

基于SiP技术的单片集成数字式太阳敏感器

吴迪^{1,2}, 陈纾^{1,2}, 陈龙江^{1,2}, 叶志龙^{1,2}, 郑循江^{1,2}

(1. 上海市空间智能控制技术重点实验室, 上海 201109; 2. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109)

摘要: 设计了一种新型的数字式太阳敏感器。采用SiP (System in Package) 设计, 将滤光片直接安装于探测器上。此设计减小了数字式太阳敏感器的体积与质量, 可提高其可靠性。所设计的数字式太阳敏感器可用于深空探测卫星系统的太阳捕获和太阳定向, 同时, 也可作为星上其他光电敏感器的监护仪器, 防止其他光学敏感器被强光损坏。最后, 完成了原理样机的研制与标定, 并在外场进行了太阳光斑的拍图测试。实验表明所提出方法可行, 可满足火星探测、深空探测的使用需求。

关键词: SiP; 片上系统; 数字式太阳敏感器

中图分类号: V488.21

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2018)01-0085-05

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2018.01.012

引用格式: 吴迪, 陈纾, 陈龙江, 等. 基于SiP技术的单片集成数字式太阳敏感器[J]. 深空探测学报, 2018, 5(1): 85-89.

Reference format: WU D, CHEN S, CHEN L J, et al. On chip digital Sun sensor based on sip technology[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(1): 85-89.

0 引言

随着深空探测技术的发展, 火星探测已成为21世纪深空探测的重要内容之一。光电敏感器如星敏感器、太阳敏感器是航天器必备测量传感器。传感器的质量、性能对整个任务的顺利完成至关重要。

数字式太阳敏感器可为空间飞行器在给定视场内进行太阳有无判断, 也可用来为其它光学敏感器(如星敏感器、紫外敏感器、红外地球敏感器等)的视场提供监护。此外, 它还能用于太阳望远镜一类的有效载荷与太阳帆板的精确定向控制, 星敏感器与红外地平仪太阳入射光线的保护控制, 产生开关和时标信号, 确定空间飞行器在自旋过程中的相位基准, 测定飞行器的自旋转速和角度等姿态数据, 确保深空探测任务的安全。

为了满足航天器使用要求, 需提高卫星平台关键测量单机的性能。我国目前卫星研制电子元器件依赖于国外进口的一般等级的军级产品达不到整个系统的长寿命、高可靠的要求。单片数字式太阳敏感器采用多芯片系统封装集成SiP技术。SiP技术可以实现对系统已有芯片进行封装集成, 通过叠层的封装, 改变了传统基于印制板的电路设计模式, 使系统更紧凑、性能更好。通过这种技术可以设计出国产的SiP单片集成数字式太阳敏感器, 极大地提高系统的可靠性, 减少

成本。在航天器上可以比较大规模地使用SiP单片集成数字式太阳敏感器, 改变现有的航天器姿态的测量模式, 使航天器具有高可靠性、高精度、高速、高机动的性能, 从而在空间环境中具有极好的适应性和生存能力。

1 技术指标

- 1) 视场: $64^\circ \pm 2^\circ$ (圆锥形视场);
- 2) 精度: $60''$ (3σ);
- 3) 功耗: ≤ 1 W;
- 4) 重量: ≤ 0.15 kg;
- 5) 数据更新率: ≥ 30 Hz;
- 6) 供电: 4.75~2.25 V
- 7) 数据输出接口: RS422 LVDS
- 8) 设计寿命: 8~15年 (MEO/HEO轨道);
- 9) 工作温度: $-30 \sim 60$ °C;
- 10) 在轨存储温度: $-30 \sim 60$ °C。

2 组成与工作原理

2.1 组成

图1为SiP单片集成数字式太阳敏感器的组成示意图。该产品有外壳体、SoC处理芯片、信号处理板、定制APS探测器^[1-5]、温度传感器、基准棱镜、RS422及LVDS接口组成。

