

针对不同海拔白昼星光探测的星敏感器光学参数优化

倪源蔓¹, 戴东凯^{2,3*}, 王省书^{2,3}, 周召发¹

- (1. 火箭军工程大学 智控实验室, 陕西 西安 710025;
2. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;
3. 国防科技大学 南湖之光实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 极限探测星等、视场内导航星数量及光学系统的尺寸和质量等是全天时星敏感器光学探测系统的重要指标, 而各项性能指标的提升往往是存在矛盾制约的, 进而导致光学系统的参数设计缺乏明确的优化目标。为提高白昼星光探测系统的综合性能, 文中对光学系统参数优化进行了深入研究。首先, 根据短波红外探测器的响应特性建立了基于图像灰度信息的信噪比模型, 在此基础上, 针对星体跟踪和星图匹配两种不同的导航模式, 提出了星敏感器光学系统参数优化方案。仿真采用 Sofradir 的 InGaAs 传感器参数作为典型值, 分别对海平面星体跟踪模式和高海拔星图匹配模式进行光学系统参数设计, 得到白昼星光探测的最优口径、焦距和截止波长, 同时确定了相应的全天时星敏感器星体跟踪/星图匹配导航模式转换的临界海拔。研制的原理样机口径 60 mm、焦距 515 mm、截止波长 1.48 μm , 利用样机在地面开展了白昼观星实验, 对提出的光学系统参数优化理论进行了验证, 同时说明了该系统在近地面具备白昼星光探测能力。

关键词: 星敏感器; 白昼星光探测; 参数优化; 短波红外探测器; 噪声模型

中图分类号: V448.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20240056

0 引言

星敏感器通过观测恒星确定载体姿态, 具有精度高、抗干扰性强、隐蔽性好的优点, 在卫星、宇宙飞船、火箭等空间航天器上得到广泛应用^[1]。然而, 星敏感器非常容易受到大气散射光的影响, 在大气层内观测恒星能力急剧下降, 在白天背景光强烈的情况下甚至无法使用^[2]。由于天空的背景辐射主要集中在可见光波段, 通过光谱滤波选择最佳工作波段, 可以达到抑制天空背景辐射、增强图像信噪比的目的。此外, 采用长焦的望远镜头可以减小视场, 抑制进入视场的背景光, 同时增大光学系统口径来提高星光能量, 从而实现星光探测信噪比的增强。然而, 大口径、长焦光学系统会显著增大光学系统的体积、质量以及成本, 而减小视场又会使亮星在视场内出现的概率降低。因此, 星敏感器光学系统参数的设计与优化是

提高白昼星光探测能力、实现系统总体性能提升的关键^[3]。

关于全天时星敏感器光学系统设计的研究较多, 但主要是从工程应用角度出发, 针对特定的参数进行光学镜头和遮光罩的具体设计^[4-5], 从而达到减小像差以及抑制杂散光的目的。对于关键参数的选择, 往往缺乏系统全面的理论指导。樊巧云等^[6]通过对比多组典型参数的白昼星光探测能力, 为全天时星敏感器光学系统设计提供参考。基于 CCD 传感器进行仿真分析, 在可见光波段进行探测, 优化后系统的体积和质量很大且探测能力不佳。潘越等^[7]以 10 km 观测海拔探测 4.5 等星为例, 选择了一组典型的光学系统参数, 设计了一个小型化光学系统, 在白昼地面环境下可实现 2.5 等恒星的探测。其选择的工作波段为 0.6~1.1 μm , 该波段的天空背景辐射仍然较强, 为了进一步抑制噪声, 增强信噪比, 目前国内外普遍选择

收稿日期: 2024-01-31; 修订日期: 2024-05-31

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ4668)

作者简介: 倪源蔓, 女, 讲师, 博士, 主要从事光电仪器与测控技术方面的研究。

通讯作者: 戴东凯, 男, 讲师, 博士, 主要从事光电仪器与测控技术方面的研究。

短波红外成像系统结合光谱滤波技术,在 H 波段内进行白昼星光探测^[8]。王文杰等^[9]重点讨论了短波红外探测器噪声对星敏传感器探测能力的影响,并确定了 20 km 海拔的光学系统参数。勾万祥等^[10]使用常见的短波红外传感器作为同等硬件条件,证明了 H 波段的整体恒星探测能力和定姿成功率相较于 R、I、J 波段具有明显优势,实现了全天时星敏传感器响应波段的优化设计和试验验证。但是,上述研究仍然采用基于光电子数的噪声模型来计算星图信噪比,在信噪比公式中并未考虑光电子经过短波红外传感器的像素模数转化(ADC)响应特性,由此计算出的恒星极限探测能力并不准确。

综上所述,现有的光学系统参数优化方法存在的主要问题如下:一是基于光电子数进行全天时星光探测信噪比计算时,往往认为背景光产生的散粒噪声远远大于图像传感器的其他噪声,特别是经常忽略短波红外图像传感器的非均匀特性,且缺乏对模数转化因子的影响分析;二是在进行光学系统参数计算时,针对特定的工作场景缺乏针对星敏传感器在不同海拔、不同导航模式(星图匹配式或星体跟踪式)的通用优化理论和方法。

为此,文中根据短波红外探测器的成像过程建立噪声模型,推导了基于灰度信息的红外星图信噪比理论公式,从而计算不同条件下的极限探测星等。以此为基础,结合星敏传感器星体跟踪或星图匹配两种导航模式的探测要求,分别提出不同的光学系统参数优化目标。利用 MODTRAN 软件仿真生成天空背景辐射强度和大气透过率,针对不同海拔对全天时星敏传感器参数进行设计优化,同时确定导航模式转换的临界海拔。最后搭建了星敏传感器实物系统,通过地面观星实验对白昼星光探测效果进行验证。

1 光学系统参数优化理论

1.1 基于星图灰度信息的信噪比模型

传统的 CCD 相机像素之间的非均匀响应可以忽略,且对于高灵敏度 CCD 相机,其模数转换常数可以接近 1 DN/e⁻(Digital Number, 为像素灰度的数值),因此可以用光电子数代替灰度值来计算图像的信噪比。而短波红外探测器采用类似于 CMOS 的读出电路,每个像素包含独立的放大和模数转换单元,不同

