

全天时星敏感器光学响应波段优化设计及试验验证

勾万祥¹, 佟 帅¹, 贾靖玉¹, 秦梓轩¹, 孙吉福², 李崇辉^{1*}

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 河南 郑州 450001;
2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘 要: 随着红外传感器技术的飞速发展, 全天时星敏感器白昼观星效果明显提升, 传统宽光学响应带宽设计引起的成像色差、信噪比下降, 逐步成为限制其精度进一步提升的瓶颈之一。根据近红外波段大气窗口特性, 选择合适波段作为全天时星敏感器光学响应波段可有效缓解此类问题。为此, 首先建立了全天时星敏感器不同光学响应波段 0 等星信噪比模型, 在此基础上, 利用 modtran 软件仿真计算相关波段大气参数, 结合不同波段恒星分布密度, 分析了全天时星敏感器采用不同光学响应波段探测恒星数量、分布密度及定姿成功率, 并利用白昼测星平台开展了验证试验。结果表明: 同等硬件条件下 H 波段为全天时星敏感器最优光学响应波段, 整体恒星探测能力约为 R 、 I 、 J 波段的 17 倍、10 倍和 2 倍, 定姿成功率也有明显优势。

关键词: 星敏感器; 背景辐射; 大气透过率; 星等; 响应波段

中图分类号: V19 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230221

0 引 言

星敏感器是一种以恒星为参考基准的定姿设备, 具有良好的测量隐蔽性、抗电磁干扰性和极高的定姿精度, 是飞机、飞艇和舰船等平台姿轨控系统不可缺少的姿态测量设备之一^[1]。然而受限于强天空背景辐射影响, 星敏感器白昼测星较为困难, 一直限制其在大气层内的推广应用, 这也是当前全天时星敏感器的关键技术瓶颈所在^[2]。相较于可见光波段, 近红外波段天空背景辐射强度大幅减小、且存在明显的大气窗口。因此, 基于近红外波段的全天时星敏感器一直是国内外研究热点^[3-4]。

天文学上根据大气窗口将近红外波段划分为 R 、 I 、 J 、 H 、 K 等波段, 不同波段间存在明显的大气吸收带^[5]。受限于早期红外传感器量子效率低、噪声大, 光学镜头红外波段透过率低等因素影响, 全天时星敏感器研究多集中于大气影响较弱的高空平台, 采用宽光学响应波段增加透光量以缩短曝光时间, 进而降低

传感器固有噪声, 以提升测星效果^[6]。近年来, 星敏感器相关硬件技术迅猛发展, 如美国 Sensors Unlimited 公司生产的 $5\ \mu\text{m}$ 像元的新型 InGaAs 传感器, 暗电流 $< 0.26\ \text{nA}/\text{cm}^2@0$, 读出噪声 $< 50\ e^-$, 量子效率高达 80%; Navitar 生产的 OptiStar SWIR 119180 红外镜头透过率可达 95% 等^[7]。得益于此, 近地空间大气层内全天时星敏感器的白昼观星能力明显提升, 部分星敏感器已可实现白昼 6 等以上恒星观测^[8]。与此同时, 近地空间大气透过率变化复杂且存在明显吸收带, 传统宽波段设计带来的整体测星信噪比较低和星点成像色差等问题, 逐步成为制约全天时星敏感器星点高精度提取的瓶颈因素^[9]。因此, 根据近红外波段大气窗口特性, 对全天时星敏感器光学响应波段进行优化设计, 对于进一步提高全天时星敏感器测星能力和定姿精度具有重要意义。

目前, 虽然围绕全天时星敏感器的研究较多, 但主要集中于探测器硬件设计、星表建立、星点提取等方面, 对星敏感器敏感波段选择研究关注较少, 星敏

收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2023-04-25

基金项目: 河南省青年人才托举工程项目 (2022 HYTEP008)

作者简介: 勾万祥, 男, 工程师, 硕士, 主要研究领域为全天时星敏感器、天文导航。

通讯作者: 李崇辉, 男, 副教授, 博士, 主要研究领域为全天时星敏感器、导航定位、图像处理等。

感器实际采用波段也不尽相同。如 Marie Rex 等在 BLAST 高空气球实验中,依据天空背景辐射亮度因素,选择 600~850 nm 波段作为星敏传感器光学响应波段^[10];张凯胜等在进行大相对孔径全天时星敏传感器光学设计时,参考各波段夜间测星信噪比,提出采用 1 100~1 400 nm 波段作为星敏传感器光学响应波段^[1];张海龙等在全天时星敏传感器整体设计时,根据恒星辐流量特点分析认为 H 波段为星敏传感器探测性能最优的波段^[11];王文杰在观星实验中,根据同一颗恒星信噪比,认为 1 300 nm 截至光学响应波段性能优于 1 500 nm 截至波段等^[12]。然而,由于大气透过率、天空背景辐射、0 星等辐流量定义、恒星分布密度等影响因素并非独立或线性相关,这些单一角度的分析方法并不严谨,所得结论也并不统一。

为此,文中从各光学响应波段 0 星等辐流量定义出发,顾及不同波段大气背景辐射及透过率等多种因素影响,推导出同等硬件条件下不同响应波段恒星信噪比关系;在此基础上,利用 modtran 软件仿真计算出相关波段大气参数值,并结合对应波段恒星分布密度,量化对比了采用不同光学响应波段的全天时星敏传感器实际恒星探测能力;最后搭建了白昼观星平台对相关波段实际测星效果进行了验证。