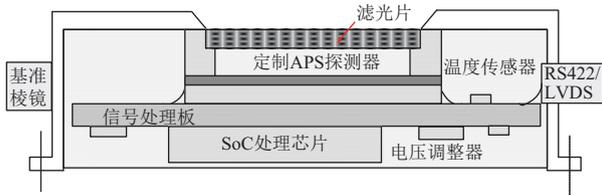


图1 SiP单片集成数字式太阳传感器的组成
Fig. 1 Components of the SiP digital sun sensor

1) 光学系统

通过小孔成像原理(如图2),将太阳光线矢量成像在SiP单片集成数字式太阳传感器APS探测器光敏面上。

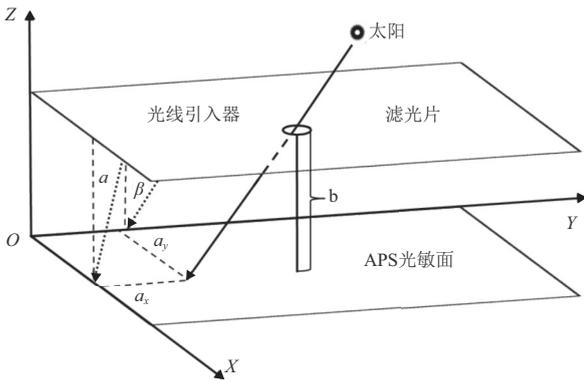


图2 小孔成像原理
Fig. 2 The pinhole imaging principle

2) 结构组件

采用一体化结构设计,支撑光学系统及电路板、处理芯片的骨架,结构主要分为壳体以及底盖部分。

3) 电子学模块

电子学模块主要用来完成图像采集,信息处理和对外接口电路等功能。

4) 软件模块

配合电子学模块,将探测器通过光电转换,转换为数字量,传给SoC处理芯片,SoC处理芯片通过其软件将光斑计算出相应的灰度质心,并把质心坐标通过RS422或者LVDS接口传出数字式太阳传感器,供姿轨控分系统使用。

2.2 工作原理

SiP单片集成数字式太阳传感器工作原理,如图3、图4所示。太阳光线矢量通过滤光片在探测器上进行成像,成像后通过探测器电路进行光电转换,将光信号转换为电信号,提供给SoC处理芯片。SoC处理芯片将图像进行分析,求出光斑的灰度质心坐标。光斑灰度质心坐标输出至上级系统。

