

机载全天时星敏感器参数设计及实验

任秉文^{1,2,3}, 金光^{1,3}, 王天聪^{1,3}, 钟兴^{1,3}, 张鹏⁴

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033;
4. 长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了提供机载全天时星敏感器参数设计方法, 从光电探测信噪比公式出发, 结合 Modtran 软件中天空亮度数据, 推导了适用于星体目标探测的信噪比计算公式, 并以探测 3.5 等、4 等、4.5 等星为例, 重点研究了通光口径、系统 F 数、曝光时间与探测信噪比之间的变化规律, 并给出机载全天时星敏感器相应参数的设计方法。为验证设计方法的正确性, 设计了地面原理实验, 选择以北极星(视星等 2.02 等)为探测目标, 设计了通光口径 83 mm、焦距 1 500 mm 的全天时星敏感器原理样机, 通过地面观测实验, 在天空辐射最强时刻对北极星的探测信噪比为 6.84 dB, 满足理论计算的 6 dB 指标需求, 验证了设计方法的正确性。

关键词: 星光导航; 星敏感器; 信噪比; 参数设计

中图分类号: TH74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-1003-08

Parameter design and test of airborne all-day star sensor

Ren Bingwen^{1,2,3}, Jin Guang^{1,3}, Wang Tiancong^{1,3}, Zhong Xing^{1,3}, Zhang Peng⁴

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun 130033, China;
4. Space Photoelectric Technology Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to provide parameters design method of airborne all-day star sensor, in this paper, the SNR (Signal to Noise Ratio) computation formula for star targets detection was derived according to the SNR formula of optical-electric detection system and sky radiance data from Modtran software. The relation between detection SNR and diameter, F number, exposure time was researched for the stars of visual magnitude of 3.5, 4, 4.5, and the corresponding parameters design method of airborne all-day star sensor was given. In order to verify the correctness of the design method, the ground-based observation test was carried out. Polaris (Mv2.02) was selected as target, and the all-day star sensor prototype with 83 mm diameter, 1 500 mm focal length was designed. Through the ground-based observation test, at the most powerful sky radiation moment the SNR for detection Polaris was 6.84 dB, met the minimum detection requirements 6 dB from the theoretical calculation. The correctness of the design method is verified.

Key words: celestial navigation system; star sensor; signal to noise ratio; parameters design

收稿日期: 2012-09-01; 修订日期: 2012-10-03

基金项目: 国家自然科学基金(40905011)

作者简介: 任秉文(1987-), 男, 博士生, 主要从事空间光学系统设计方面的研究。Email: rrbw@yahoo.cn

导师简介: 金光(1958-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间遥感相机光机设计方面的研究。Email: jing@ciomp.ac.cn

0 引言

随着现代导航技术的不断发展, 机载导航系统发展出了全球定位系统(GPS), 惯性导航系统(INS), 天文导航系统(CNS)等多种导航系统, 其中天文导航系统具有自主性强、隐蔽性好、精度高等优点, 可与惯性导航系统及全球定位系统组合定位, 形成优势互补, 特别适用于长航时、远程飞行器自动导航^[1]。

天文导航系统的核心部件是可全天时工作的星敏感器, 其最大的困难之一是要克服白天天空背景的强烈辐射, 将星点目标和天空背景分割。国外对全天时星敏感器研究开展的较早^[2-4], 其中美国诺格公司研制的星光导航用星敏感器能够在白天观测到 3.5 等星。国内对白天探测星体目标的研究起步较晚, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所开展了一系列白天观测恒星目标的实验研究^[5-8], 朱耆祥研究了白天在地面用大口径望远镜对观测恒星目标的探测的可行性^[9], 魏合理等人分析了白天用 CCD 观测恒星可探测的极限星等^[10], 樊巧云等人研究了全天时星敏感器可探测星等与轨道高度、观测角度、工作光谱等的关系^[11], 钟兴等人对机载导航白天星敏感器的探测性能做了初步的理论分析及实验研究^[12], 但国内目前仍缺少对全天时星敏感器设计方法的研究, 特别是机载应用的全天时星敏感器系统参数设计方法。