像素之间存在明显的差异,图像的非均匀性也是红外图像传感器的噪声来源之一,特别是在曝光时间或图像背景变化较为剧烈的情况下,图像非均匀校正精度将会降低,导致该误差项的影响显著增大^[11]。此外,大部分短波红外图像传感器的模数转换常数一般远小于 1 DN/e⁻,因此基于光电子数的信噪比计算方法不再适用,需要基于灰度信息对星图信噪比进行重新计算,理论公式的具体推导过程如下。

星光信号可以视为平行光,理想状态下在图像上集中在一个点,但为了保证星点质心提取达到亚像素精度,同时避免信号能量过于分散而无法提取,星点在图像上一般集中在 3×3 的像素窗口内。假设星图中星点主要分布在 N_s 个像素,则单位时间内的星点像素平均电子数为:

$$E_s = \frac{A \cdot \bar{\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_a \cdot T_o \cdot QE \cdot d\lambda}{h \cdot c \cdot N_s} \cdot F_m \quad (1)$$

式中: A 为通光孔径面积; $\bar{\lambda}$ 代表平均探测波长;探测波段为 $\lambda_1 \sim \lambda_2$; T_a 为大气透过率; T_o 为光学系统透过率; QE 表示量子效率; h 和 c 分别为玻尔兹曼常数和光速; F_m 为 H 波段 m 星等的恒星辐照度, $F_m = 10^{-m/2.5} F_0$ (对于 H 波段, $F_0 = 3.33 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)^[12]。

接下来计算天空背景辐射,单位时间内的背景像素电子数为:

$$E_B = \frac{A \cdot \bar{\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_B \cdot T_o \cdot QE \cdot d\lambda}{h \cdot c} \cdot \Omega_p \quad (2)$$

式中:天空背景光谱辐亮度 L_B 可以通过 MODTRAN 仿真模拟软件计算得到; Ω_p 代表单像素对应的视场球面度大小。计算公式如下:

$$\Omega_p = 2\pi \left[1 - \cos \left(\arctan \left(\frac{s_p}{2 \cdot f} \right) \right) \right] \approx \frac{s_p^2}{f^2} \quad (3)$$

式中: s_p 为探测器像素尺寸; f 为光学系统的有效焦距。一般来说, $s_p \ll f$ 。

假设实际拍摄星图的曝光时间设置为 Δt ,对于模数转换率为 K (单位: DN/e⁻) 的 SWIR 探测器,可以计算得到星点像素灰度值为:

$$\bar{g}_s = E_s \cdot K \cdot \Delta t \quad (4)$$

类似地,可以计算得到背景像素灰度值为:

$$\bar{g}_B = E_B \cdot K \cdot \Delta t \quad (5)$$

由于采用类似于 CMOS 的读出电路,不同像元之间的响应存在明显差异,非均匀噪声就成为红外图像不可忽略的噪声来源。因此,红外星图的灰度值噪声 $\tilde{\sigma}_g$ 主要包含散粒噪声、读出噪声、暗电流噪声和非均匀噪声四个部分,具体的计算公式如下:

$$\tilde{\sigma}_g = \sqrt{K \cdot \bar{g}_B + K \cdot \bar{g}_{DC} + \sigma_{RO}^2 + \tilde{\sigma}_{NU}^2} \quad (6)$$

式中:散粒噪声由背景像素灰度值 $\bar{g}_B$ 决定;暗电流噪声由暗电流灰度值 $\bar{g}_{DC}$ 决定; σ_{RO} 表示读出噪声,是一个常值; $\tilde{\sigma}_{NU}$ 表示图像校正后的非均匀噪声残余,在探测器的线性响应区,该噪声校正后可以近似为一个常值^[13]。又因为暗电流灰度值与单位时间内暗电流产生的电子数 E_{DC} 成正比,公式 (6) 可以写成:

$$\tilde{\sigma}_g = \sqrt{(E_B + E_{DC}) \cdot K^2 \cdot \Delta t + \sigma_{RO}^2 + \tilde{\sigma}_{NU}^2} \quad (7)$$

根据信噪比的定义 $SNR = \bar{g}_s / \tilde{\sigma}_g$ 可以得到信噪比的表达式为:

$$SNR = \frac{E_s \cdot K \cdot \Delta t}{\sqrt{(E_B + E_{DC}) \cdot K^2 \cdot \Delta t + \sigma_{RO}^2 + \tilde{\sigma}_{NU}^2}} \quad (8)$$

由公式 (8) 可以看出,采集星图时设置的曝光时间越长,信噪比越大。因此,为了增大红外星图的信噪比,需要在避免像素饱和的条件下,尽量增大曝光时间。最大曝光时间 Δt 对应的电子容量为 Q'_{FW} ,有:

$$\Delta t = \frac{Q'_{FW} - Q_{RO}}{E_B + E_{DC} + E_s} \quad (9)$$

式中: Q_{RO} 表示探测器的读出噪声电子数; E_{DC} 表示单位时间内暗电流产生的电子数。由于探测暗星时星点信号远小于暗电流与背景之和,即 $E_s \ll E_B + E_{DC}$; 为了保证相机工作在线性区,根据实际白昼星光探测的经验,一般可将满阱容量 Q_{FW} 留出 1/3 的空余,即 $Q'_{FW} = 2/3 Q_{FW}$,所以有:

$$\Delta t \approx \frac{Q'_{FW} - Q_{RO}}{E_B + E_{DC}} \quad (10)$$

将公式 (10) 代入噪声公式 (7) 消去曝光时间 Δt , 可以得到:

$$\tilde{\sigma}_g = \sqrt{(Q'_{FW} - Q_{RO}) \cdot K^2 + \sigma_{RO}^2 + \tilde{\sigma}_{NU}^2} \quad (11)$$

因此,在调整曝光时间后,红外星图的噪声只取决于探测器自身参数。将公式 (1)、(2) 和 (10) 代入公式 (8),信噪比化简后可以表示为:

$$SNR = \frac{F_m \cdot C_1 \cdot A}{C_2 \cdot A / f^2 + E_{DC}} \quad (12)$$

其中, C_1 和 C_2 的表达式如下:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{\left(\bar{\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} T_a \cdot T_o \cdot QE \cdot d\lambda \right) \cdot K \cdot (Q'_{FW} - Q_{RO})}{h \cdot c \cdot N_s \cdot \tilde{\sigma}_g} \\ C_2 = \frac{\left(\bar{\lambda} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_B \cdot T_o \cdot QE \cdot d\lambda \right) \cdot S_p^2}{h \cdot c} \end{cases} \quad (13)$$