上级系统可通过RS422对SiP单片集成数字式太阳传感器进行曝光时间及曝光阈值的控制。可通过LVDS接口将太阳光斑进行拍摄并下传。

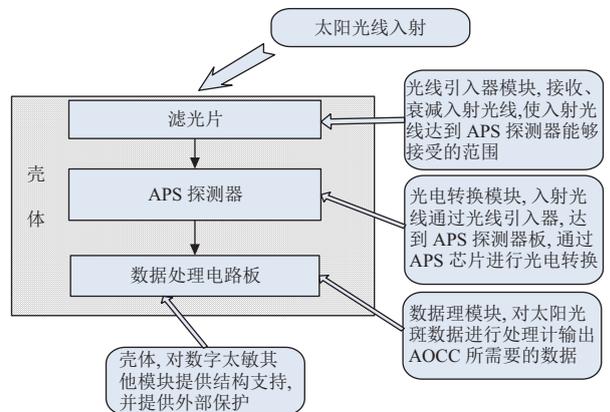


图3 SiP单片集成数字式太阳传感器原理框图
Fig. 3 Principle chart of SiP digital Sun sensors

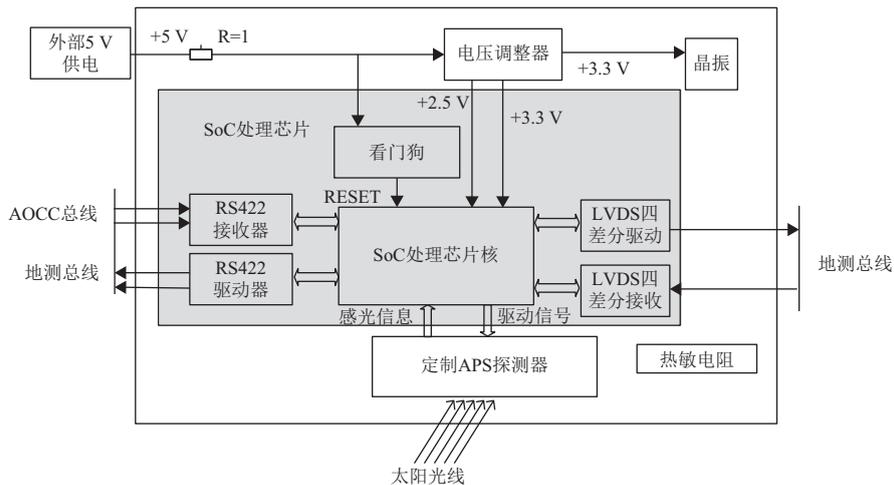


图4 信号数据流图

Fig. 4 Signal & data stream chart

3 光学系统设计

1) 视场的确定

基于数字太阳敏感器的用途，其视场一般有两种，即矩形视场和圆形视场。验证样机的视场为圆形，视场范围为 $64^\circ \pm 2^\circ$ （圆锥形视场）。

2) 焦距的确定

由于验证样机所采用的光电探测器为类似于APS型通用CMOS APS探测器的定制APS探测器，由其性能参数可知，像元大小： $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ ，总像素数： 1024×1024 ，对应的有效芯片尺寸为 $15.3 \text{mm} \times 15.3 \text{mm}$ ，视场半高为 7.65mm 。

为保证整机的视场达到 $64^\circ \pm 2^\circ$ ，并使视场边缘不会出现渐晕，光线引入器的半视场角为 64° 。估算焦距近似为 $f = 1.73 \text{mm}$ ，经实际光线追迹仿真得到，半高为 7.65mm 时，整机光线引入器系统的焦距为 1.4mm ，此时整体视场为 132° ，半视场满足 66° 。

3) 滤光片

太阳传感器的工作原理是针对太阳光进行小孔成像，而由于太阳光强度太大，需进行滤光、衰减。

本项目验证样机所研制的滤波片，由蓝宝石基片、滤光层、阻光层3个叠层结构组成，中心为微型滤光孔，滤光层将高强度的太阳光衰减到满足定制探测器工作照度阈值要求的强度，微型滤光孔将光阑口径的光束，同比例、均匀地缩小为探测器成像及质心定位算法所需的光斑大小及像素个数，以提供探测器进行精确光电转换所需的微型均匀光斑，形成的滤光片方案如图5所示。

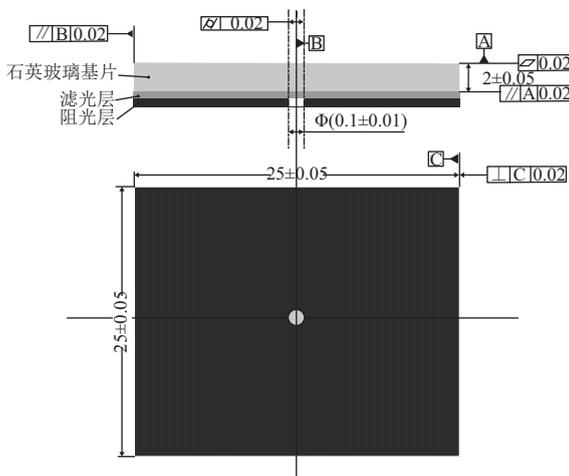


图5 滤光片设计方案

Fig. 5 Filter design paln concept

滤光片有滤光层和阻光层两个膜层，要求采用具有良好温度适应性和良好空间抗辐照性能的多层介质膜系；工作温度范围为 $-50 \sim +100^\circ\text{C}$ ，膜层结构形变 $< 5\%$ ，透过率变化 $< 1\%$ ；两个膜层中金属膜抗辐照性

能指标要求 $> 180 \text{Krad}(\text{Si})$ ；对两个膜层的光谱透过率有具体数值要求，在满足上述视场、工作温度及辐照指标要求下：

滤光层的光谱范围为： $400 \sim 1100 \text{nm}$ ，中心波长为 620nm ，透过率中心值和平均值为 $(2.5 \pm 0.01)\%$ （千分之二点五，定值），正入射和掠入射（ 65° 入射角）透过率相对差值 $< 10\%$ （百分之十），膜层厚度 $\leq 300 \text{nm}$ 。

阻光层的光谱范围： $200 \sim 1400 \text{nm}$ ，中心波长为 620nm ，透过率中心值和平均值 $\leq 1\%$ （小于等于千分之一），膜层厚度 $\leq 300 \text{nm}$ 。

