基于全站仪架构的低轨卫星观测系统设计

摘要：小型光学观测系统具有造价低、体积小、易于灵活部署等优点，是未来地基光学监测系统的重要发展方向之一。然而白昼条件下，大气背景光强，卫星信噪比较差，导致观测数据有效性不足。针对低轨卫星目标观测这一应用需求，探索小型光学系统针对性改进提升观测数据有效性，对促进低轨卫星监测发展具有重要意义。本文基于全站仪架构，采用了近红外成像和偏振探测的技术，设计了一款小型低轨卫星观测系统，该系统充分发挥全站仪测量精度高、自动化程度好等优势，有效提升了全站仪光学低轨目标探测能力，对开展小型低轨目标探测系统设计具有一定的价值意义。

关键词：低轨卫星； 全站仪； 近红外；偏振测量； 偏振度；偏振角
中图分类号 P2　**文献标志码** A

Design of Low Earth Orbit Satellite Observation System Based on Total Station Architecture

Abstract: The small-scale optical observation system offers significant advantages, including compact size, low cost, and high flexibility in deployment, making it a promising direction for the future development of ground-based optical monitoring systems. However, under daylight conditions, the intense atmospheric background light leads to a poor satellite signal-to-noise ratio (SNR), thereby compromising the validity of the observational data.To address these limitations in the context of low-orbit satellite observation, targeted enhancements to small-scale optical systems are essential to improve data quality and support more effective monitoring. This paper presents a novel small-scale low-orbit satellite observation system based on a total station architecture, integrating near-infrared imaging and polarization detection techniques. By leveraging the total station's high measurement accuracy and advanced automation capabilities, the proposed system significantly enhances the capability for optical detection of low-orbit targets. The design demonstrates practical value and provides a reference framework for the development of compact, high-performance low-orbit object observation systems.

key word: Low earth orbit satellite； Total station; Near infrared; Polarization measurement; Polarization degree; Polarization angle

引言

低轨卫星因其数据传输速率高、时延短、成本较低等优势，逐渐成为“太空军事化”竞争的焦点[1]。近年来，随着商业航天的加入，以“鸿雁”、“星链”、 “一网”为代表的低轨互联网星座更是出现井喷式发展[2,3]，预计到 2029 年全球近地轨道部署的卫星可达 5.7 万颗[4]。数以万计的卫星进入近地轨道，不仅增加了低轨卫星碰撞风险，也对天文观测、太空探测产生了重要影响[5,6]，迫切需要对其进行有效监测[7]。

由于低轨卫星轨道低、亮度高、特征明显，传统小型光学望远系统即可有效观测，面

对日益增多的低轨卫星目标，探索利用小口径、低成本的光学望远镜构建监测网络是未来低轨卫星监测网发展的一个的重要方向[8]。Anderson 利用 Meade LX200GPS 望远镜、Meade LPI-G 相机研制了卫星跟踪系统[9]； Pascal 使用 ASA H200 望远镜和佳能 EOS 5D Mark IV 相机组成系统跟踪卫星目标[10]；美国高级计划研究局(DARPA)还构建了“私人光学望远镜网络”（SpaceView）、“美国政府小型光学望远镜系统网络”（Raven）等小型光学系统监测网络[11]。

然而，基于业余光学望远镜构成的观测系统，轴系误差大、方位精度差[12]；加之在白昼条件下，大气背景光强，导致卫星观测信噪比较低，难以实现卫星轨道的高效跟踪及轨道精确求解[7,13]，因此针对低轨卫星这一特定观测目标，探索对小型光学系统设计改进，提升卫星的观测效果十分必要。近年来，随着大气偏振态在导航领域的深入研究[14,15]，有学者提出在近红外波段采用偏振技术，进一步提升小型光学探测系统探测能力。美国 Numerica 公司基于短波红外技术，研发小型全天时监测卫星目标的地基望远镜 Aquila，极大提升了白昼卫星探测信噪比[16]；徐家伟利用偏振技术模拟白昼条件下的卫星观测，试验表明对特定材料的卫星图像信噪比可以提升 8 倍[17]。