文中从理论上推导全天时星敏感器探测信噪比公式, 分析探测信噪比和系统参数的关系, 给出机载应用的全天时星敏感器参数设计方法, 并设计研制了地面原理样机, 通过地面测试实验验证设计方法正确性。

1 全天时星敏感器探测原理

使用 CCD 在白天探测恒星目标的难点是从强背景辐射的天空图像中提取出星点像, 根据光电探测系统原理, 白天星体探测信噪比计算公式为:

$$\text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{B_0 + N^2}} \quad (1)$$

式中: S 为 CCD 接收到的光电子数; B_0 为 CCD 接收的天空背景辐射引起的散粒噪声; N 为系统暗电流噪声、转移噪声等其他噪声的总和。

1.1 星点目标在 CCD 像面处产生的光电子数 S 计算

参考文献[8]中给出了星点目标在 CCD 像面处的光电子数为:

$$S = \phi_s \cdot \pi \cdot r^2 \cdot f_s \cdot \text{QE} \cdot \tau \cdot T \quad (2)$$

式中: ϕ_s 为星点辐射光子通量(光子通量为光通量的量子化, 单位: 光子数/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$); r 为入瞳半径; f_s 为对目标光谱透过率系数; QE 为 CCD 量子效率; τ 为光学系统透过率; T 为 CCD 曝光时间。

为更准确的计算星点目标在像面处产生的光电子数, 针对公式(2)做出以下几点改进:

(1) 实际观测中不同星等及不同光谱类型的恒星辐射光子通量有着很大差异, 最终在像面处产生的光电子数也不同。根据恒星的星等 M_v 和色温 t 可以得到恒星光子通量函数 $\varphi(M_v, t, \lambda)$, 具体推导过程如下^[13-14]。

恒星辐射分布可以用普朗克黑体辐射定律来描述, 表示为:

$$B(\lambda, t) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{k\lambda t}\right) - 1 \right]} \quad (3)$$

式中: h 为普朗克常量; c 为光速; k 为玻尔兹曼常数; t 为色温, λ 为波长。

黑体辐射定律只能描述恒星辐射的相对光谱分布, 并不是绝对光谱, 只与恒星色温有关。必须对其进行标定, 即将相对光谱分布乘以一个系数, 得到星等为 M_v 的恒星的绝对光谱, 标定系数计算方法为:

$$k(M_v) = \frac{F_0(2.512)^{-M_v}}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B(\lambda, t) d\lambda} \quad (4)$$

式中: F_0 为大气层外的零等星辐射出射度 $F_0 = 1.387 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$; 积分限 λ_1 、 λ_2 一般采用 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 。

根据公式(3)及公式(4)可计算出任意星等 M_v , 色温为 t 的恒星目标辐射光子通量, 记作函数 $\varphi(M_v, t, \lambda)$, 表示为:

$$\varphi(M_v, t, \lambda) = \frac{B(\lambda, t) \cdot k(M_v)}{h \cdot c / \lambda} \quad (5)$$

式中: h 为普朗克常量; c 为光速; t 为恒星目标的色温; M_v 为视星等; λ 为波长。

(2) 星体目标的辐射能量在到达光学系统前受到大气环境衰减, 不同的观测环境下大气衰减程度不同。通过 Modtran 软件仿真计算可得到不同观测

位置海拔高度 H , 不同观测高度角 μ_1 时对不同波长 λ 的大气透过率, 记作 $\tau'(H, \lambda, \mu_1)$ 。

(3) 在设计全天时星敏感器时, 将星点能量集中在一个像元上时, 探测信噪比最高, 但会产生抖动漂移等问题引起检测困难, 而将星点能量分布在较多像元上时会导致星点弥散过大单个像元上能量较低而被背景信号淹没, 通常设计时要保证星点像占据 2×2 个像元以上。为计算单个像元上的光子能量, 引入星点像弥散因子 η 表示单个像元占整个星点能量的比例, 当星点像分布在 2×2 个像元上时, 可认为能量均匀分布在 4 个像元上, 此时星点像弥散因子 $\eta=0.25$ 。