1 星等基准与大气影响因素分析

1.1 星等基准

天文学上用星等来衡量恒星的明暗程度,不同星等对应不同辐流量大小,通常采用普森公式定量计算相邻星等之间的辐流量差异^[13]。设两颗恒星辐流量分别为 F_1 、 F_2 ,相应的星等为 m_1 、 m_2 ,则有如下关系:

$$m_1 - m_2 = -2.512 \lg \frac{F_1}{F_2} \quad (1)$$

由此可以看出,星等是表征恒星相对辐流量大小的量,只有定义各波段 0 星等辐流量才能计算出各恒星在该波段的对应星等。最初天文学家 pogson 在建立普森公式时,提出将织女星 (Vega) 作为全波段 0 星等标准,并称为 Vega magnitude^[14]。但随着天文观测技术提高,发现 Vega 可能是一颗造父变星,不能满足 0 星等绝对定标精度要求^[15]。因此,不同天文星表通常基于项目观测仪器、滤光片带宽、观测位置等因素建立符合项目实际的测光系统^[16-17],如 Johnson 的 11 色测光系统、SDSS 项目的 ugriz 测光系统、2 MASS 项目的 JHK 测光系统等。但它们大都是 Vega magnitude 的延续,0 星等定标辐流量与 Vega 相应波段辐流量相差不大^[18-21]。表 1 为 USNO 及 2 MASS 星表测光系统参数。

表 1 USNO 及 2 MASS 星表测光系统参数^[20-21]

Tab.1 Parameters of USNO and 2 MASS photometry systems^[20-21]

Starlist	Filter	$\lambda_{eff}/\mu\text{m}$	Bandwidth $\Delta\lambda/\mu\text{m}$	$F_\lambda/W \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	In-band/ $W \cdot \text{cm}^{-2}$
USNO	R	0.620	0.125	2.42E-12	3.03E-13
	I	0.767	0.148	1.26E-12	1.86E-13
	J	1.235	0.162	3.129E-13	5.082E-14
2 MASS	H	1.662	0.251	1.133E-13	2.843E-14
	K	2.159	0.262	4.283E-14	1.122E-14

表 1 中, λ_{eff} 为各波段有效波长,数值与带宽中心波长相近,文中不做区分; $\Delta\lambda$ 为半波带宽, F_λ 为有效波长处对应 0 星等辐流量值,带宽内 0 星等流量近似为 F_λ 乘半波带宽 $\Delta\lambda$,具体相关定义及关系可参照文献 [22]。

1.2 大气影响因素

白昼天空背景辐射和大气透过率是影响全天时星敏传感器恒星探测能力的重要因素。其中白昼天空背景辐射短波波段,主要为大气散射太阳光产生的大

气背景辐射。由于全方位测量大气背景辐射及透过率成本高、效率低,目前国内外多采用美国空军开发的 modtran 大气计算软件进行仿真计算,具有很好的精度和可靠性。因此文中对大气背景辐射和大气透过率分析采用 modtran 软件进行。

影响大气背景辐射及大气透过率的因素有很多,但主要因素为大气中的低空气溶胶、水汽、 CO_2 , 前两者主要集中在 2 km 以下的低层大气中, CO_2 在 50 km

以下几乎不随高度变化^[23]。因此对于星敏传感器无云雨, 远离城市气溶胶的工作环境, 气溶胶、水汽、CO₂等气象因素变化影响可以忽略。利用 modtran 软件, 设置仿真参数为无云雨、高度 6 km、美国 1976 标准大气模型, 观测天顶角 45°, 观测方向为正南方向, 仿真得到正午大气背景辐射亮度并作为全天背景亮度的典型值, 如图 1 所示。

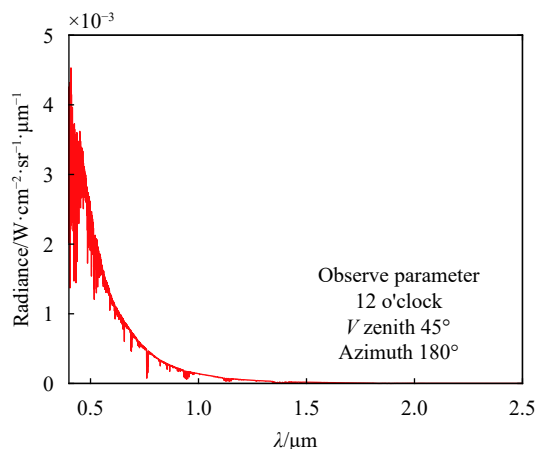


图 1 大气背景辐射典型值

Fig.1 Typical values of atmospheric background radiation

在同样参数条件下, 利用 modtran 仿真得到 30°、60°、80°观测天顶角的大气透过率, 作为星敏传感器不同敏感方向大气透过率典型值, 如图 2 所示。

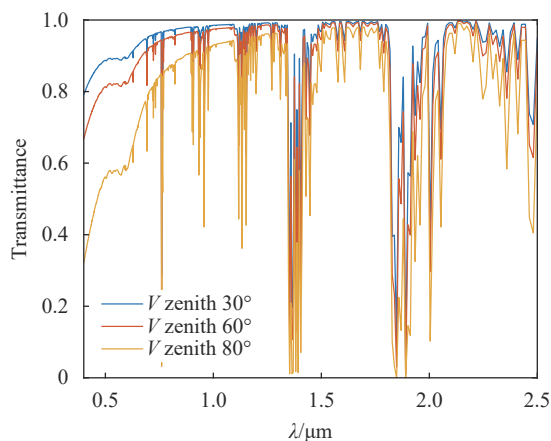


图 2 不同观测天顶角大气透过率

Fig.2 Atmospheric transmittivity at different zenith angles

通过图 1、2 可知, 波长越长, 大气背景辐射流量越小, 且在不同波段存在明显的大气窗口。但对于全天时星敏传感器而言, 当光学响应波长超过 2 μm 时, 仪器自身辐射会对恒星探测产生干扰。因此, 综合红外传

感器响应特性、大气背景辐射、大气透过率等因素, 全天时星敏传感器的光学响应波段一般选择在 600~1700 nm 之间, 即 R、I、J、H 波段^[24-26]。为规避各波段大气窗口带宽不同影响, 系统分析全天时星敏传感器实际恒星探测力与响应波段之间关系, 在 R、I、J、H 波段大气窗口内取 100 nm 带宽波段大气背景辐射强度及大气透过率积分均值见表 2, 其中大气透过率取三个观测天顶角的均值, 作为全天空大气透过率典型值。