对于特定的探测器和探测波段,当天空背景辐射和探测恒星等相同时, C_1 和 C_2 可以近似为常数。结合公式 (12) 可以看出,对于同一星等的恒星和相同强度的天空背景辐射,影响星图信噪比的主要参数是 A 和 f 。因此,光学系统设计的主要目的是确定最优的口径和焦距,在探测器参数固定的条件下,尽可能增强全天时星敏感器的白昼星光探测能力。

光学系统在白昼星光能探测到多暗的恒星,即极限探测星等,与探测阈值的选取相关。为了避免误识别,星点提取时的灰度值信噪比阈值一般取 5^[14],根据公式 (12) 可以推导出极限探测星等 m 的表达式:

$$m = 2.5 \lg \frac{F_0 \cdot C_1 \cdot A}{5(C_2 \cdot A / f^2 + E_{DC})} \quad (14)$$

在准确估计到极限探测星等后,就能在此基础上对光学系统的参数进行设计优化。

1.2 不同导航模式的参数优化目标

星敏感器按照导航模式的不同分为星体跟踪式和星图匹配式:星体跟踪式星敏感器(也称星跟踪器)采用长焦光学系统,利用转位机构调整光轴指向,将已知的导航星“锁定”在视场内;星图匹配式星敏感器与载体固连,视场内需要同时探测到多颗导航星,用于星图识别和姿态解算。星体跟踪式和星图匹配式的工作原理和应用场景不同,对应的光学系统优化目标也存在差异,接下来对两种模式分别进行讨论。

1.2.1 低海拔星体跟踪式

低海拔应用平台接收的天空背景辐射很强,可探测恒星数量无法达到星图识别和姿态解算的要求,此时采用星体跟踪式星敏感器。星体跟踪导航模式一般利用惯性导航系统提供的姿态信息引导转位机构转动,从而改变星敏感器光轴指向实现恒星目标跟踪。因此,星体跟踪模式不进行独立的姿态解算,视场内仅有一颗导航星仍能工作,只要当前天空中存在

一定数量的恒星满足探测阈值即可。因此,星体跟踪式星敏感器的探测能力取决于极限探测星等,极限探测星等越大,全天空的可探测的恒星总数越多。

从公式 (15) 可以看出,极限探测星等随着 f 的增大而增大,但是光学系统的焦距的增大会导致视场减小,提高转位机构瞄准星点的难度。因此,光学系统的视场受到光轴指向精度的限制,考虑到惯导系统姿态误差、星/惯安装误差、转台轴系误差等,假设转台提供的光轴指向误差最大为 θ_{RT} ,可以计算出最小视场,对应的焦距 f 需要满足以下条件:

$$f \leq \frac{s_p \cdot \sqrt{m^2 + n^2}}{2 \cdot \tan \theta_{RT}} \quad (15)$$

其中,探测器焦平面阵列的像素数量为 $m \times n$ 。

此外,极限探测星等随着 A 的增大而增大,因此增大光学系统的口径也可以有效提高全天时星敏感器的探测能力,但口径的增大会使系统的体积和质量增大,同时光学系统 F 数的减小导致镜头设计和加工的难度都大大增加。在特定的应用场景和探测能力要求之下, F 数一般不小于 1.2,而镜头口径尽量选择较小值。

对于典型的 InGaAs 的 SWIR 探测器,其响应波段主要为 0.9~1.7 μm ^[15],但在该波段范围内天空背景辐射仍然较为强烈。为了进一步抑制天空背景辐射,在实际应用中一般使用 1.4 μm 以上的长波通滤光片,对应的 λ_1 和 λ_2 分别为 1.4 μm 和 1.7 μm ,该探测波段位于大气探测窗口中的 H 波段内。截止波长 λ_1 的选择也会影响星敏感器的探测能力。考虑到截止波长在 H 波段内进行略微调整,对极限探测星等产生的影响较小,所以在确定口径和焦距之后,再小幅度优化滤光片的截止波长。

星体跟踪式星敏感器的优化目标是全天空导航星数 SN_m ,优化步骤为:1) 根据光轴指向精度确定最大焦距;2) 利用 MODTRAN 计算的天空背景辐射得到不同焦距和口径的极限探测星等;3) 在平衡探测能力的情况下选择较小的口径;4) 小幅度调整探测波段的截止波长来提高极限探测星等。

1.2.2 高海拔星图匹配式

随着海拔高度的增大,白昼背景光逐渐降低,视场内可探测多颗恒星的概率增大,可满足星图匹配式星敏感器的探测要求,导航模式的改变也对应光学系

统设计方案的调整。由于星图匹配式星敏感器固连在载体上,单帧星图上需要有足够数量的导航星来实现星图识别和姿态解算,因此需要保证视场内可探测恒星数量大于等于 3。对于极限探测星等 m ,对应的视场内平均导航星数 SN_{FOV} 为:

$$SN_{FOV} = \frac{\Omega}{4\pi} \cdot SN_m \quad (16)$$

式中: SN_m 为全天空导航星数 (由极限探测星等 m 决定); Ω 为光学系统视场角对应的球面度。视场角球面度的计算公式如下:

$$\Omega = 2\pi \left[1 - \cos \left(\arctan \left(\frac{s_p \cdot \sqrt{m^2 + n^2}}{2 \cdot f} \right) \right) \right] \quad (17)$$

星图匹配式星敏感器的优化目标是视场内平均导航星数 SN_{FOV} ,优化步骤为:1) 利用 MODTRAN 计算的天空背景辐射得到不同焦距和口径的视场内平均导航星数;2) 导航星数若始终不大于 3 则选择星体跟踪式星敏感器优化方案;3) 若能满足最低导航星数的条件,在保证视场内平均导航星数不小于 3 的情况下选择适当焦距和较小的口径;4) 小幅度调整探测波段的截止波长来提高视场内平均导航星数。

2 不同海拔仿真结果

针对不同的海拔高度,仿真分析口径、焦距、截止波长对探测能力的影响,从而得到优化的光学系统参数。仿真过程使用 Sofradir 的 InGaAs 传感器,其主要参数如表 1 所示。