综合以上几点, 将恒星目标光子通量函数 $\varphi(Mv, t, \lambda)$ 代入公式(2)代替 ϕ_s , 将大气透过率函数 $\tau'(H, \lambda, \mu_1)$ 及星点像弥散因子 η 代入公式(2), 考虑到光学系统透过率和量子效率是工作谱段的函数, 将公式(2)中量子效率 QE 以及光学系统透过率 τ 改为对工作波长的函数 $QE(\lambda)$ 以及 $\tau(\lambda)$, 然后对工作光谱范围进行积分得到修改后的星点目标在 CCD 像面处产生的光电子数计算表达式为:

$$S = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(Mv, t, \lambda) \cdot f_s \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \eta \cdot QE(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau'(H, \lambda, \mu_1) \cdot T \cdot d\lambda \quad (6)$$

式中: λ_1 为工作光谱下限; λ_2 为工作光谱上限。

1.2 天空背景辐射在 CCD 像面处产生的光电子数 B_b 计算

参考文献[8]中给出的天空背景辐射在 CCD 像

面处产生的光电子数为:

$$B_b = \phi_b \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \alpha \cdot f_b \cdot \tau \cdot QE \cdot T \quad (7)$$

式中: ϕ_b 为背景辐射光子通量(光子数/($m^2 \cdot s \cdot sr$)); f_b 为对背景光谱透过率系数; α 为单位像元立体角, 可由下式计算 $\alpha = \sigma/f^2$ 其中 σ 为 CCD 单个像元面积, f 为光学系统焦距。

对于实际天空背景, 不同的观测环境, 天空背景辐射强度差别很大, 通过 Modtran 软件仿真分析可得到不同观测海拔高度 H 、不同观测位置与太阳方位夹角 θ 、不同观测高度角 μ_1 、不同太阳高度角 μ_2 时的天空背景辐射通量, 对其进行量子化计算, 得到天空背景辐射光子通量, 记作 $\psi(H, \lambda, \theta, \mu_1, \mu_2)$ 。

将天空背景辐射光子通量函数 $\psi(H, \lambda, \theta, \mu_1, \mu_2)$ 代入公式(7)代替 ϕ_b , 同样用 $QE(\lambda)$ 以及 $\tau(\lambda)$ 代替 QE 以及 τ 并对工作光谱范围进行积分, 得到修改后的 CCD 像面处天空背景辐射光电子数计算表达式为:

$$B_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(H, \lambda, \theta, \mu_1, \mu_2) \cdot f_b \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\sigma}{f^2} \tau(\lambda) \cdot QE(\lambda) \cdot T \cdot d\lambda \quad (8)$$

式中: λ_1 为工作光谱下限; λ_2 为工作光谱上限。

1.3 全天时星敏感器探测信噪比 SNR 计算

由于白天天空背景辐射产生的散粒噪声较强, 远大于暗电流噪声和转移噪声, 如果不考虑系统噪声的影响, 将公式(8)以及公式(6)代入公式(1)可得改进后的系统极限探测信噪比表达式:

$$SNR = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(Mv, t, \lambda) \cdot f_s \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \eta \cdot QE(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot \tau'(H, \lambda, \mu_1) \cdot T \cdot d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(H, \lambda, \theta, \mu_1, \mu_2) \cdot f_b \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \frac{\sigma}{f^2} \tau(\lambda) \cdot QE(\lambda) \cdot T \cdot d\lambda}} \quad (9)$$

为方便研究光学系统参数和探测信噪比的关系, 将公式(9)进行整理, 并引入光学系统 F 数进行评价, 光学系统 F 数是相对孔径的倒数即 $F=f/D$, 当通光孔径 D 固定时, F 数可等价用来评价光学系统

焦距 f 对探测信噪比的影响。此外, F 数能够表明光学系统的整体设计加工难度^[15], 引入 F 数来进行分析可避免出现无法设计加工的系统参数组合。化简后的表达式为:

$$SNR = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varphi(Mv, t, \lambda) \cdot QE(\lambda) \cdot \tau'(H, \lambda, \mu_1) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}{\sqrt{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(H, \lambda, \theta, \mu_1, \mu_2) \cdot QE(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot d\lambda}} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f_s \cdot T}{f_b \cdot \sigma}} \cdot \eta \cdot \frac{D^2}{2} \cdot F \quad (10)$$