表 2 不同波段大气参数均值

Tab.2 Mean values of atmospheric parameters in different bands

Band	R	I	J	H
Bandwidth/μm	0.6-0.7	0.75-0.85	1.2-1.3	1.6-1.7
Transmissivity	0.82	0.90	0.96	0.97
Radiance/W·cm ⁻² ·sr ⁻¹ ·μm ⁻¹	8.68E-04	3.34E-04	3.69E-05	8.01E-06

2 不同波段测星信噪比模型

2.1 星敏传感器接收信号能量

对于星敏传感器而言, 恒星可以视为点光源, 星敏传感器接受恒星能量信号与光学系统的通光口径、传感器量子效率、曝光时间有关。对于响应波段为 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 的星敏传感器, 成像器件产生的信号光子数可表示为:

$$S_m = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t \frac{Q_{qua}}{W_{ph}} d\lambda \quad (2)$$

式中: $F(\lambda)$ 表示星等为 m 的恒星光谱辐流量; $\tau_0(\lambda)$ 为大气透过率; D 为光学系统通光口径; $\tau_{opt}(\lambda)$ 为光学系统透过率; Δt 为积分时间; Q_{qua} 为探测器的量子效率; $W_{ph} = hc/\lambda$ 表示单个光子的能量; 积分限 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 表示星敏传感器光学系统的光谱响应范围。

大气作为辐射体, 单像元接收到的能量为传感器像元对应的球面度与大气辐射强度的乘积, 因此单像元大气背景辐射光子数可表示为:

$$S_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t \frac{Q_{qua}}{W_{ph}} \Omega d\lambda \quad (3)$$

式中: $I_b(\lambda)$ 为大气背景辐射亮度; $\Omega = d^2/f^2$ 为单像元对应辐射球面度; d 为单个像元直径; f 为光学系统焦距。

2.2 测星信噪比模型

红外传感器噪声主要包括暗电流噪声、读出噪声、散粒噪声、量化噪声等, 对于新一代红外传感器

而言,暗电流噪声、量化噪声小到可以忽略,读出噪声通过相关技术也可以有效抑制,但散粒噪声是由光子

入射及光电转化过程随机性造成,没有有效方法抑制^[27]。
表 3 为两款典型红外传感器参数。

表 3 典型红外传感器参数

Tab.3 Typical IR sensor parameters

Name	Model	Total pixels	Depth	Full well	Dark current	Readout noise
QHY990	CMOS	1 392×1 052	12 bit A/D	120 ke	≤227 e ⁻ /pixel	≤150 e ⁻
ZephIR™	CCD	640×512	14 bit A/D	110 ke	≤125 e ⁻ /pixel	≤75 e ⁻

由表 3 可知,对于白昼强天空背景而言,暗电流噪声、量化噪声、读出噪声相对于光子散粒噪声可以忽略不计,强天空背景造成的光子散粒噪声是星敏器主要噪声源^[27],其受传感器信号光子数影响,服从泊松分布,方差为:

$$\delta_p = \sqrt{S_{signal}} \quad (4)$$

在短波区间传感器的量子效率 Q_{qua} ,单个光子的能量 Wph 、光学系统的透过率 $\tau_{opt}(\lambda)$,以及大气透过率 $\tau_0(\lambda)$ 均可视为常值,综合公式(2)~(4)可推导出星敏器探测信噪比 SNR 公式如下:

$$SNR = \frac{\rho S_m}{\sqrt{\rho S_m + S_b + I_d \Delta t + \sigma_{read}^2}} \approx \frac{\rho S_m}{\sqrt{\rho S_m + S_b}} = \sqrt{\frac{\pi D^2}{4} \frac{Q_{qua}}{hc} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t} \frac{\rho \tau_0(\lambda) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho F(\lambda) \tau_0(\lambda) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) \Omega d\lambda}} \quad (5)$$

式中: $I_d \Delta t$ 为探测器暗电流噪声; σ_{read}^2 为探测器读出噪声。综合公式(2)、(3)可推导出恒星与背景对比度 CR 公式如下:

$$CR = \frac{\rho S_m}{S_b} = \frac{\rho \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t \frac{Q_{qua}}{Wph} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) \frac{\pi D^2}{4} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t \frac{Q_{qua}}{Wph} \Omega d\lambda} = \frac{\rho \tau_0(\lambda) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) \Omega d\lambda} \quad (6)$$

表 4 典型星敏器工作条件

Tab.4 Typical star sensor operating conditions

Pixel size/ μm	Focal length/mm	ρ	Band	$\tau_0(\lambda)$	$I_b/W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$	$F(\lambda) / W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
5	100	0.25	R	0.81	8.68E-04	2.42E-12
		0.25	I	0.89	3.34E-04	1.26E-12
		0.25	J	0.85	3.69E-05	3.129E-13
		0.25	H	0.95	8.01E-06	1.133E-13

式中的: ρ 为散焦后单个像元信号光子占星点总能量的比值。取典型星敏器工作条件如表 4 所示。

根据公式(6),计算出在 R、I、J、H 等波段,0 等星点与大气背景的对比度 CR 分别为 0.23、0.34、0.72、1.34。代入公式(6)则:

$$SNR = \frac{\rho S_m}{\sqrt{\rho S_m + S_b}} = \frac{CR}{\sqrt{1 + CR}} \approx \frac{\rho S_m}{\sqrt{S_b}} \quad (7)$$

产生的近似误差分别为 0.02、0.05、0.17、0.47,且随着星等增加成指数级减小,对于 1 等星产生近似误差为 0.003、0.008、0.04、0.10。因此对实现 1 等星以上探测需求的星敏器而言,公式(5)可简化为:

$$SNR \approx \frac{\rho S_m}{\sqrt{S_b}} = \sqrt{\frac{\pi D^2}{4} \frac{Q_{qua}}{hc} \tau_{opt}(\lambda) \Delta t} \frac{\rho \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \cdot \tau_0(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) \Omega d\lambda}} = C_{sensor} \cdot \frac{\tau_0(\lambda) \sqrt{\Delta t} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) d\lambda}} \quad (8)$$

$$C_{sensor} = \rho \sqrt{\frac{\pi D^2}{4Q} \frac{Q_{qua}}{hc} \tau_{opt}(\lambda)} \quad (9)$$