图像全站仪作为一种典型的光学测绘仪器，具有轴系误差小、观测精度高、自动化程度好等特点，利用图像全站仪数据接口可以驱动全站仪实现目标方向精确照准、跟踪、拍摄以及方位数据提取，在小型低轨目标监测领域极具应用潜力价值[18–20]。为此，本文采用了近红外成像和偏振探测的技术，基于全站仪架构设计了一款小型低轨卫星观测系统，并利用公开的低轨目标轨道数据，实现低轨目标的自动寻找、识别、跟踪，为小型低轨目标光学观测系统的研究设计提供了新的思路。

1 基本原理

1.1 光的偏振态

光的偏振态是描述光电矢量 E 在二维平面中的振动属性的物理量，其分类核心在于该电矢量振动模式的区别，具体可划分为线偏振光、自然光与部分偏振光三类。其中部分偏振光本质上是自然光与线偏振光的非相干叠加结果[21]。对于部分偏振光而言，部分偏振光中线偏振光成分占比大小通常采用偏振度（DOP）p 表示，即：

$$p = \frac{I_{\mathrm{p}}}{I} = \frac{I_{\mathrm{p}}}{I_{\mathrm{p}} + I_{\mathrm{u}}} \tag{1}$$

式中，I_{p} 为部分偏振光 I 中线偏振光成分、I_{u} 部分偏振光 I 中自然光成分，如图 1 所示。对于部分偏振光而言，其中线偏振光偏振方向与参考方向的夹角称为偏振角（AOP）。

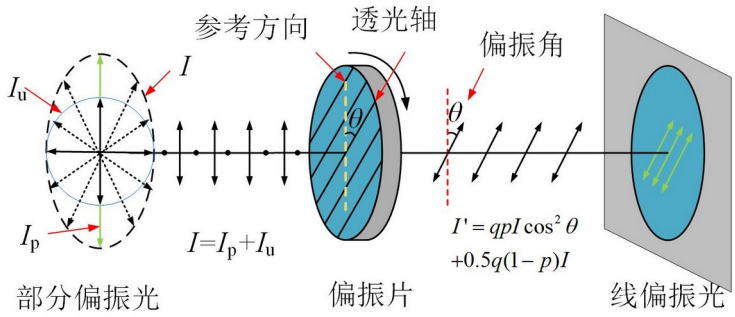


图 1 偏振光示意图

最新录用

由马吕斯定律可知：自然光透过偏振片后，光强会降至入射时的二分之一；线偏振光透过偏振片后的光强，则与偏振片透光轴和线偏振光振动方向夹角的余弦平方成正比。因此，对于包含的线偏振光和自然光的部分偏振光 I 而言，其中线性偏振光成分和自然光成分透过偏振片后光强分别为[22]

$$\begin{aligned} I'_{p} &= qI_{p}\cos^{2}\theta, \\ I'_{u} &= 0.5qI_{u}. \end{aligned} \tag{2}$$

式中 q 为偏振片透光率，θ 为线偏振光偏振方向与偏振片透光轴夹角。联立式(1)、(2)可得偏振度为 p 的部分偏振光 I 透过偏振片后光强 I' 为：

$$I' = qpI\cos^{2}\theta + 0.5q(1-p)I. \tag{3}$$

由式(3)可知，对于大气背景光而言，通过调节偏振片与偏振光夹角 θ 可有效滤除其中的偏振成分，这也是偏振滤光探测的理论依据。

1.2 偏振图像计算

在光学计算中，通常采用 stokes 矢量法表示偏振光。对于偏振光 S 可表示为(I,Q,U,V)[23]，其中 I 为偏振光总光强，Q 和 U 分别为两个正交方向上的线偏振光强，V 为圆偏振光强。对于光强为 S_{in} 入射光而言，当其穿过光学器件时，出射光 S_{out} 可以表示为[24]：

$$S_{out} = M \times S_{in} \tag{4}$$

式中 M 为 4×4 矩阵，称为 Mueller 矩阵。对于偏振片 Mueller 矩阵 M_{p} 为：

$$M_{p} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^{2}2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^{2}2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 θ 为参考轴与偏振片透光轴之间夹角，于是有：

$$I_{out} = \frac{1}{2}(I_{in} + Q_{in}\cos 2\theta + U_{in}\sin 2\theta) \tag{6}$$