式中: D 为光学系统的通光孔径; F 为光学系统 F 数。

可以看出,全天时星敏传感器探测信噪比与星敏传感器的工作环境、导航星目标特性及其工作光谱范围有着较复杂的关系,探测信噪比与系统参数中的通光口径、系统 F 数及曝光时间成正比例关系。针对全天时星敏传感器的机载应用环境,利用公式(10)重点研究通光口径、系统 F 数及曝光时间 3 个系统参数的设计方法。

2 系统参数与探测信噪比关系分析及参数设计方法

为分析全天时星敏传感器系统参数选择对探测信噪比影响,针对机载星敏传感器的实际应用,天空背景辐射强度分布如图 1(a)所示,图 1(b)为假定环境下的大气光谱透过率分布图。假定了使用环境:工作海拔高度 $H=10\text{ km}$,观测位置与太阳方位夹角 $\theta=90^\circ$,观测高度角 $\mu_1=45^\circ$,太阳高度角 $\mu_2=60^\circ$ 。固定参数包括目标光谱透过率 f_s, f_b 为 1, CCD 单个像元尺寸为 $13\ \mu\text{m}\times 13\ \mu\text{m}$,在 $0.35\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 谱段内的平均量子效率 $QE=0.3$,星点像弥散因子 $\eta=0.25$ 。通过 Modtran 软

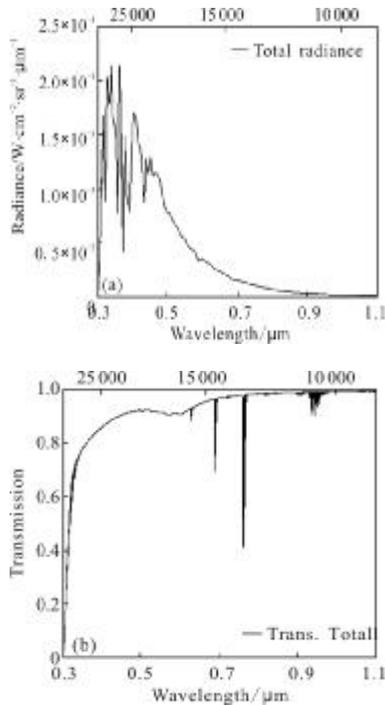


图 1 高空海拔高度 10 km 处天空背景辐射强度及大气光谱透过率分布图

Fig.1 Distribution of sky background radiance and distribution of atmosphere spectral transmission at 10 km altitude

件仿真计算可得到 $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 谱段内天空背景辐射光子通量为 7.15×10^{18} 光子数/ $(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{sr})$,在 $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 谱段内大气光谱透过率均值为 $\tau=0.9232$ 。

由光电探测理论可知,当要求探测概率为 95% 时,目标的信噪比 SNR 应大于或等于 6 dB,才可以保证图像处理系统的可靠提取^[9]。

根据星等统计数据,全天恒星 M,K,G 三种光谱占 90% 以上,其中视星等 3 等星以上有 171 颗,4 星等以上有 513 颗,可满足导航搜星的需求。

下面以探测 G0 类恒星为例分析不同光学系统参数条件下,探测视星等为 3.5 等星、4 等星、4.5 等星的信噪比。

(1) 信噪比与通光口径的关系

通光口径直接影响进入光学系统的光子数,通光口径越大,能够探测到的极限星等越高。分析中假定星敏传感器光学系统 F 数为 10, CCD 曝光时间为 20 ms 通过公式(10)计算得到不同通光口径对 3.5 等星、4 等星、4.5 等星的探测信噪比如图 2 所示,可见在通光口径 50~100 mm 范围内,与探测信噪比基本成线性正比例关系,在 10 km 高度天空背景辐射下,探测到 4.5 等星所需的通光口径至少为 95 mm,而探测到 3.5 等星所需的通光口径至少为 60 mm。