式中: C_{sensor} 为与传感器硬件相关的信噪比系数,主要与光学系统口径 D 、光学系统透过率 $\tau_{opt}(\lambda)$ 、探测器量子效率 Q_{qua} 、单像元对应辐射球面度 Ω 等因素相关。

恒星连续光谱主要受恒星温度影响,实际应用中

通常采用黑体辐射光谱来表征恒星辐射光谱。由普朗克黑体辐射相关知识可知,温度为 T 的恒星辐射光谱通量密度可表示为^[28]:

$$F_B(\lambda) = \pi B(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5(e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (10)$$

式中: $B(\lambda)$ 为恒星黑体辐射光谱辐流量; h 为普朗克常量, 值为 $6.626\ 068\ 76 \times 10^{-34}$ J·s; c 为光速, 值为 $2.997\ 93 \times 10^8$ m·s⁻¹; λ 为波长; T 为恒星色温度; k 为玻耳兹曼常量, 值为 $1.380\ 658 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹。

根据公式 (10) 可知, 设 λ_n 为波段 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 的中心波长, λ_Δ 为波段带宽, 恒星光谱连续积分 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda$ 与 $F(\lambda_n) \sqrt{\lambda_n} \lambda_\Delta$ 误差为:

$$Re = 1 - \frac{F(\lambda_n) \sqrt{\lambda_n} \lambda_\Delta}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda} \quad (11)$$

通过仿真计算可知, 在 λ_n 处于 600~1 700 nm 范围, 带宽 200 nm 以内, 恒星温度为 15 000 K 以下, Re 值不超过 0.05, 因此用 $F(\lambda_n) \sqrt{\lambda_n} \lambda_\Delta$ 替换 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda$ 并不影响信噪比推算精度, 公式 (8) 可进一步简化为:

$$SNR = C_{sensor} \cdot \frac{\tau_0(\lambda) \sqrt{\Delta t} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) \sqrt{\lambda} d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) d\lambda}} \approx C_{sensor} \cdot \frac{\tau_0(\lambda) \sqrt{\Delta t} F(\lambda_n) \sqrt{\lambda_n} (\lambda_2 - \lambda_1)}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_b(\lambda) d\lambda}} \quad (12)$$

由公式 (12) 可知, 探测器信噪比不仅与探测自身硬件 C_{sensor} 有关, 还与光学响应波段区间 $[\lambda_1, \lambda_2]$ 、大气透过率 $\tau_0(\lambda)$ 、恒星在光学响应波段中心波长处辐流量 $F(\lambda_n)$ 、大气背景辐流量 $I_b(\lambda)$ 有很大关系。因此在探测器硬件条件一定的前提下, 光学响应波段的选择也会明显影响星敏传感器探测信噪比。

3 全天时星敏传感器最佳光学响应波段分析

结合表 1、2 中 R 、 I 、 J 、 H 波段 0 星等辐流量大小及大气透过率典型值, 利用公式 (13) 可计算出 100 nm 响应带宽条件下, 全天时星敏传感器采用不同光学响应波段 0 等星探测信噪比为:

$$SNR_{R100} = \frac{C_{sensor} \tau_0(\lambda) \sqrt{\Delta t} F(\lambda_{Rn}) \sqrt{\lambda_{Rn}} (\lambda_{R2} - \lambda_{R1})}{\sqrt{\int_{\lambda_{R1}}^{\lambda_{R2}} I_b(\lambda) d\lambda}}$$

$$SNR_{I100} = 0.62 \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{R1}}^{\lambda_{R2}} I_b(\lambda_{Rn}) d\lambda}{\int_{\lambda_{J1}}^{\lambda_{J2}} I_b(\lambda_{Jn}) d\lambda}} \cdot SNR_{R100}$$

$$SNR_{J100} = 0.24 \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{R1}}^{\lambda_{R2}} I_b(\lambda_{Rn}) d\lambda}{\int_{\lambda_{J1}}^{\lambda_{J2}} I_b(\lambda_{Jn}) d\lambda}} \cdot SNR_{R100}$$

$$SNR_{H100} = 0.10 \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{R1}}^{\lambda_{R2}} I_b(\lambda_{Rn}) d\lambda}{\int_{\lambda_{H1}}^{\lambda_{H2}} I_b(\lambda_{Hn}) d\lambda}} \cdot SNR_{R100} \quad (13)$$

式中: SNR_{R100} 、 SNR_{I100} 、 SNR_{J100} 、 SNR_{H100} 为对应光学响应波段 0 等星的探测信噪比; λ_{Rn} 为 R 波段中心波长; $\lambda_{R2} - \lambda_{R1}$ 为 R 波段波段区间, 其他波段变量命名类同。利用公式 (13), 对应表 4 中各波段大气背景辐射强度典型值, 求出各波段 0 等星信噪比比例见表 5。

表 5 各波段 0 等星信噪比比例 (SNR_{R100})

Tab.5 SNR ratio of 0 magnitude stars in each band (SNR_{R100})

Band	R	I	J	H
Width/ μ m	0.6-0.7	0.75-0.85	1.2-1.3	1.6-1.7
Ratio	1	1.01	1.16	1.04

由表 5 可知, 在白昼条件下, J 波段 0 等星信噪比最强, 其次为 H 波段, 分别为 R 波段 0 等星信噪比的 1.16、1.04 倍。

由 1.1 节可知, 恒星星等实际表征对应波段辐流量大小, 对于采用不同光学响应波段的星敏传感器, 对应 0 等星信噪比越高, 星敏传感器实际探测的极限星等也越高。设两个波段 0 等星探测信噪比分别为 SNR_1 、 SNR_2 , 则实际星敏传感器对应波段探测星等 m_1 、 m_2 关系为:

$$\frac{SNR_1}{SNR_2} \approx \frac{\rho S_{m_1} / \sqrt{S_b}}{\rho S_{m_2} / \sqrt{S_b}} = \frac{S_{m_1}}{S_{m_2}} = 2.512^{m_1 - m_2} \quad (14)$$