对于(6)而言，只要获取 3 个不同方向的 I_{out}，组成三元一次方程，即可计算出入射光强 S_{in} 的 stokes 矢量。实际应用中，通常采用 $I(0°)$、$I(60°)$、$I(120°)$ 三个方向的目标物灰度图计算目标图像的斯托克斯参量 $(I,Q,U)^{T}$ 为：

$$\begin{cases} I = \dfrac{2}{3}\left[I(0°) + I(60°) + I(120°)\right] \\ Q = \dfrac{2}{3}\left[2I(0°) - I(60°) - I(120°)\right] \\ U = \dfrac{2}{\sqrt{3}}\left[I(60°) - I(120°)\right] \end{cases} \tag{7}$$

对于低轨空间目标观测条件而言，圆偏振分量可以忽略不计，依据式(7)计算目标影像偏振度 DOP 和偏振角 AOP 为[25]：

最新录用

$$\begin{cases} DOP = \dfrac{\sqrt{Q^2+U^2}}{I} \\ AOP = \dfrac{1}{2}\arctan\left(\dfrac{U}{Q}\right) \end{cases} \tag{8}$$

若以观测方位子午线为参考方向，则需对图像计算得到的 AOP 值进行归算，各像元对应偏振角为：

$$AOP(i,j) = \begin{cases} AOP(i,j) - \arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right), (-90° \le AOP(i,j) \le +90°) \\ AOP(i,j) - \arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right) - 180°, (AOP(i,j) > +90°) \\ AOP(i,j) - \arctan\left(\dfrac{i-h/2}{j-\omega/2}\right) + 180°, (AOP(i,j) < -90°) \end{cases} \tag{9}$$

式中 i,j 为图像行、列坐标，h,ω 分别表示图像的高、宽像元数。

1.3 观测波段选择

白昼条件下，晴朗天空的大气以氮气、氧气为主要组成成分，二者合计占比超 99%，同时含有微量气溶胶等次要成分[26]。由于这些气体分子的尺寸远小于太阳光的入射波长，大气散射主要以瑞利散射为主，这也是晴朗天空呈现蓝色的重要原因之一。根据瑞利散设理论，假设发生散射的球形粒子半径为 r，其光学折射率为 n，当强度为 I_0，波长为 λ 的太阳光入射时，散射角为 θ，观测点到粒子间的距离为 d，则单个粒子散射光的强度为[27]：

$$I(\theta) = \frac{I_0}{d^2} \times \frac{8\pi^4 r^6}{\lambda^4} \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right)^2 (1+\cos^2\theta) \tag{10}$$

由式(10)可知，大气对入射光的散射光强与波长 4 次方 λ^4 成反比、与入射光强 I_0 成正比。因此对于低轨目标观测条件下的天空背景，相较于可见光波段而言，近红外波段大气散射产生的背景光强度弱，大气透过率强。利用 modtran 软件，设置仿真参数为美国 1976 标准大气模型、高度 1 公里、观测天顶角 45°、观测方向为正北方向，仿真得到下午 17 时大气背景辐射亮度、大气透过率典型值，如图 2 所示。

最新录用

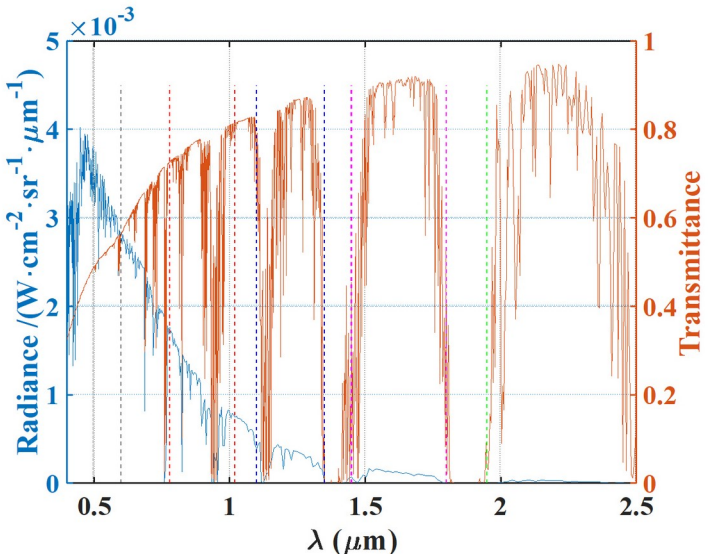


图 2 大气参数图

由图 2 可知，白昼近红外波段天空辐射比可见光波段要低得多，其中 900~2500nm 波段约为可见光波段段的 1/10，而对应的大气透过率却比可见光高 20%~30%。理论上，电磁波波长越长穿透力越强，天空背景辐射越弱，但波长超过 2000nm 时低轨卫星反射光强也会骤减，大气本体及仪器自身辐射产生的探测干扰将不可忽视[28]，因此综合大气背景光强、大气窗口及红外传感器性能等因素影响[29]，本文采用 900~1700nm 的近红外波段作为观测系统光学响应波段。