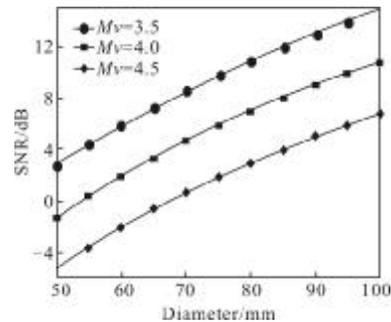


图 2 通光口径与探测信噪比的关系

Fig.2 Relationship between diameter and SNR

(2) 信噪比与 F 数的关系

图 3 为光学系统 F 数和探测信噪比的关系,分析中设定光学系统通光口径为 80 mm, CCD 曝光时间为 20 ms,从图中可以看出当通光口径和 CCD 曝光时间固定时,增大系统 F 数能够增加系统探测信噪比,对于通光口径为 80 mm 的光学系统,探测 3.5 等星需要的 F 数为 5.6,探测 4.5 等星需要的 F 数为 14,可见探测较低星等的恒星目标需要更大的系统 F 数。

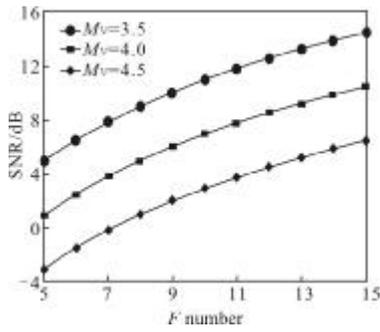


图 3 系统 F 数与探测信噪比的关系

Fig.3 Relationship between F number and SNR

(3) 与 CCD 曝光时间的关系

图 4 是通光口径为 80 mm, 系统 F 数为 10 时, 不同 CCD 曝光时间条件下, 对视星等为 3.5 等、4 等、4.5 等星的探测信噪比, 可以看出对不同星等星体目标曝光时间的变化引起探测信噪比的变化走势一致, 且成正比例关系, 对星等较低的恒星目标需要更长的曝光时间, 而随着曝光时间的增大对信噪比的影响逐渐变小。

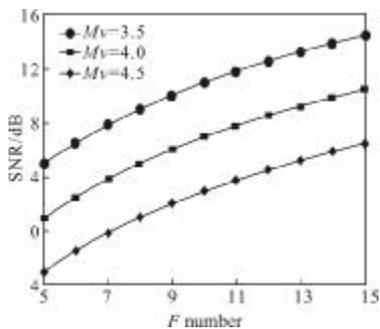


图 4 CCD 曝光时间与探测信噪比的关系

Fig.4 Relationship between CCD exposure time and SNR

从上述探测信噪比与系统参数关系的分析可以看出, 在满足探测阈值 6dB 的条件下, 相比于探测 4.5 等星, 探测 3.5 等星所需的系统参数均较小, 增大系统的通光口径、F 数和 CCD 曝光时间能够有效提升系统的探测信噪比。

在对机载应用的全天时星敏感器参数进行选取时, 依据公式(10), 系统 3 个可变参数通光口径、系统 F 数、CCD 曝光时间与探测信噪比构成一个 4 维数组, 在满足探测信噪比阈值条件下, 存在一个关于通光口径、系统 F 数、CCD 曝光时间的三维解空间。在对 3 个系统参数进行优化选取时, 需同时考虑探测性能及机载应用的轻小型化。因此对于通光口径、

系统 F 数、CCD 曝光时间的选取应当权衡考虑, 例如, 根据已有的设计经验, 增大系统的通光孔径将直接增大系统的总体质量; 增大光学系统的 F 数也会增大光学系统设计难度; 而对于机载平台, 由于存在飞行运动及平台振动的影响, 增大 CCD 曝光时间将可能引起像点的弥散导致定位精度降低。