表 1 典型 SWIR 探测器参数

Tab.1 Parameters of typical SWIR detector

Parameter	Value	Parameter	Value
Resolution	640×512	Pixel size	15 μm × 15 μm
Operating waveband	0.9-1.7 μm	Quantum efficiency	>70%
Analog-to-digital conversion	0.042 DN/ e^-	Full well capacity	120 ke $^-$
Read out noise	30 e^-	Dark current	30 fA

由于探测器输出图像时采用类似于 CMOS 的读出电路,存在明显的非均匀响应,经过校正后的非均匀噪声残余^[16] 约为 2 DN。

2.1 海平面参数优化

将表 1 中的参数代入光学系统优化理论,海平面

的应用平台使用星体跟踪式星敏感器,参数优化的第一步是确定焦距上限。考虑到惯导系统姿态误差^[17]、星/惯安装误差、转台轴系误差等,星敏感器光轴指向的开环控制误差可优于 0.3° ,代入公式 (16) 得到焦距的限制为 1174 mm。

利用 MODTRAN 仿真计算海平面的天空背景辐射,海拔高度为 0 km,气溶胶模型设置为城市能见度 5 km (Urban-VIS=5 km),选择夏天正午太阳直射的条件,大气模型设置为中纬度夏天 (Mid-latitude summer),太阳天顶角为 0° 。当探测器光轴指向的天顶角分别为 30° 、 45° 、 60° 时, H 波段内的天空背景辐射亮度和大气透过率如图 1 所示。从图 1(a) 可以看出,探测器天顶角越小 (即光轴指向和太阳之间的夹

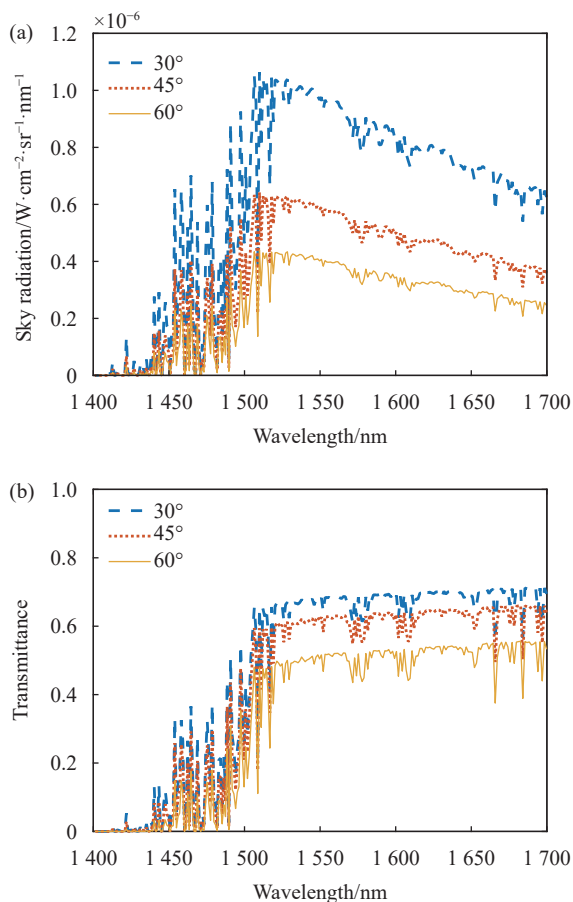


图 1 (a) 城市夏季正午探测器不同指向的背景辐射亮度仿真结果; (b) 城市夏季能见度 5 km 探测器不同指向的大气透过率仿真结果

Fig.1 (a) Sky background radiation simulation results at noon for urban summer with different detector directions; (b) Atmospheric transmittance simulation results at noon for urban summer with different detector directions when the visibility is 5 km

角越小), 天空背景辐射的强度就越大, 同时探测波段内的大气透过率相差不大。以探测器天顶角 30° 方向的天空辐射为参考, 计算得到极限探测星等, 在天顶角大于 30° 时 (86% 以上的天区) 都可以探测到该星等。

以参考方向的 MODTRAN 计算结果进行仿真, 得到不同口径和焦距对应的极限探测星等如图 2 所示。可以看出, 增大焦距和口径均能提升白昼星光探测能力, 而且焦距越大, 增大口径的提升作用越明显, 最终能达到的极限探测星等也越大。

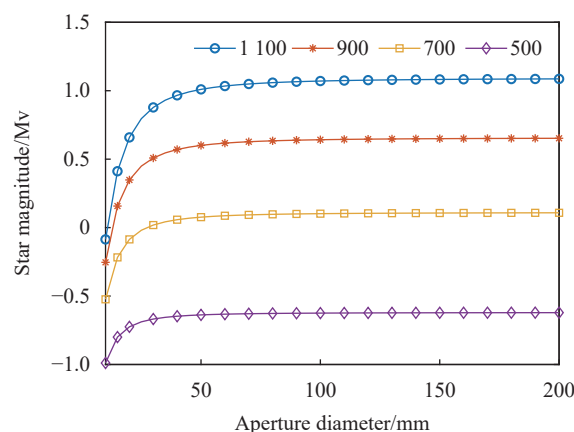


图 2 海平面极限探测星等随焦距和口径的变化

Fig.2 Detectable star magnitude limit changes with focal length and diameter at sea level

当口径超过 60 mm 时, 继续增大口径对于探测能力的增强效果非常有限, 同时还会使得光学系统的体积、质量和加工难度都大大增加, 所以海平面工作的星体跟踪式星敏感器的口径选择 60 mm。当口径固定为 60 mm, 改变滤光片的截止波长, 不同焦距对应的极限探测星等如图 3 所示。

可以看出, 系统的极限探测星等会随着截止波长的增大先略微增大, 超过 $1.65 \mu\text{m}$ 后急剧降低。滤光片的截止波长增大会使得进入探测器的背景光和信号光都减少, 探测能力是否增强取决于两种光强减少的相对幅度大小。对于不同的焦距, 探测波段变化的影响略有差异, 焦距越长对应的最优截止波长越短。总体来说, 探测起始波长介于 $1.45 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 之间时, 系统探测能力相对较强且变化不大, 因此以海平面工作的星体跟踪式星敏感器可选择 $1.45 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 的长波通滤光片。

