

# 低成本高精度数字太阳敏感器

李保权<sup>1,2</sup> 桑 鹏<sup>1</sup> 曹 阳<sup>1</sup> 刘亚宁<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要:** 太阳敏感器是航天器姿态测量的关键设备之一。随着微纳卫星技术的发展以及巨星座建设需要,对太阳敏感器的资源需求、技术指标以及价格成本要求越来越严苛。中国科学院国家空间科学中心利用新的技术途径开发完成了 MEMS 数字太阳敏感器、纳型数字太阳敏感器和微型亚角秒数字太阳敏感器等 3 款产品,这些太阳敏感器在多颗卫星上获得成功应用,具有测量精度高、姿态更新率快、成本低的优势,可以满足不同类型的卫星对太阳敏感器的需求。

**关键词:** MEMS 数字太阳敏感器; 纳型数字太阳敏感器; 亚角秒数字太阳敏感器; 四象限探测器

目前基于空间应用的互联网、物联网、视频通信等新概念、新技术正逐渐走进人们视野,卫星应用正逐渐渗透到社会经济活动的各个领域,成为人类应对全球性问题、发展新兴产业不可或缺的手段。2020年我国也将基于卫星组网建设的信息基础设施纳入“新基建”的范畴。实现高密度组网严重依赖体积小、成本低、功能强的微小卫星技术,太阳敏感器是微纳卫星姿态测量的关键部件之一,目前市场上适合于微纳卫星应用的产品相对匮乏,基于 CCD、APS 等传统技术的数字太阳敏感器都存在价格偏高、体积偏大等制约因素,限制其在微纳卫星上大规模应用。

中国科学院国家空间科学中心的研究团队采用了不同于传统的 APS 和 CCD 成像方式,选用抗辐照能力强、功耗低、体积小、可靠性高的四象限探测器,通过强度关联实现太阳光角度测量。基于四象限探测器研制出了 MEMS 数字太阳敏感器、纳型数字太阳敏感器和微型亚角秒数字太阳敏感器等三款产品,实现了数字太阳敏感器的高精度和低成本。其基本工作原理是如图 1 所示。

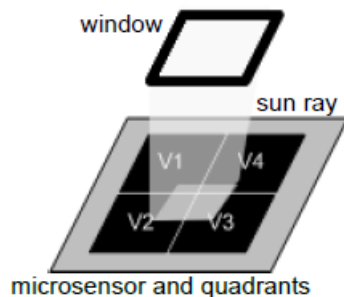


图1 太阳敏感器工作原理

当太阳光的投影入射到四象限探测器上时,4个象限根据接收的太阳光能量不同,输出不同电流信号。如果太阳光矢量垂直于探测器,光斑就会处于四象限的中心,在4个象限上产生同样的电信号。如果太阳投影以一定的倾斜角度投射到探测器上时,4个象限会输出不同强度的电信号,通过专有算法从探测器4路信号强度的差异反推出太阳光斑质心相对于四象限原点的位置偏移量,进而精确得到太阳光的入射角度。基于该原理,并发展了基于四象限探测器能量矩阵数据处理算法、全自动无人值守标定技术,以及高对称性的装配技术等,研制完成的纳型数字太阳敏感器具有精度高、资源需求少、姿态更新率高、成本低等优势,并且创新性采用矢量方向与强度符合法,使得太阳敏感器具有识别地球反照光和月球反照光干扰的能力。以下重点介绍3款数字太阳敏感器的性能特点和应用情况。

## 1 MEMS 数字太阳敏感器

MEMS 数字太阳敏感器主要针对微纳卫星的应用需求研制,具有视场大、精度高、重量轻等优点,技术指标处于国际领先水平。该太阳敏感器具有良好的抗辐照能力,可以满足各种轨道应用。主要性能指标如表 1,外形结构如图 2 所示。