综上, 可以给出机载全天时星敏感器参数设计方法, 具体步骤如图 5 所示。

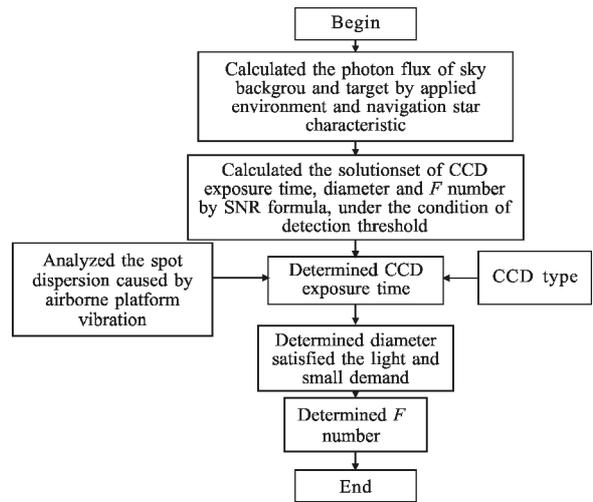


图 5 系统参数设计流程图

Fig.5 Flow chart for system parameters design

(1) 首先由工作环境参数及导航星目标特性参数, 通过 Modtran 软件及公式(5)分析计算出天空背景辐射光子通量及恒星目标辐射光子通量。

(2) 将得到的背景辐射光子通量以及星点辐射光子通量带入探测信噪比计算公式, 根据公式(10)可计算得到满足信噪比阈值时, 关于系统参数通光口径、系统 F 数、CCD 曝光时间的解集。

(3) 结合选用的 CCD 具体型号的曝光时间范围及机载平台振动引起的像斑弥散程度限制确定 CCD 曝光时间。

(4) 在确定曝光时间后, 可得到关于通光孔径以及系统 F 数的满足探测信噪比的二维解集, 在其中取通光孔径的最小值以满足机载轻小型应用的需求。

(5) 最后根据系统设计及加工难度的需求确定系统 F 数。

3 原理样机系统设计

为了验证参数设计方法的正确性, 进行原理验

证实实验是十分必要的。最符合测试要求的方法是设计针对机载测试的原理样机,而机载测试需要特殊的机载测试平台且测试成本高昂,在地面进行测试实现容易且成本较低,并能够有效测试设计方法的正确性,文中即采用地面测试的方法,依据公式(10)计算地面测试原理样机的系统参数。

3.1 地面测试环境分析

为了给出原理样机设计参数,依据前文归纳的参数设计方法,首先针对探测环境利用 Modtran 软件进行计算分析,通过仿真计算可得在地面海拔高度 $H=250\text{ m}$,观测位置与太阳方位夹角 $\theta=175^\circ$,观测高度角 $\mu_1=45^\circ$,太阳高度角 $\mu_2=60^\circ$ 时, $0.4\sim 1.1\ \mu\text{m}$ 波段内天空背景辐射光子通量为 3.13×10^{19} 光子数/ $\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{sr}$,大气光谱透过率均值 $\tau=0.6809$ 。图 6(a)为仿真得到的天空背景辐射分布图,图 6(b)为大气透过率分布图。

和图 1 对比可见,相对于高空环境,地面测试时天空背景辐射要更加强烈,大气透过率较低。

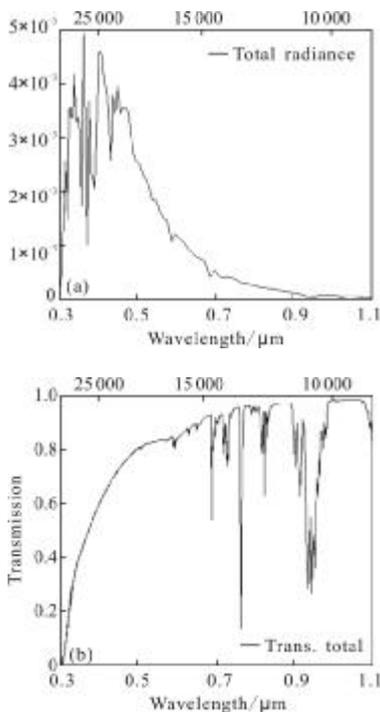


图 6 地面海拔高度 250 m 处天空背景辐射强度及大气光谱透过率分布图

Fig.6 Distribution of sky background radiance and Distribution of atmosphere spectral transmission at 250 m altitude

针对地面观测时天空背景辐射较大,且同时要

满足地面测试需求的情况,选择以北极星为观测目标设计原理样机,北极星视星等为 2.02 等,全天方位角变化较小,满足轻小型观测设备的测试需求且方便追踪探测。

3.2 系统参数设计及结果

根据分析得到的地面测试环境信息及所使用的 CCD 相机参数,利用公式(10)计算了满足探测信噪比大于 6 dB 的系统参数,并根据计算结果设计了相应的星敏器原理样机。星敏器系统参数设计指标和设计结果见表 1。