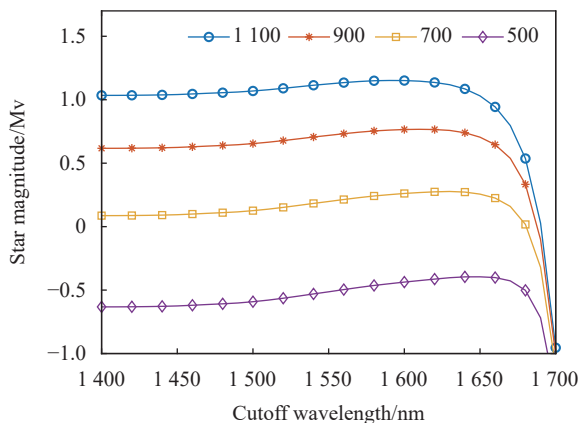


图 3 海平面截止波长优化

Fig.3 Cutoff wavelength optimization at sea level

对于海平面星光探测,当口径固定为 60 mm,滤光片截止波长选择 1.45~1.6 μm 之间的最优值,可以得到不同焦距对应的极限探测星等和导航星总数如图 4 所示。

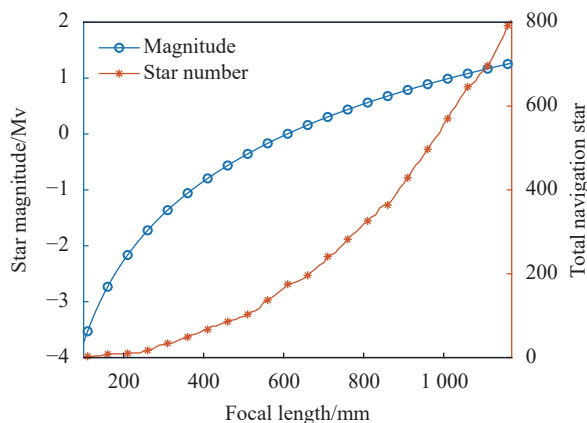


图 4 海平面探测能力评估

Fig.4 Detection capability estimation at sea level

可以看出,在口径固定的条件下,极限探测星等和全天球导航星数量都随着焦距的增大而增大,但极限探测星等的增长速度越来越慢,相反全天球导航星数量的增速却越来越快。这是由于星等小的亮星数量很少,随着极限探测星等的增大,会有大量的暗星能够被探测到,星等阈值的小幅提高都会使得导航星数量急剧增加。海平面星光探测对于焦距的优化,可以根据极限探测星等的要求选定最终的数值,对应的全天球导航星数也随之确定(见图 4)。

2.2 模式转换临界海拔参数优化

根据 2.1 节中的海平面星光探测仿真结果,焦距

不大于 1174 mm,口径取优化值 60 mm,不同探测器天顶角对应的视场内平均导航星数如图 5 所示。由于视场内平均导航星数由全天球导航星总数和视场大小共同决定,焦距增大可以提高极限探测星等,从而提高全天球导航星总数,另一方面长焦光学系统的视场又会减小。当光学系统的焦距不断增大,如果全天球导航星总数的增大占主导因素,则视场内平均导航星数随之增大;如果视场的减小占主导因素,视场内平均导航星数随之减小。从图 5 可以看出曲线出现波动,视场内平均导航星数和焦距不是完全正相关,但总体上还是呈递增趋势。当探测器指向与太阳夹角达到 60° 时,视场内平均导航星数仍然远远小于 $1^{[18]}$,因此全天时星敏感器在海平面的应用只能选择星体跟踪模式。

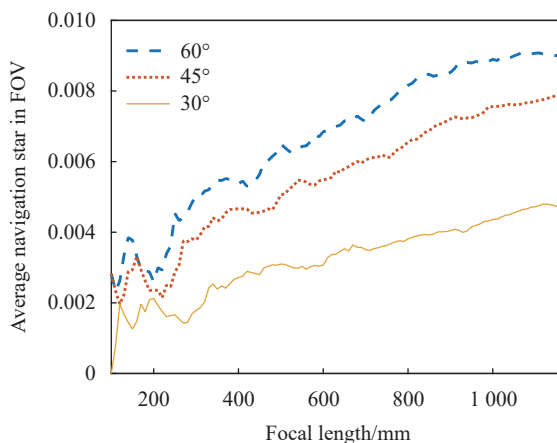


图 5 海平面视场内平均导航星数

Fig.5 Average number of navigation stars in FOV (field of view) at sea level

对于不同海拔高度,均以正午探测器和太阳夹角 30° 的 MODTRAN 仿真结果为参考,对光学系统参数进行优化。同时,气压的改变会对星敏感器光学系统的性能产生一定影响,在具体的光学镜头设计过程中再予以修正^[19]。由于视场内平均导航星数随焦距变化的关系不明确,但增大口径可提高极限探测星等,对于导航星数起正向作用,所以考虑不同焦距条件下的最佳探测能力,即口径取最大值 200 mm(超过 200 mm 镜头加工难度非常大)。改变焦距大小,不同海拔高度对应的视场内平均导航星数如图 6(a) 所示。随着海拔从 0 升高到 30 km,天空背景辐射急剧

减小,使用相同的光学系统参数可以探测到更暗的恒星,所以视场内平均导航星数不断增大。当光学系统的口径分别为 50、100、150、200 mm,不同海拔高度对应视场内平均导航星数存在最大值,如图 6(b)所示。当视场内平均导航星数达到 3 时(虚线标注),星图匹配式星敏感器可以正常工作,从图 6(b)可以看出,全天时星敏感器从星体跟踪式转换为星图匹配式的临界海拔高度约为 20 km。