“中科院创新十六号卫星”卫星上的安装了两台 MEMS 数字太阳敏感器,在轨一年多的运行中没有出现任何异常或者故障,为卫星提供了稳定可靠的姿态测量,也没有发现空间辐射造成的性能衰减,显示了其良好的抗辐照能力。图 3 展示了在 2022 年 8 月 27 日和 2022 年 12 月 23 日的测量数据。MEMS 数字太阳敏感器也在其他多颗商业航天卫星上进行过飞行验证。

表1 MEMS数字太阳传感器主要技术指标

视场( $^{\circ}$ )	130 $\times$ 130
本体尺寸(mm)	42 $\times$ 13 $\times$ 7
重量(g)	6.3
姿态更新率(Hz)	90 (直接输出 $\alpha$ 、 $\beta$ 角)
测量精度( $^{\circ}$ )	$\leq 0.02$ ( $1\sigma$ , 全视场)
测量准确度( $^{\circ}$ )	$\leq 0.06$
电源(V)	+3.3
功耗(mW)	35
工作温度( $^{\circ}\text{C}$ )	-40~+85
抗辐照(krad)	30
通信接口	RS422(可扩展 CAN、SPI 等)

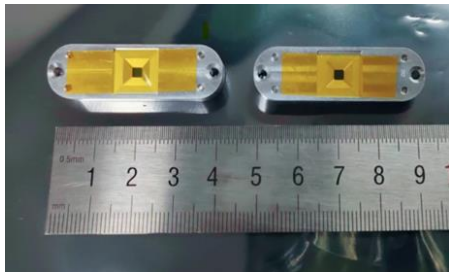


图2 交付验收的两台MEMS数字太阳传感器

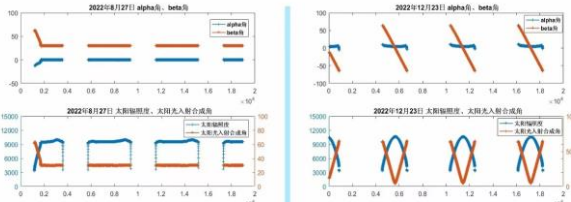


图3 MEMS数字太阳传感器在轨实测数据

## 2 纳型数字太阳传感器

纳型数字太阳传感器相比MEMS数字太阳传感器重量和体积上有一定的增加，主要是在电源的抗干扰性上进行加强，另外也增加了军品级的标准9芯接插件，使用和安装更方便。其性能指标见表2，结构外形如图4所示。另外该太阳传感器增加主动温控的能力，低温工作环境可以达到-90 $^{\circ}\text{C}$ 。该纳型数字太阳传感器在多颗商业航天卫星和中科院“鸿鹄”探空气球上成功应用。

## 3 微型亚角秒数字太阳传感器

随着空间太阳成像仪器分辨率地不断提高，单纯依靠卫星平台的稳定性难以实现高分辨的观测需

表2 纳型数字太阳传感器主要技术指标

视场( $^{\circ}$ )	130 $\times$ 130
本体尺寸(mm)	50 $\times$ 35 $\times$ 13
重量(g)	48
姿态更新率(Hz)	90 (直接输出 $\alpha$ 、 $\beta$ 角)
测量精度( $^{\circ}$ )	$\leq 0.05$ ( $1\sigma$ , 全视场)
电源(V)	+5
功耗(mW)	80
工作温度( $^{\circ}\text{C}$ )	-90~+85
抗辐照(krad)	30
通信接口	RS422(可扩展 CAN、SPI 等)

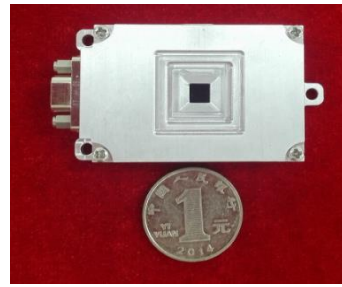


图4 纳型数字太阳传感器

求，先进的太阳观测仪器需要自身配备高性能图像稳定系统，如SOHO、TRACE、STEREO、SDO等太阳观测卫星上的绝大部分成像仪器都带有自稳像系统。稳像系统主要由两部分构成：亚角秒数字太阳传感器和偏摆镜，其中太阳传感器是实现稳像的核心，其性能直接影响稳像效果。微型亚角秒数字太阳传感器就是为了满足太阳观测高分辨成像仪器的稳像需求而研制的。