表 1 原理样机参数设计指标及设计结果

Tab.1 Design requirements and results of prototype

Parameter	Design specifications	Design results
Diameter/mm	>78	83
Focal length/mm	>1 300	1 500
CCD exposure time/ms	≥ 8	8

根据分析得到的星敏器系统设计参数,该系统为焦距较长的大 F 数系统,若采用折射式光学系统将大大增加整个系统的重量,且二级光谱校正也非常困难,而该系统对视场角要求不大,根据已有的设计经验,可采用折反式光学系统,图 7 为所设计的系统外形结构图。

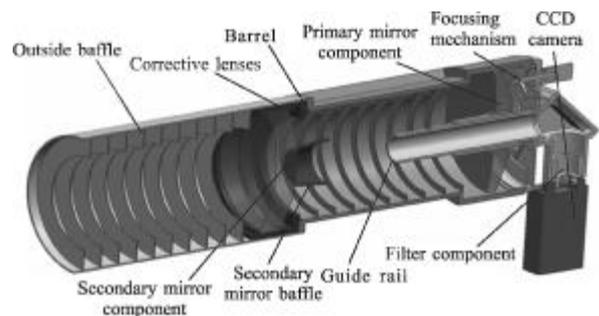


图 7 全天时星敏器原理样机外形结构

Fig.7 Shape structure of all-day star sensor prototype

根据上述分析,文中实验所设计的原理样机采用了技术成熟度较高的马科斯托夫-卡塞格林式折反结构设计,考虑仿真结果和实际测试环境的差异,适当增大了设计参数,并在反射镜后加入折叠镜减小了系统筒长,满足机载小型化应用,同时针对该系统设计了消杂光结构^[16],设计结果整机质量小于 5 kg,

筒长小于 400 mm。

4 原理样机实验

利用设计的全天时星敏感器原理样机开展了地面观测实验。实验当天天气晴朗,全天太阳最高时刻为 11:50,实验持续时间从 9 点至 15 点,该时段为全天空背景辐射较大时段,在该时间段测试即能满足全白天测试要求,实验现场如图 8 所示。

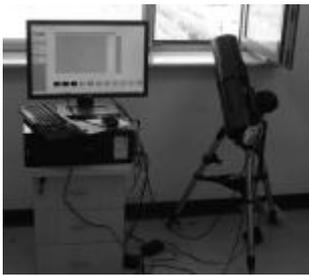


图 8 地面观测实验现场图

Fig.8 Scene of ground-based observation experiment

实验硬件系统包括:全天时星敏感器原理样机;日本 orient 公司生产的 ORT-8318CCD 相机;美国星特朗公司生产的手控电动云台;MATROX Meteor II Standard 图像采集卡及计算机。图 9 中,图(a)~(f)为实验中拍摄的北极星图片。

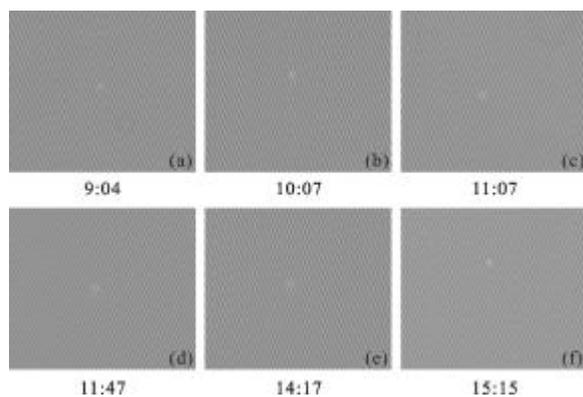


图 9 不同时刻星点图像

Fig.9 Star images at different time

从图中可以看出 9 点至 15 点之间,星点目标均能识别,满足设计要求的全天探测需求。

表 2 为不同时刻对北极星观测拍摄图片的信噪比,可见所设计的全天时星敏感器在中午天空背景辐射强度最大时刻对北极星的探测信噪比为 6.84 dB,达到了理论计算中的 6 dB 设计指标要求,验证了设