通过公式 (14) 可将不同波段 0 星等信噪比关系转换为同等硬件条件下可探测星等关系, 可表示为:

$$m_1 - m_2 = 1 \lg_{2.512} \frac{SNR_1}{SNR_2} \quad (15)$$

由公式 (15) 计算可知, 当全天时星敏感器在 R 波段可探测极限星等为 0 等星时, 则在 I 、 J 、 H 波段可分别探测到对应波段极限星等分别为 0.011、0.161、0.043 等星。

由于各波段同星等恒星分布密度并不相同, 只有

具体结合各星等恒星统计数量, 才能准确分析全天时星敏感器采用不同光学响应波段的实际测星能力。依据 USNO 星表和 2 MASS 星表, 分别对 R 、 I 、 J 、 H 波段各星等恒星数量进行统计, 如表 6 所示。

表 6 R 、 I 、 J 、 H 波段恒星统计

Tab.6 Star statistics in R , I , J , and H bands

Magnitude	0	1	2	3	4	5	6
R band	12	26	98	280	870	2618	8385
I band	18	36	126	439	1422	4472	14730
J band	66	177	688	2182	6273	17894	57975
H band	171	569	1825	5527	19594	45210	130851

工程应用中, 信噪比大于 6 即可准确提取出目标。以全天时星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比为变量, 结合不同波段恒星统计数量, 分析可得全天时星敏感器采用不同光学响应波段的实际可探测对应波段恒星数量如图 3 所示。由此可知, 同等硬件条件下全天时星敏感器采用 H 波段恒星探测数量明显

多于 J 波段, 说明仅依据不同波段 0 星等信噪比大小并不能判断星敏感器实际恒星探测能力, 结合对应波段恒星的分布密度, 才能准确分析出星敏感器实际探测恒星的能力。

为定量分析全天时星敏感器在同等硬件条件下, 采用不同光学响应波段对星敏感器探测恒星数量的具体影响, 以星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比 SNR 为参考, 分别统计采用不同光学响应波段星敏感器实际探测恒星数量, 统计数据如表 7 所示。

由表 7 可知, 当全天时星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比达到 100 时, R 波段可探测恒星数为 300 颗, 采用 I 、 J 、 H 波段可分别多探测 195、2350、5780 颗恒星, 提升比为 65%、782%、1926%, 充分说明全天时星敏感器光学响应波段选择对星敏感器实际恒星探测能力影响十分显著。以星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比为参考基准, 分别计算采用不同光学响应波段探测恒星数量相对比例, 如图 4 所示。

整体来看, 采用 H 波段时全天时星敏感器实际恒星探测能力最佳, 同等硬件条件下, 探测恒星数量约

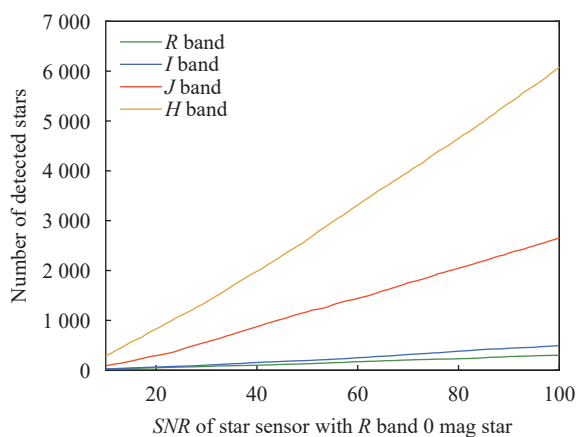


图 3 采用不同光学响应波段探测恒星数量

Fig.3 Detecting number of stars with different optical responding bands

表 7 不同光学响应波段探测恒星数量统计

Tab.7 Statistics of the number of detected stars in different optical response bands

SNR	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R	26	49	75	100	130	172	205	230	275	300
I	27	63	102	155	194	252	315	382	441	495
J	90	294	564	873	1172	1441	1756	2047	2351	2650
H	297	828	1372	1984	2620	3312	3974	4652	5359	6080

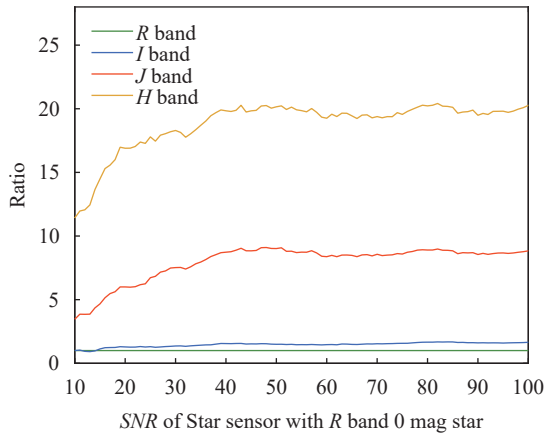


图 4 采用不同光学响应波段探测恒星数量比例

Fig.4 Proportion of detected stars in different optical responding bands

为采用 R、I、J 波段探测恒星数量的 17、10、2 倍。随着探测信噪比提升, H 波段优势愈加明显, 最高可达同等条件下 R、I、J 波段的 20、12.2、2.2 倍。

取星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比为 10、50、100 时, 绘制不同光学响应波段探测的恒星天球分布情况, 见图 5。由此可知, 在同等硬件条件下, 采用 H 波段为全天时星敏感器光学响应波段, 全天空各区域可探测的恒星密度明显高于 R、I、J 波段。

对于星敏感器而言, 视场内至少需同时探测到 3 颗以上恒星才能实现定姿。取星敏感器视场为 $5^\circ \times 5^\circ$, 随机进行 3000 次蒙特卡洛仿真实验, 计算采用不同光学响应波段视场内可探测 3 颗以上恒星概率如表 8 所示。