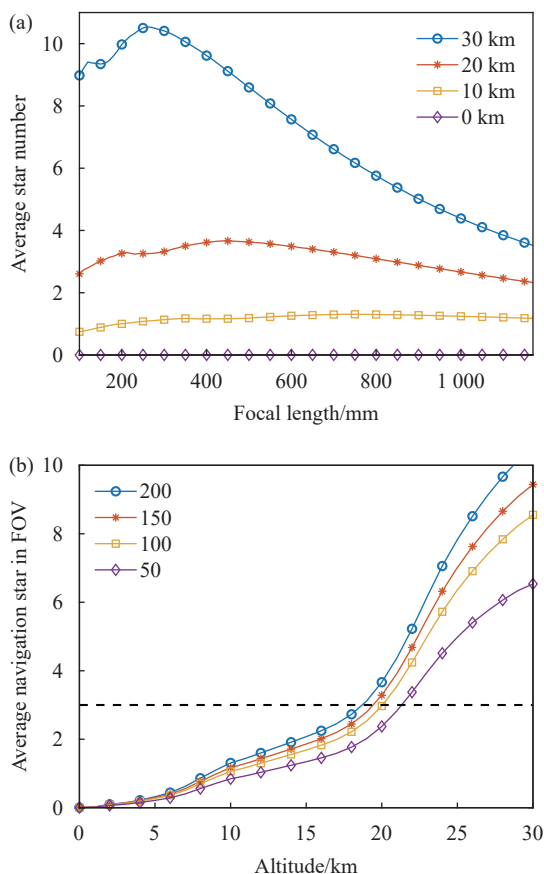


图 6 (a) 口径固定 200 mm、不同焦距对应的视场内平均导航星数;
(b) 不同海拔、最优焦距对应的视场内平均导航星数

Fig.6 (a) Average number of navigation stars in FOV with fixed diameter of 200 mm and changing focal length; (b) Average number of navigation stars in FOV with optimal focal length at different altitudes

下面针对海拔 20 km 的应用平台,对星图匹配式星敏感器的光学系统参数进行具体的优化。由于视场内平均导航星数随着焦距先增大后减小(见图 6),因此在优化的过程中改变焦距,得到不同口径对应的视场内平均导航星数如图 7 所示。

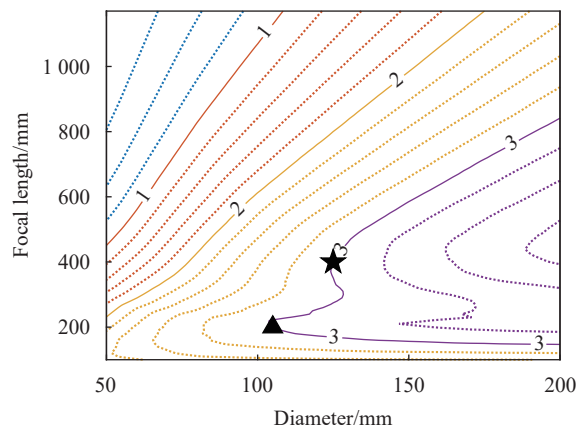


图 7 海拔 20 km 视场内平均导航星数随焦距和口径的变化

Fig.7 Average number of navigation stars in FOV changes with focal length and diameter at 20 km

图 7 中两条等高线之间的距离为 0.2,可以看出参数优化的范围在导航星数大于 3 的区域中,即带有标记 3 的等高线的右侧。为了使光学系统的体积和质量尽可能小,应当尽量选择较小的口径。能满足视场内平均导航星数的最小口径在三角形标识处,该点的口径为 105 mm,焦距为 200 mm,对应的 F 数为 1.9;继续增大焦距,星形标识的口径和焦距分别为 125 mm 和 400 mm,此时的 F 数为 3.2。第一组设计参数具有更小的口径和焦距,有利于系统小型化,因此该组参数为 20 km 海拔的最终优化结果。

最后,对滤光片的截止波长进行调整,依据图 7 选取三组不同的焦距/口径(在焦距改变时,选择满足条件的最小口径),对应的视场内平均导航星数如图 8 所示。

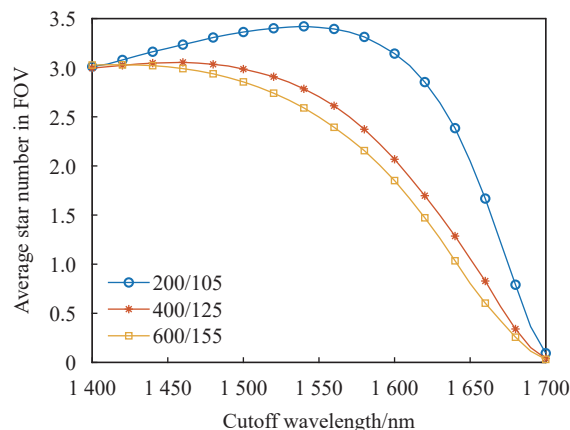


图 8 海拔 20 km 截止波长优化

Fig.8 Cutoff wavelength optimization at an altitude of 20 km

当截止波长介于 $1.4\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 之间时,系统探测能力相对较强,当滤光片截止波长大于 $1.55\ \mu\text{m}$,截止波长的增大会降低视场内平均导航星数。这是由于海拔 $20\ \text{km}$ 处的天空背景辐射较弱,探测波段变窄后星光信号强度降低的幅度更大,这种现象对于长焦系统更为明显。对于口径和焦距分别为 $105\ \text{mm}$ 和 $200\ \text{mm}$ 的光学系统,最优截止波长为 $1.54\ \mu\text{m}$ 。

3 白昼恒星观测实验

为了验证光学系统参数优化模型的有效性,并测试全天时星敏感器的白昼星光探测能力,搭建试验系统在近地面开展外场观星实验。实验系统由星敏感器、双轴转台和惯性测量器件(IMU)组成,如图 9 所示。星敏感器和 IMU 固定安装在转台上,通过 IMU 测角信息为转台提供的指令,控制星敏感器光轴指向已知的导航星。



图 9 星体跟踪式星敏感器实验系统

Fig.9 Experimental system of star sensor with tracking mode

星敏感器使用 PhotonFocus 公司生产的 MV3-D640I-M01-G2 型短波红外相机来采集星图,该相机采用 Sofradir 公司的 InGaAs 短波红外传感器,其各项参数与仿真一致(见表 1);实验系统的光学部分采用长焦卡塞格林镜头搭配遮光罩,光学系统的主要参数如表 2 所示。

表 2 实验系统光学参数

Tab.2 Optical parameters of the experimental system

Parameter	Value
Aperture/mm	60
Focal length/mm	515
Filter/ μm	1.48 (high pass)
Baffle/ $^{\circ}$	15 (suppress)