计方法的正确性。

表 2 不同观测时间探测信噪比

Tab.2 SNR at different observation time

Observation time	9:04	9:41	10:07	10:48	11:07	11:47	14:17	15:15
SNR/dB	8.34	8.29	7.72	8.06	6.84	7.72	7.72	10.5

5 结论

根据原理样机实验结果可知,所设计的全天时星敏感器原理样机在全天空背景辐射最强时刻对星体目标探测信噪比达到 6.84 dB,达到理论计算的 6 dB 指标要求,验证了提供的全天时星敏感器参数设计方法的正确性。该设计方法可为机载全天时星敏感器设计提供参考。

通过文中给出的星点目标探测信噪比公式及参数设计方法,下一步将设计应用于机载环境的轻小型全天时星敏感器并开展相关测试实验。

参考文献:

- [1] Liu Lei, Zhang Lu, Zheng Xin, et al. Current situation and development trends of star sensor technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 529-533. (in Chinese)
刘磊,张路,郑辛,余凯,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(S): 529-533.
- [2] Duncan T M. A daylight stellar sensor using a charge-coupled device[C]//SPIE, 1111: 1-14.
- [3] Dietz K L, Ramsey B D, et al. Daytime aspect camera for balloon altitudes [J]. *Opt Eng*, 2002, 41(10): 2641-2651.
- [4] Sandven S C, Browne S L, et al. Tip-tilt gracker for image stabilization in a daylight speckle imaging system [C]//SPIE, 2468: 246-251.
- [5] Shen Xiangheng, Li Qingjun, Wang Jianjun. Measuring star with video interpretation in daytime[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 189-191. (in Chinese)
沈湘衡,李清军,王建军.利用视频判读进行白天测星方法的研究[J].*光学精密工程*, 2000, 8(2): 189-191.
- [6] Feng 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): 1009-1014. (in Chinese)
冯小勇,朱明,向治强.白天恒星暗小目标电视实时探测

- [J]. 光学学报, 2010, 30(4): 1009-1014.
- [7] Zhang Shuangtong, Li Qingjun, Shen Xiangheng, Method of measuring star at sea in daytime [J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(3): 261-264. (in Chinese)
张双同, 李清军, 沈湘衡. 提高海上白天测星能力的方法研究[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 261-264.
- [8] Wang Weiguo. Research of space object detecting under bright background[D]. Beijing: Doctor Degree Dissertation of Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)
王伟国. 空间目标白天光电探测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2005.
- [9] Zhu Qixiang. Detection of celestial objects by CCD camera in the daytime and the related experiments [J]. Opto-Electronic Engineering, 1995, 22(6): 1-10. (in Chinese)
朱耆祥. 白天用 CCD 摄像机对天体目标的探测及实验[J]. 光电工程, 1995, 22(6): 1-10.
- [10] 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. (in Chinese)
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.
- [11] Fan Qiaoyun, Li Xiaojuan. Selection of optical-system parameters for an all-day used star sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 11-17. (in Chinese)
樊巧云, 李小娟. 全天时星敏传感器光学系统设计参数选择[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 11-17.
- [12] Zhong Xing, Jia Jiqiang, Jin Guang, et al. Research on airborne navigation daytime star sensor detecting performance and its experiment [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(12): 2900-2906. (in Chinese)
钟兴, 贾继强, 金光, 等. 机载导航白天星敏传感器探测性能及实验研究[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(12): 2900-2906.
- [13] 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. (in Chinese)
陈秀红, 魏合理, 余凯, 等. 星敏传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.
- [14] Zhang Chen, Shen Xubang, Chen Chaoyang. Calculation stellar detection limit for active pixel sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(1): 66-69. (in Chinese)
张晨, 沈绪榜, 陈朝阳. 有源像素传感器恒星探测极限计算方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 66-69.
- [15] Huang Xin. Determination for optic system parameters of star sensor[J]. Aerospace Control, 2000, 1: 44-50. (in Chinese)
黄欣. 星敏传感器光学系统参数的确定[J]. 航天控制, 2000, 1: 44-50.
- [16] Zhong Xing, Zhang Lei, Jin Guang. Stray light removing of reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(8): 316-318. (in Chinese)
钟兴, 张雷, 金光. 反射光学系统杂散光的消除 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(8): 316-318.