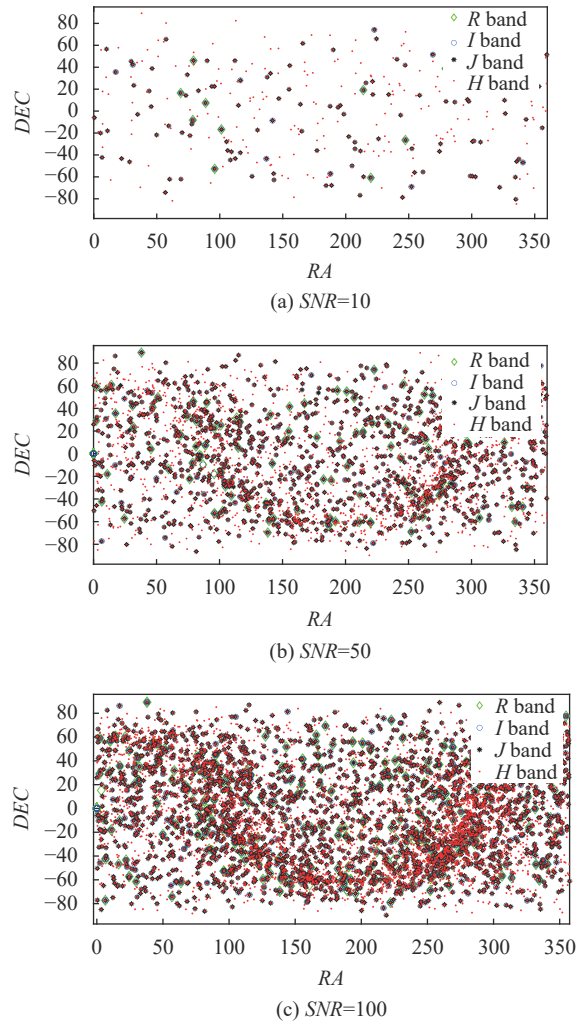


图 5 采用不同光学响应波段探测恒星分布图

Fig.5 Distribution map of stars detected using different optical response bands

表 8 采用不同光学响应波段星敏感器探测 3 颗以上恒星概率

Tab.8 Probability of detecting three or more stars using star sensors with different optical response bands

Band	SNR of star sensor with R band 0 magnitude star									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
R	0.00%	0.05%	2.00%	2.85%	3.40%	4.80%	5.09%	5.49%	5.94%	6.09%
I	0.00%	0.50%	4.90%	9.84%	15.28%	22.68%	28.07%	35.81%	42.16%	48.30%
J	0.93%	4.10%	12.94%	23.08%	33.32%	44.93%	56.57%	64.81%	71.71%	77.28%
H	4.04%	20.68%	40.36%	60.44%	76.65%	87.09%	92.93%	96.63%	98.17%	99.23%

由表 8 可知, 采用 H 波段全天时星敏感器定姿成功率明显优于 R、I、J 波段, 当星敏感器对 R 波段 0 等星探测信噪比达到 100 时, 采用 H 波段即可实现 99.23% 视场内探测到 3 颗以上恒星, 而同等条件下 R、I、J 波段分别只有 6.09%、48.30%、77.28%。

4 实验验证

4.1 实验设计

为验证采用不同光学响应波段全天时星敏感器恒星探测能力, 采用 sky-watcher 150 mm 口径光学镜

筒, 搭配 QHY990 短波红外 InGaAs 相机 (相机参数见表 3) 进行白昼恒星观测。系统采用滤镜轮进行滤光片切换, 使用电动云台进行寻星。该白昼观星系统具有大口径观星效果好、滤光片切换迅速、自动寻跟恒星等特点, 对开展全天时星敏传感器各参量设计分析十分有利, 具体系统搭建如图 6 所示。



图 6 白昼红外观星系统

Fig.6 Daytime infrared star observation system

由于同星等不同波段恒星统计数量为固定值, 而不同星等星图信噪比可利用相应波段 0 等星信噪比进行推算。因此通过计算不同波段 0 等星信噪比关系即可验证采用不同光学响应波段全天时星敏传感器实际恒星探测能力。为此, 实验通过观测一颗恒星不同波段星图, 依据恒星在不同波段的星等计算对应波段 0 等星探测信噪比。

4.2 星图获取及数据处理

2022 年 12 月 12 日, 地点郑州某楼顶, 分别采用中心波长为 760、1240、1650 nm, 带宽为 100 nm 滤光片, 拍摄北极星 (Polaris)、天津一 (Sadr) 红外星图。13 时拍摄 Polaris 星图, 曝光时间统一为 30 ms, 如图 7 所示, 其中图 (a)~(c) 分别为 *I*、*J*、*H* 波段星图。16 时拍摄 Sadr 星图, 曝光时间统一为 90 ms, 如图 8 所示, 其中图 (a)~(c) 分别为 *I*、*J*、*H* 波段星图。

由图 7、8 可见, 白昼观星系统测星效果好, 信噪比高, 对验证光学波段信噪比模型十分有利。信噪比公式为:

$$SNR = \frac{\mu_{star} - \mu_{back}}{\delta} \quad (16)$$

式中: *SNR* 为星图信噪比; μ_{star} 为恒星灰度均值;

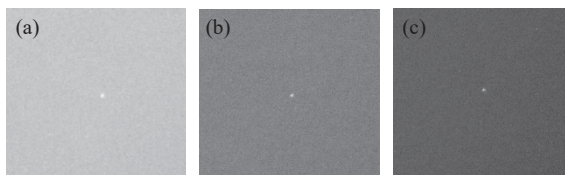


图 7 白昼北极星红外星图

Fig.7 Daytime infrared image of Polaris

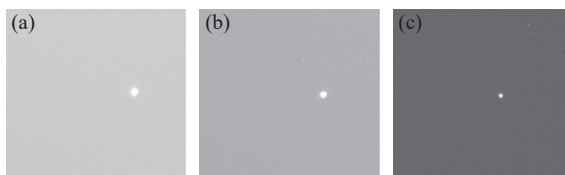


图 8 白昼天津一红外星图

Fig.8 Daytime infrared image of Sadr

μ_{back} 为天空背景灰度均值; δ 为星图灰度值标准差。计算得到各波段星图信噪比, 见表 9。

表 9 各光学波段测星信噪比

Tab.9 Star SNR in different optical response bands

Name	Item	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>H</i>
Polaris	Magnitude	1.22	0.795	0.46
	SNR	4.2	6.7	8.5
Sadr	Magnitude	1.4	1.11	0.83
	SNR	12.1	19.3	22.4