2 观测系统设计

2.1 整体结构

与传统的小型光学系统设备相比，全站仪可以精确提供目标方位的水平角和垂直角，并通过传感器自动显示读数和记录数据[30]。新一代图像全站仪具有自动拍照、自动跟踪、自动定位等功能，且具有相机关系固定，成像稳定等优势，广泛用于变形监测、天文测量等领域[31]。课题组选购苏州一光仪器设计生产的某型图像全站仪，该设备配备 MEMS 寻北、原子钟守时等功能，具体参数如表 1 所示。

表 1 全站仪精度指标

水平角精度	垂直角精度	双轴补充范围	双轴补偿稳定时间	指向精度
1″	1″	≥±4′	≤3 s	6″
最大跟踪速度	跟踪精度	伺服定位精度	马达稳定时间	守时精度
180°/s	10″	3″	4 s	1 μs

基于全站仪架构的观测系统设计，应该充分利用全站仪精密的轴系和测角功能，改造原有的可见光光路，增加近红外波段成像光路，实现观测目标的方位、影像同步精确记录为充分利用全站仪的基础架构，降低改造成本，观测系统的控制逻辑立足于全站仪原有数控逻辑，精确实现全天空各方位自动定向、跟踪；在控制软件方面，区分全站仪指向位置获取模块、数据处理模块，实现卫星偏振影像获取及自动解算功能。系统整体结构设计如下图 3 所示：

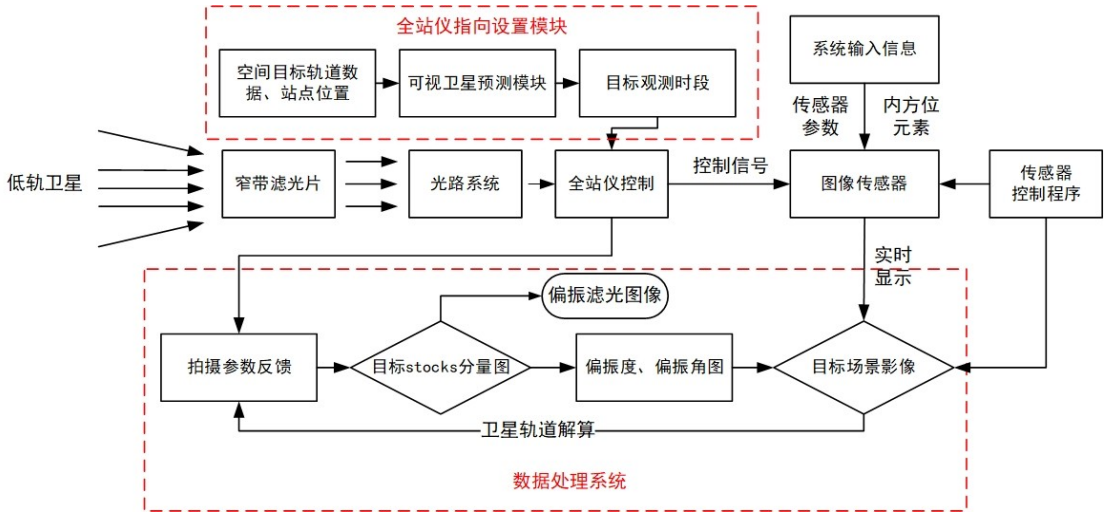


图 3 系统整体结构

在保持全站仪原有光路的基础上，课题组在整体结构上主要进行了如下改动：1.将物镜外框改为螺纹结构，供安装不同谱段滤光片，达到实现不同波段光透过目标；2.在光路结构中增加偏振片，并采用步进式电机对偏振片进行控制，以便获取精确的 stocks 偏振图像；3.将全站仪可见光传感器置换为近红外波段传感器，实现近红外波段的影像成像功能；4.对接全站仪数据通信接口，设计配套功能软件，实现仪器交互控制、卫星目标预测跟踪、目标偏振影像实时切换查看、卫星识别提取及轨道计算。