阻光层有防反射要求：要求综合反射率小于 1% 。

滤光片实物如下图6所示。

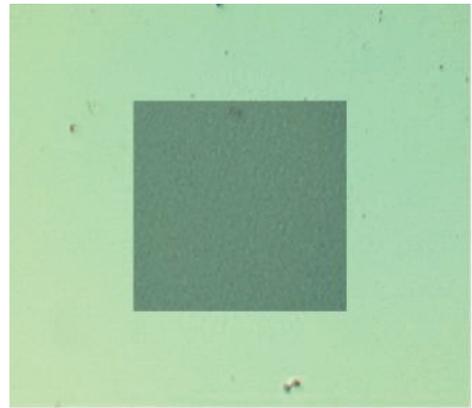


图6 滤光片实物

Fig. 6 Filters

采用光学设计软件进行光学分析，以 0.85 个太阳常数的 $400 \sim 1100 \text{nm}$ 入射光为目标光束，剩余反射率取 4% ，追迹光线数目为 40 万条，进行光线追迹模拟。分析的对象包括单孔视场光阑和单孔滤光片，在充分利用空间尺寸情况下设计出数太光电探头的成像系统模型，并对该光学成像系统进行光学仿真。

数字式太阳敏感器的滤光片的光学仿真效果如图7所示。

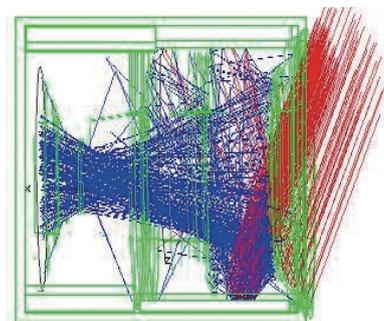


图7 数字太阳敏感滤光片光学仿真

Fig. 7 Optics simulation of the digital sensor filter

在光强为0.7个太阳常数、入射角为66.7°的杂散光入射时，其平均消光系数为 $0.057 < 0.1$ ，满足数字式太阳敏感器中软件算法的阈值要求，剩余反射率取1%~4%，追迹光线数目为50万条，进行光线追迹模拟。

可知该滤光片所设置的波段、透过率、材料所形成的太阳光斑能满足光强分布输入要求，且杂散光保护角可到66.7°（圆锥），满足视场为64°圆锥视场的要求。

4 电子学设计

如图8所示，SiP单片集成数字式太阳敏感器设计了SoC芯片+定制APS探测器的架构。其中，SoC芯片作为主处理器，完成对APS探测器的驱动、信息处理、太阳光斑灰度质心计算、接口控制。SoC芯片为定制生产的SoC803A芯片。

1) SOC的设计指标

- (1) 工作电压：3.3 V，接口兼容5V
- (2) 工作温度：(-55~+125) °C
- (3) 功耗：< 0.5 W (40 MHZ)，< 1 W (100 MHZ)，< 100 μW (待机)
- (4) 重量：< 10 g
- (5) TID：300 Krad (Si)
- (6) SEL：120 MeVcm/mg；SEU < 1E-6/d
- (7) 封装：军用陶瓷封装
- (8) 工艺：军用0.25 μm
- (9) 标准：GJB2438-95、GJB597A-96