利用表 9 中 Polaris、Sadr 数据, 分别推算出 *I*、*J*、*H* 波段 0 等星信噪比为 1 : 1.08 : 1.01 和 1 : 1.22 : 1.09, 与 3 节理论推导的 1.01 : 1.16 : 1.04 总体较为接近, 验证了各波段 0 等星探测信噪比模型的有效性。分析 0 等星信噪比模型存在误差原因为: 1) 白昼恒星对比度低, 相机调焦对准困难导致星点成像大小不一; 2) 不同波段统一曝光时间易造成部分像元过饱和; 3) 模型中天空背景亮度、大气透过率仿真值与与地面实际值并不完全吻合。

在 Polaris、Sadr 推算的 *I*、*J*、*H* 波段 0 等星信噪比基础上, 结合不同波段恒星分布情况, 分别计算全天时星敏传感器采用不同光学响应波段测星能力相对比例关系, 如图 9 所示。图 9 中蓝色长虚线自上而下表示基于北极星星图推算的 *H*、*J*、*I* 波段全天时星敏传感器恒星探测能力相对比例关系; 红色短虚线自上而下表示基于天津一星图推算的 *H*、*J*、*I* 波段全天时星敏传感器恒星探测能力相对比例关系, 绿色实线自上而

下表示理论推算的 H 、 J 、 I 波段全天时星敏感器恒星探测能力相对比例关系。

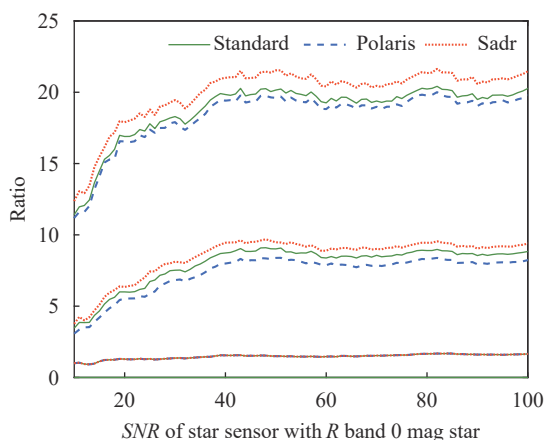


图 9 不同光学波段实际恒星探测能力对比

Fig.9 Comparison of actual star detection ability in different optical wavebands

由图 9 可知,虽然北极星星图推算的 H 波段恒星探测能力优于理论推导值,而天津一星图推算的 H 波段恒星探测能力弱于理论推导值,但综合来看采用 H 波段全天时星敏感器测星能力明显优于其他波段,约是同等条件下 R 、 I 、 J 波段的 17、10、2 倍,进一步验证了理论的正确性。

5 结 论

为了减小全天时星敏感器成像色差,提升全天时星敏感器白昼测星信噪比,对全天时星敏感器各光学响应波段测星能力进行了对比分析。通过对比分析得出,采用不同光学响应波段对全天时星敏感器实际测星能力影响显著;在同等硬件条件下,全天时星敏感器采用 H 波段恒星探测能力最为突出,探测恒星数目约为 R 、 I 、 J 波段的 17、10、2 倍,定姿成功率也有明显优势。搭建了白昼观星平台,实验计算了采用不同光学波段平台实际测星能力,实验结果显示,采用 H 波段全天时星敏感器测星能力明显强于其他光学波段,是全天时星敏感器最优光学响应波段。

合理设计全天时星敏感器光学响应波段,可有效提升星敏感器白昼测星效果,而曝光时间、响应带宽也同样影响着红外星图的整体成像质量。因此,在解决全天时星敏感器波段选择的基础上,还需围绕全天时星敏感器光学响应带宽与曝光时间设计优化进行

综合研究。

参考文献:

- [1] Zhang Kaisheng, Su Xiuqin, Ye Zhilong. Large relative aperture optical system design for all day star sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(11): 1111003. (in Chinese)
- [2] Wang Wenjie, Zhang Guangjun, Wei Xinguo. Modeling analysis and experimental verification of all-time star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1113001. (in Chinese)
- [3] Zhang Hui, Zhou Xiangdong, Wang Xinmei, et al. Current status and development of all-sky time-star sensor in near-earth space [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(8): 19-31. (in Chinese)
- [4] Zhang Qiancheng, Zhong Sheng, Lv Jinsong, et al. Design of optical system for large-field all-sky time star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220583. (in Chinese)
- [5] González-fernández C, Hodgkin S T, Irwin M J, et al. The VISTA ZYJKs photometric system: Calibration from 2 MASS [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 474(4): 5459-5478.
- [6] Hu Weida, Li Qing, Chen Xiaoshuang, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 20190281. (in Chinese)
- [7] Li Xue, Gong Haimei, Shao Xiumei, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(1): 129-138. (in Chinese)
- [8] Belenkii M. Daytime stellar imager: USA, 7349804[P]. 2008-03-25.
- [9] Yu Chunlei, Gong Haimei, Li Xue, et al. 2 560×2 048 yuan short-wave infrared InGaAs focal plane detector (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210941. (in Chinese)
- [10] Rex M, Chapin E, Devlin M J, et al. BLAST autonomous daytime star cameras [C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, SPIE, 2006, 6269: 1093-1100.
- [11] Zhu Hailong, Bin Liang, Tao Zhang, et al. Designing considerations for airborne star tracker during daytime [C]//The 27th Chinese Control and Decision Conference (2015 CCDC). Qingdao, China, IEEE, 2015: 4279-4283.
- [12] Wang Wenjie. Optical parameters optimization for all-time star sensor [J]. *Sensors*, 2019, 19(13): 2960.
- [13] Hughes D W. The introduction of absolute magnitude (1902-1922) [J]. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 2006, 9: 173-179.

