系,对典型的光学系统设计参数的可行性进行了分析,如表 1 所示。分析中镜头透过率取 0.8,量子效率取 0.35,积分时间取 0.1 s,视场角取  $3^\circ\times 3^\circ$ ,同时假定观测天顶角  $0^\circ$ ,太阳天顶角  $40^\circ$ ,观测方位角  $180^\circ$ 。

表 1 典型设计参数下的可行性分析

Table 1 Feasibility study under different typical optical-system parameters

Pixel size / $\mu\text{m}$ ; pixel number	Diameter / cm	Observing height / km	Stellar magnitude limit	Detection probability (number of stars $N_s \geq 3$ )	Detection accuracy	
					$\sigma_{\text{roll}}$	$\sigma_{\text{pitch}} = \sigma_{\text{yaw}}$
10; 1024	16.29	10	5.08	0.53%(0.3459)	—	0.3587"
		20	5.94	5.89%(0.8757)	—	0.2254"
		30	6.87	42.79%(2.3908)	9.6532"	0.1364"
		40	7.64	91.11%(5.4917)	5.3715"	0.0900"
		50	8.34	99.93%(11.6958)	3.4809"	0.0617"
15; 1024	24.44	10	5.52	1.90%(0.5563)	—	0.2828"
		20	6.38	16.85%(1.4084)	17.8137"	0.1777"
		30	7.31	73.83%(3.8452)	6.7491"	0.1076"
		40	8.08	99.29%(8.8324)	4.0678"	0.0710"
		50	8.78	99.99%(18.8108)	2.6975"	0.0486"
10; 4096	65.17	10	8.09	99.34%(8.9284)	4.0431"	0.0706"
		20	8.95	99.99%(22.6019)	2.4494"	0.0444"
		30	9.88	100%(61.7091)	1.4611"	0.0269"
		40	10.65	100%(141.7453)	0.9596"	0.0177"
		50	11.35	100%(301.8807)	0.6563"	0.0121"
15; 4096	97.7	10	8.53	99.99%(14.3598)	3.1146"	0.0557"
		20	9.39	99.99%(36.3514)	1.9147"	0.0350"
		30	10.32	100%(99.2490)	1.1485"	0.0212"
		40	11.09	100%(227.9741)	0.7556"	0.0140"
		50	11.79	100%(485.5255)	0.5172"	0.0096"

## 6 结 论

工作在大气层内的全天时星敏感器性能不但受轨道高度、太阳方位等因素影响,还与光学镜头和图像传感器等参数有密切关系。通过以上分析,可得到如下结论:对视场范围取  $3^\circ\times 3^\circ$  的全天时星敏感器,当选尺寸为  $4096\ \text{pixel}\times 4096\ \text{pixel}$ ,像元大于  $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$  的典型 CCD 图像传感器时,可探测极限星等大于 8 等,视场范围内观测到 3 颗星的概率达 99% 以上,横滚姿态精度为  $0.5172''\sim 4.0431''$ ,俯仰偏航姿态精度为  $0.0096''\sim 0.0706''$ ;当传感器尺寸为  $1024\ \text{pixel}\times 1024\ \text{pixel}$  时,在 40 km 轨道高度以下,视场范围内观测到 3 颗星的概率低于 80%,无法满足星敏感器星图识别的需要。对于不同视场范围或不同图像传感器参数的星敏感器,其光学系统设计参数可依据本文的可行性

分析结果及上述探测能力、探测精度与各影响因素的具体量化关系进行选择 and 可行性分析。

## 参 考 文 献

- Kurt L. Dietz, Brian D. Ramsey, Cheryl D. Alexander *et al.*. Daytime aspect camera for balloon altitudes[J]. *Opt. Engng.*, 2002, **41**(10): 2641~2651
- Marie Rex, Edward Chapin, Mark J. Devlin *et al.*. BLAST autonomous daytime star cameras [C]. *SPIE*, 2006, **6269**: 62693H
- Liu Lei, Zhang Lu, Zheng Xin *et al.*. Current situation and development trends of star sensor technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(z2): 529~533  
刘 垒, 张 璐, 郑 辛等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(z2): 529~533
- Wan Min, Su Yi, Yang Rui *et al.*. Improvement of signal to noise ratio in astronomical objects detection in daytime[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1151~1154  
万 敏, 苏 毅, 杨 锐等. 提高白天观测星体信噪比的方法研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(12): 1151~1154
- Wei Heli, Chen Xiuhong, Yu Kai *et al.*. Analysis of the

- detectable stellar magnitude limit using CCD camera in daytime sky background [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2): 187~192
- 魏合理, 陈秀红, 余凯等. 白天 CCD 观星可探测极限星等值分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(2): 187~192
- 6 Chen Xiuhong, Wei Heli, Yu Kai *et al.*. Analysis of the contrast of star to sky background during daytime for star sensor [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, **3**(1): 28~35
- 陈秀红, 魏合理, 余凯等. 星敏感器白天观星的对比度分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, **3**(1): 28~35
- 7 Gwanghyeok Ju. Autonomous Star Sensing, Pattern Identification, and Attitude Determination for Spacecraft: an Analytical and Experimental Study[D]. College Station: Texas A & CM University, 2001
- 8 Fen Xiaoyong, Zhu Ming, Xiang Zhiqiang. Method of television real-time detection on dark and small stars targets in the daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1009~1013
- 冯小勇, 朱明, 向治强. 白天暗小恒星目标电视实时探测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1009~1013
- 9 You Qing. Past, present and future of scientific CCD [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 1995, **32**(10): 8~11
- 友清. 科学 CCD 的过去、现状和未来[J]. *激光与光电子学进展*, 1995, **32**(10): 8~11
- 10 He Weiji, Chen Qian, Qu Huiming *et al.*. Charge multiplication of CCD based on electrons multiplication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1161~1166
- 何伟基, 陈钱, 屈惠明等. 电子倍增 CCD 的电荷倍增特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1161~1166

栏目编辑：何卓铭