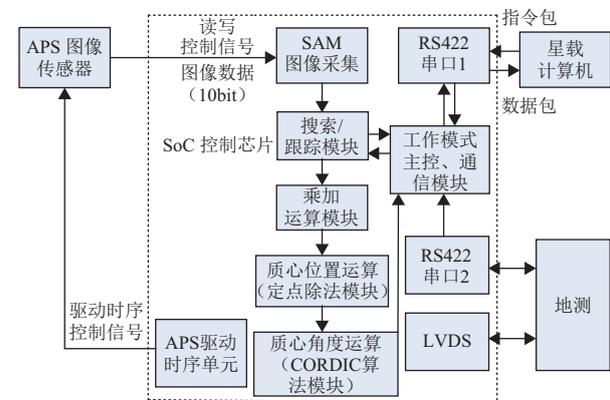


图8 SiP单片集成数字式太阳敏感器电子学框图
Fig. 8 Electronic chart of SiP digital sun sensor

2) 定制APS探测器

结合滤光片、精密构型陶瓷管座、陶瓷台阶，以高精度、高可靠的精密装调技术，形成如图9所示的定制APS探测器。

5 样机研制情况

如图11所示，完成了SiP单片集成数字式太阳敏感

器的研制。经过初步标定测试，拍图测试分析，各项技术指标均可达到要求。

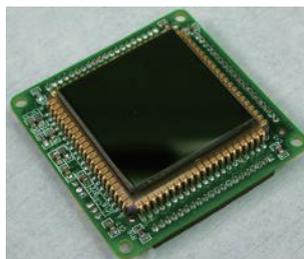


图9 带滤光片的SiP单片集成数字式太阳敏感器探测器实物图
Fig. 9 SiP digital sun sensor with filter



图10 SiP单片集成数字式太阳敏感器
Fig. 10 SiP digital Sun sensor

如图11所示的采点方式，对整个探测器幅面进行标定采点，计算该产品的焦距及主点。

对滤光片的安装及膜层进行外场测试，如图12所示。由图12可看出整个滤光片膜层均匀可靠，滤光片安装没有出现透光缝隙，满足使用要求。图12(a)是全幅

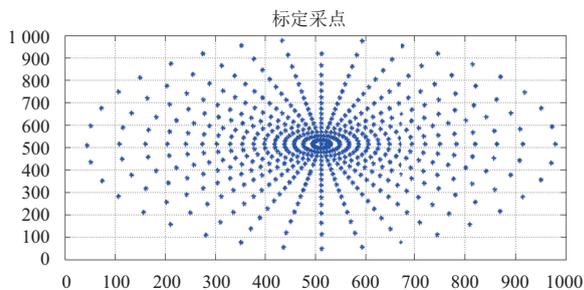


图11 SiP单片集成数字式太阳敏感器标定数据图
Fig. 11 Calibration chart of SiP digital Sun sensor



(a) 全幅面拍摄结果 (b) 小孔成像光斑

图12 外场实际太阳拍摄图像
Fig. 12 Sun image

面的拍摄结果，可知整个幅面除小孔以外均是黑暗的，满足设计要求。图 12 (b) 是左图放大的小孔成像光斑。

6 结 论

本文主要设计了一种SiP单片集成数字式太阳敏感器，并介绍了该产品的原理、滤光片的设计及电子学的设计方法，完成了原理样机的研制。对整机进行标定、测试并在外场进行太阳光斑的拍图测试。实验表明所提出方法可行，可满足火星探测、深空探测的使用需求。

参 考 文 献

- [1] GIANCARLO R, MICHELE G. Multi-Aperture CMOS Sun sensor for microsatellite attitude[J]. Determination, sensors, 2009(94): 503-4524.
- [2] BOOM C M, LEIJTENS J A, Duivenbode L M, Heiden Micro Digital

Sun Sensor: System in a Package, MEMS, NANO and Smart Systems[C]//ICMENS 2004. Proceedings. 2004 International Conference. Banff, Alta, Canada: [s.n.], 2004.

- [3] XIE N, THEUWISSEN A. A miniaturized Micro-Digital Sun sensor by means of Low-Power Low-Noise CMOS imager[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(1): 96-103.
- [4] ELACHI C. The Critical role of communications and navigation technologies to the success of space science enterprise missions[C]//Keynote Address Descanso International Symposium. America: [s.n.]: 1999.
- [5] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 185-207

作者简介:

吴迪(1984-), 男, 工程师, 主要研究方向: 空间光电敏感器设计。

通信地址: 上海市闵行区中春路1555号(201109)

电话: (021)24183211

E-mail: cooldinwd@qq.com

On Chip Digital Sun Sensor Based on SiP Technology

WU Di^{1,2}, CHEN Shu^{1,2}, CHEN Longjiang^{1,2}, YE Zhilong^{1,2}, ZHENG Xunjiang^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of Aerospace Intelligent Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: A new type of digital sun sensor is introduced which is designed by SiP technology. Filters are installed on the image sensors. By using the proposed design, the mass and volume of the sun sensors, are decreased, while the reliability is increased. In deep space, the digital sun sensor captures solar position and protects the other optics sensor from sunshine. Calibration has been done and sun spot is captured by the experimental prototype.

Key words: SiP technology; on chip system; digital Sun sensor

High lights:

- Using SiP technology on digital sun sensor.
- High reliable SiP digital sun sensor.
- Calibration has been done for the experimental prototype.
- Small, light and low power consumption digital sun sensors.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]