图5显示了微型亚角秒数字太阳传感器的原理示意图，主要包括初级滤光片、次级滤光片、聚焦透镜，以及四象限探测器。

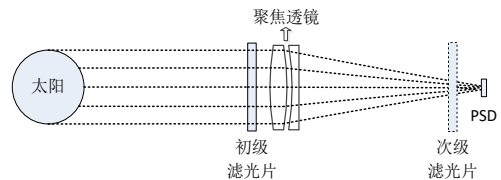


图5 亚角秒数字太阳传感器原理

初级滤光片采用金属中性滤光片，位于精太阳传感器的正前端，用于反射大部分太阳光热量，并衰减观测波段的入射光线能量，全谱段透过率为10%左右。次级滤光片采用窄带带通滤光片，安装在聚焦透镜的焦平面的正前方，对汇聚光线进行二次滤光。其中，心波长设计为780 nm。聚焦透镜采用双分离透镜，焦距设计约为100 mm。聚焦透镜安装在初级滤光片的后方，将初级滤光后的太阳光束汇聚到焦点位置上，四象限探测器安装在聚焦透镜的焦点位置上，用于将太阳光斑能量信号转变成电信号。

研制完成的微型亚角秒数字太阳传感器技术指标见表3，传感器外形如图6所示。



图6 微型亚角秒数字太阳传感器

表3 微型亚角秒数字太阳敏感器主要技术指标

视场(arcmin)	95
本体尺寸(mm)	160×60×40
重量(g)	150
姿态更新率(Hz)	550
测量精度(arcsec)	≤0.15
电源(V)	+5
功耗(mW)	153

微型亚角秒数字太阳敏感器相比目前空间应用的“基于四象限边缘传感器的稳像系统”和“基于CCD的相关跟踪器稳像系统”而言, 具有重量轻、体积小、功耗低、采样快、角分辨高等优点, 而且成本低、集成度高、结构简单。

#### 4 结 论

太阳敏感器是航天器姿态测量关键设备之一,

随着空间应用的快速增长, 不仅对太阳敏感器有更高的性能要求, 同时要求其价格相比传统的数字太阳敏感器要显著降低, 以适应巨星座或者商业航天的应用要求。论文中的MEMS数字太阳敏感器、纳型数字太阳敏感器具有视场大、分辨率高、资源需求少等特点, 需求量大的情况下单台价格可以降低到万元左右, 这些产品在多颗卫星上成功应用, 技术状态成熟。同时针对太阳观测卫星的稳像需求, 研制完成了亚角秒的微型数字太阳敏感器, 由于其高采样率和高精度, 除了满足稳像需求之外, 也可以为对日指向卫星提供高精度的姿态测量数据和指向稳定度评价。

### Low cost and high accuracy digital sun sensor

LI Baoquan<sup>1,2</sup> SANG Peng<sup>1</sup> CAO Yang<sup>1</sup> LIU Yaning<sup>1</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The sun sensor is one of the key devices for spacecraft attitude measurement. With the development of micro-nanosatellite technology and the need for constellation construction, the resource requirements, technical indicators, and cost considerations of sun sensors are becoming increasingly stringent. The National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences has developed three products, namely MEMS digital sun sensor, nano digital sun sensor, and micro-arcsecond digital sun sensor, using new technological approaches. These digital sun sensors have been successfully used on multiple satellites, with advantages of high measurement accuracy, fast attitude update rate, and low cost, meeting the diverse needs of different satellites for sun sensors.

**Key words:** MEMS digital sun sensor; Nano digital sun sensor; Sub-arcsec sun sensor; Quadrant detector