- [14] Schulman E, Caroline V C. Misconceptions about astronomical magnitudes [J]. *American Journal of Physics*, 1997, 65(10): 1003-1007.
- [15] Cochran A L. Spectrophotometry with a self-scanned silicon photodiode array-II-secondary standard stars [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 1981, 45: 83-96.
- [16] Bessell M S. Photometric systems [J]. *International Astronomical Union Colloquium*, 1993, 136: 22-39.
- [17] Casagrande L, VandenBerg D A. Synthetic stellar photometry – II testing the bolometric flux scale and tables of bolometric corrections for the Hipparcos/Tycho, Pan-STARRS1, SkyMapper, and JWST systems [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2018, 475(4): 5023-5040.
- [18] Andrew W, Kaspar von Braun. Revised filter profiles and zero points for broadband photometry [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(948): 102-125.
- [19] Bessell M S. The Hipparcos and Tycho photometric system passbands [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific, IOP Publishing*, 2000, 112(773): 961.
- [20] Bilir S, Ak S, Karaali S, et al. Transformations between 2 MASS, SDSS and BVRI photometric systems: Bridging the near-infrared and optical [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 384(3): 1178-1188.
- [21] Maíz Apellániz J. A uniform set of optical/NIR photometric zero points to be used with CHORIZOS[C]//The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization, 2007, 364: 227.
- [22] Bessell M, Murphy S. Spectrophotometric libraries, revised photonic passbands, and zero points for UBVRI, hipparcos, and tycho photometry [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2012, 124(912): 140-157.
- [23] Wang Ruwen, Xie Pinhua, Xu Jin, et al. Retrieve of water vapor column density in atmosphere based on near infrared differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0201001. (in Chinese)
- [24] Rogalski A. Next decade in infrared detectors[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV, SPIE, 2017, 10433: 128-152.
- [25] Wenjie Wang, Xinguo Wei, Jian Li, et al. Noise suppression algorithm of short-wave infrared star image for daytime star sensor [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85: 382-394.
- [26] Zheng Xunjiang, Huang Yongqin, Mao Xiaonan, et al. Research status and key technologies of all-day star sensor [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1510(1): 012027.
- [27] Nicholas A, Truesdale, Dinkel K J, et al. DayStar: Modeling and test results of a balloon-borne daytime star tracker [C]//2013 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2013: 1–12.
- [28] Tola Engin. Black-body SNR formulation of astronomical camera systems [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(9): 4941-4949.

Optimal design and experimental verification of optical response band of all-time star sensor

Gou Wanxiang¹, Tong Shuai¹, Jia Jingyu¹, Qin Zixuan¹, Sun Jifu², Li Chonghui^{1*}

(1. School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract:

Objective For all-time star sensors, traditional wide optical response bandwidth design can easily cause imaging chromatic aberration, which is not conducive to star detection and extraction; Some bands have low atmospheric transmittance, and excessively wide response bandwidth can easily reduce the signal-to-noise ratio of star detection. With the rapid development of infrared sensor technology, these issues have gradually become important bottlenecks that limit the further improvement of the accuracy of all-time star sensors. Due to the significant spectral correlation between atmospheric background radiation and transmittance, there are significant differences in the number of observable stars in different bands, resulting in significant differences in the actual star measurement capabilities of all-time star sensors using different optical sensitive bands. Therefore, according to the characteristics of the near-infrared band atmospheric window, it is of great significance to select an appropriate optical response band to improve the star detection capability of the all-time star sensor.

Methods Based on the definition of 0 magnitude star radiation flux in different optical response bands, and taking into account factors such as atmospheric background radiation and transmittance in different bands, the signal-to-noise ratio relationship of 0 magnitude star corresponding to different optical response bands under the same hardware conditions is derived (Tab.5); Using Modtran software to simulate and calculate atmospheric parameters in relevant bands, and combining with the statistical number of stars in different bands, the quantitative analysis adopts the relationship between the number of star detections in different optical response bands (Fig.3, Tab.7). A daytime star observation platform is built and the model of the relationship between the number of star detections is verified by taking pictures of Polaris and Sadr. On this basis, based on the distribution of stars in different bands of the same magnitude (Fig.5), combined with the attitude determination conditions of the star sensor, Monte Carlo simulation was used to calculate the actual success rate of the star sensor's attitude determination using different optical response bands.

Results and Discussions Under the same hardware conditions, the star detection ability of the all-time star sensor using the *H*-band as the optical response band is about 17 times, 10 times, and 2 times that of the *R*, *I*, and *J* bands (Fig.4). The correctness of this conclusion was verified through actual observations of one or two stars in North Star and Sadr (Fig.9). The field of view of the star sensor is taken as $5^{\circ} \times 5^{\circ}$, when the signal-to-noise ratio of the star sensor to *R*-band 0 magnitude stars reaches 100. Using the *H*-band can achieve the detection of more than 3 stars in a field of view of 99.23%, while under the same conditions, the *R*-band, *I*-band, and *J*-band are only 6.09%, 48.30%, and 77.28%, respectively (Tab.8).

Conclusions In order to reduce the chromatic aberration of the all-time star sensor imaging and improve the daytime star measurement signal-to-noise ratio of the all-time star sensor, a comparative analysis was conducted on the star measurement capabilities of the all-time star sensor in various optical response bands. Through comparative analysis, it is found that the use of different optical response bands has a significant impact on the actual star measurement ability of all-time star sensors; Under the same hardware conditions, the all-time star sensor has the most outstanding ability to detect stars in the *H*-band, with a detection number of stars about 17 times, 10 times, and 2 times that of the *R*, *I*, and *J* bands. The success rate of attitude determination also has a significant advantage. A daytime star observation platform was built, and the actual star measurement capabilities using different optical band platforms were experimentally calculated. The experimental results showed that the *H*-band all-time star sensor has significantly stronger star measurement capabilities than other optical bands, making it the optimal optical response band for all-time star sensors.

Key words: star sensor; background radiation; atmospheric transmissivity; magnitude; responding band

Funding projects: Henan Province Youth Talent Recruitment Project (2022HYTP008)