根据海平面仿真优化结果,系统的口径选择 $60\ \text{mm}$,考虑到转台精度不高,焦距选择了较小值 $500\ \text{mm}$,经过前期标定得到镜头实际的有效焦距为 $515\ \text{mm}$ 。长波通滤光片的截止波长为 $1.48\ \mu\text{m}$,符合仿真优化结果。同时,加装一个杂散光抑制角 15° 的遮光罩^[20],可有效避免太阳直射导致图像饱和。

实验于 2023 年 10 月 1 日上午开展,地点在湖南省长沙市(海拔 $69\ \text{m}$,经度 112.99° ,纬度 28.22°),曝光时间设置为 $5\ \text{ms}$ 。首先筛选出当前天球中的亮星作为导航星,转动转台使星敏感器光轴指向某颗导航星,使星点位于视场中央区域,然后保持转台停止转动,红外相机连续拍摄 200 帧图像。依次跟踪 8 颗恒星,所观测恒星的星等和赤经赤纬见表 3,采集星图的时间为 $9:40-10:10$ 。

表 3 白昼观测恒星的信息

Tab.3 Information of observed stars during daytime

Magnitude	Right ascension/ $^{\circ}$	Declination/ $^{\circ}$
-1.608	95.74	22.51
-1.573	79.17	45.99
-1.515	93.72	22.51
-0.609	83.05	18.59
-0.602	89.98	45.94
-0.28	57.37	80.32
-0.179	94.48	61.52
-0.09	99.14	38.45

图 10(a) 所示为非均匀校正后的红外星图,视场内的导航星对应 H 波段 -1.608 等,拍摄于上午 $9:45$,对图像进行星点提取并用方框标识出星点区域,该区域的灰度值如图 10(b) 所示。相对于背景噪声,星点在图像中非常明显,可以保证星点提取时具有很高的提取率。

对 8 组红外星图分别进行非均匀校正和星点提取,并且计算图像的灰度值信噪比均值,结果如图 11 所示。同时通过拟合可以得到不同星等的导航星对应的信噪比。当信噪比探测阈值取 5 ,该系统能够探测到最暗的恒星约为 -0.1 星等。

根据 2.1 节的仿真结果,口径 $60\ \text{mm}$ 、焦距 $515\ \text{mm}$ 的光学系统在海平面工作的极限探测星等约为 -0.5 ,实验探测到的 -0.1 星等接近预测值。实验结果验证

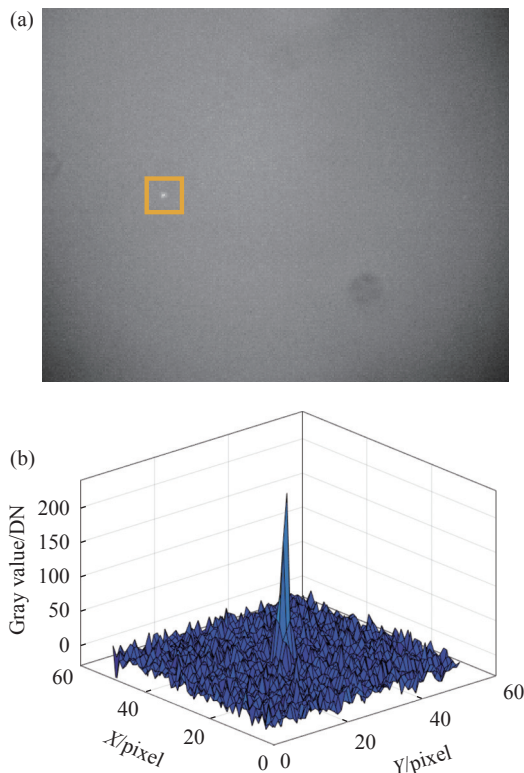


图 10 (a) 非均匀校正后的白昼红外星图 (星等-1.608, 上午 9:45); (b) 框选的点区域灰度值

Fig.10 (a) Infrared star image taken at daytime after non-uniformity calibration (magnitude -1.608, 9:45 a.m.); (b) Gray values of the boxed star area

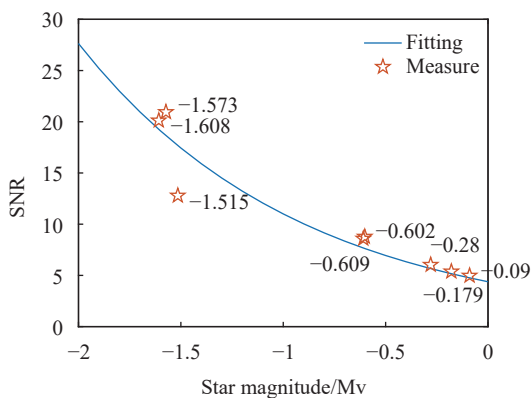


图 11 不同星等的星图信噪比

Fig.11 Signal to noise ratio of star images for different magnitudes

了文中提出的光学系统参数优化理论,同时也说明了该系统在近地面具备白昼星光探测能力,可以用于全天时星敏感器的近地面观测。

实验得到的极限探测星等与仿真稍有差别,主要原因是大气模型存在误差,MODTRAN 仿真结果无法

完全还原当前的背景辐射和大气透过率。此外,跟踪不同导航星时探测器和太阳之间的夹角也发生变化,但是光学参数仿真优化的结果仍然对实际光学系统的设计具有很高的参考价值。

4 结 论

文中基于星图灰度信息的信噪比模型,计算不同条件下的极限探测星等,从而指导全天时星敏感器光学系统参数设计。对于星敏感器的星体跟踪和星图匹配两种导航模式分别提出相应的优化方案,并给出了具体的优化步骤。通过仿真分析,得到海平面参数优化结果:口径 60 mm、焦距根据极限探测星等要求选定、长波通滤光片的截止波长 1.45~1.6 μm ;海拔 20 km 参数优化结果:口径 125 mm、焦距 400 mm、长波通滤光片的截止波长 1.4~1.55 μm 。此外,确定了全天时星敏感器星体跟踪/星图匹配模式转换的临界海拔约为 20 km。最后,搭建了星敏感器实物系统并进行地面观星实验,实验样机口径 60 mm、焦距 515 mm、截止波长 1.48 μm ,可以在上午 10:00 左右探测到 H 波段-0.1 星等,具备了白昼星光探测能力。实验结果验证了仿真优化结果的有效性,说明文中提出的参数优化理论对实际光学系统的设计具有很高的参考价值。

参考文献:

- [1] REN Pingchuan, ZHOU Qi, JIN He, et al. Evaluation method of star sensor dynamic accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(3): 20210571. (in Chinese)
- [2] WANG W J, WEI X, LI J, et al. Guide star catalog generation for short-wave infrared (SWIR) all-time star sensor [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(7): 075003.
- [3] WU Zhouping. Star image signal-to-noise ratio enhancement technology and star centroid estimation for daytime star tracker[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018: 14-21. (in Chinese)
- [4] ZHANG Qianchneg, ZHONG Sheng, LYU Jingsong, et al. Optical system design of all-time star sensor with large field-of-view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(3): 20220583. (in Chinese)
- [5] DU Weifeng, WANG Yanqing, ZHENG Xunjiang, et al. Design and verification of stray light suppression for star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0623001. (in Chinese)
- [6] FAN Qiaoyun, LI Xiaojuan. Selection of optical system

- parameters for an all-day used star sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1122001. (in Chinese)
- [7] PAN Yue, WANG Hu, JING Nan, et al. Parameter selection and optical design of all-day star sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(1): 0122002. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] WANG Wenjie, ZHANG Guangjun, WEI Xinguo. Modeling analysis and experimental verification for all-time star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1113001. (in Chinese)
- [10] GOU Wanxiang, TONG Shuai, JIA Jingyu, et al. Optimal design and experimental verification of optical response band of all-time star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(11): 20230221. (in Chinese)
- [11] YU Chunlei, LI Xue, YANG Bo, et al. Noise characteristics analysis of short wave infrared InGaAs focal plane arrays [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 85(9): 74-80.
- [12] HARDING E S. Astronomical magnitudes flux density at 0 m [EB/OL]. (1999-03-01) [2024-05-31]. <https://cass.ucsd.edu/archive/physics/ph162/mags.html>.
- [13] ZHANG Tao, LI Xinyang, LI Jianfeng, et al. sCMOS real-time nonuniformity correction based on adaptive multipoint method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2021, 48(5): 83-90. (in Chinese)
- [14] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers - a tutorial [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.
- [15] ROGALSKI A. Next decade in infrared detectors [C]//Conference on Electro-optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV, 2017.
- [16] European Machine Vision Association. EMVA1288 R3.1 Standard for characterization of image sensors and cameras [S]. Europe: EMVA, 2016.
- [17] HUANG Yicheng. Research on key technology of fiber optic gyro strapdown inertial navigation. [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020: 10-12. (in Chinese)
- [18] SUN Baicheng, GUO Jie, XU Fangyu, et al. Performance test method of InGaAs near infrared detector for astronomical observation [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(6): 1002-1008. (in Chinese)
- [19] LI Guozhang, JIANG Wentao, REN Guoquan, et al. Influence of temperature and air pressure on imaging quality of vehicle-mounted optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1113-1118. (in Chinese)
- [20] SHI Yijun, XU Ziqi. Optical system design of star sensor and stray light suppression technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 20210015. (in Chinese)

Optical parameter optimization of star sensor for daytime star detection at different altitudes

NI Yuanman¹, DAI Dongkai^{2,3*}, WANG Xingshu^{2,3}, ZHOU Zhaofa¹

(1. Laboratory of Intelligent Control, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract:

Objective The detectable star magnitude limit, the number of navigation stars in the field of view, the size and weight of the optical system, and etc. are important indicators of optical detection system for all-time star sensor. And the improvement of these indicators is often contradictory and restrictive, which leads to the lack of clear optimization objectives for the parameter design of the optical system. In order to improve the comprehensive performance of the all-time star sensor, the parameter optimization of the optical system is studied in this paper.

Methods According to the response characteristics of the short-wave infrared detector, a signal to noise ratio model based on image gray-scale information is established. Based on this model, a parameter optimization

scheme of the optical system for the star sensor is proposed aiming at two different navigation modes of tracking and strapdown. The optimization goal of tracking mode is the number of navigation stars in the celestial sphere. The maximum focal length is firstly determined according to the control accuracy of optical axis direction. Then, detectable star magnitude limit with different focal length and diameter is calculated (Fig.2) using the sky background radiation obtained by MODTRAN (Fig.1). A relatively small diameter is chosen to balance the detection ability and the optical system size. After slightly adjusting the cut-off wavelength of the detection band (Fig.3), the focal length is finally determined according to the requirements for detection capability (Fig.4). If the average number of navigation stars in FOV (field of view) is less than 3 for any focal length and diameter, only tracking mode can work (Fig.5). Otherwise, strapdown mode is selected for certain working altitude (Fig.6), and the average number of navigation stars in FOV is the optimization goal. Its change with focal length and diameter is calculated. An appropriate focal length and a relatively smaller diameter are determined when the number of navigation stars meets the requirements and its mean value is greater than 3 (Fig.7). The cut-off wavelength of the detection band is slightly adjusted to improve the average navigation star number in FOV (Fig.8).

Results and Discussions The parameters of InGaAs sensor from Sofradir are selected as typical values for simulation, based on which the optical system parameters of the sea-level tracking mode and the high-altitude strapdown mode are designed respectively. Working at sea level, the optimal aperture for daytime star detection is 60 mm, and the cut-off wavelength is between 1.45 μm and 1.6 μm . The focal length is selected according to the requirements of the detectable star magnitude limit. While the optimization results for 20 km is aperture of 125 mm, focal length of 400 mm, and cut-off wavelength between 1.4 μm and 1.5 μm . Besides, the corresponding conversion altitude of the all-time star sensor between tracking and strapdown navigation mode is around 20 km.

Conclusions The prototype system (Fig.9) has a diameter of 60 mm, a focal length of 515 mm, and a cut-off wavelength of 1.48 μm , which is used to carry out daytime star tracking experiments on the ground. Stars brighter than H-band -0.1 magnitude (Fig.10-11) can be detected around 10:00 am at Hunan, Changsha (altitude of 69 m), which shows that the system has the capability of daytime star detection near the ground. The experiment verifies the validity of the simulation results, indicating that the parameter optimization theory proposed in this paper has high reference value for the optical system design of all-time star sensor.

Key words: star sensor; daytime star detection; optical parameter optimization; short-wave infrared; noise model

Funding projects: Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2020JJ4668)