2.2 光路设计

传统全站仪光路系统工作在可见光波段，虽然对于一般的光学玻璃而言，在近红外波段仍具有较高的光谱透过率，但相对于可见光波段而言，近红外波段的光强、透过率明显减弱，因此需要全站仪光路系统的光线进行分光处理。为此，全站仪光路结构中，增加了分色分光棱镜，实现可见光与近红外光光路分开，其中可见光光路供目镜望远系统实施观测，近红外波段光路供目标场景偏振成像。具体光路设计如下图 4 所示。

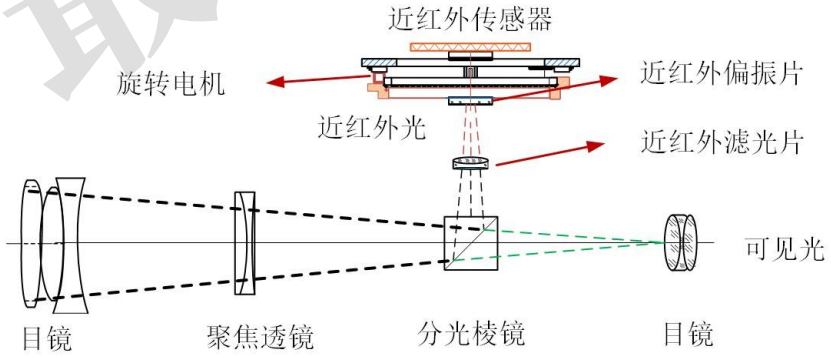


图 4 光路系统设计

如图 4 所示，在近红外波段光路中增加 Spectrogon 900~1700nm 波段滤光片实现可见光的进一步滤除，并将原有可见光传感器替换为响应波段为 0.4μm~1.7μm 的 SonyIMX990 短波红外传感器。该传感器为正方形 5μm*5μm 像素，QHY990 具有 131 万像素，可以高分辨率记录图像信息。

在近红外波段光路中增加 Edmund 400~2200nm 近红外波段偏振片，该偏振片的平均透射率为 39%，在 760 和 2200nm 的入射随机偏振光下的偏振效率大于 99.6%。课题组将近红外偏振片设计成 240°扇形，可以巧妙实现 0°~180°角度偏振滤光测量及非偏振测量两种模

式。近红外偏振片旋转角度由精密旋转步进电机控制，并将透光轴水平平行方位设为起始0°方位，以便实现目标视场各偏振角度的 stocks 分量图像拍摄。具体实物如下图 5 所示。

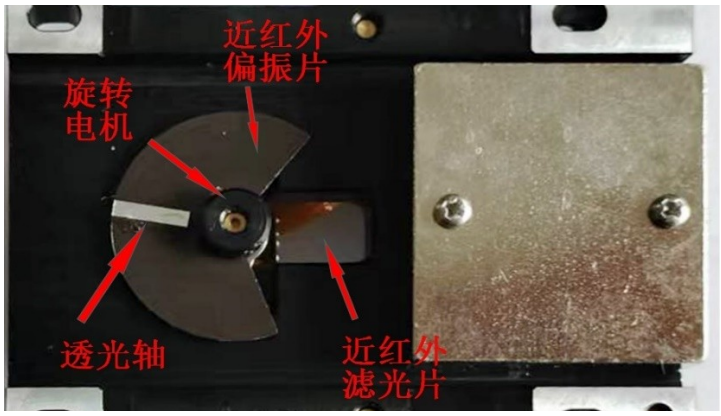


图 5 红外滤光片设计

整体光路系统参数如下表 2 所示。

表 2 偏振测量平台参数

视场大小	通光口径	工作波段	光学透过率：	最短视距	偏振片旋转速度
1°20′	40mm	900~1700nm	56%	<10m	50rev/s
传感器型号	量子响应效率	像元尺寸	像元总数	满阱电荷	偏振旋转精度
IMX990	77%	5.0um*5.0um	1392×1052	120ke	0.5″

2.3 全站仪指向算法设计

对低轨卫星进行观测时需要将小型光学系统精确的对准卫星目标，而对于全站仪而言通常采用与测站相关的站心地平坐标系，以水平角、高度角为观测量；而低轨目标绕地球做周期性运动，通常采用地心惯性坐标系。在进行全站仪指向算法设计时，必须进行坐标系统的转换。

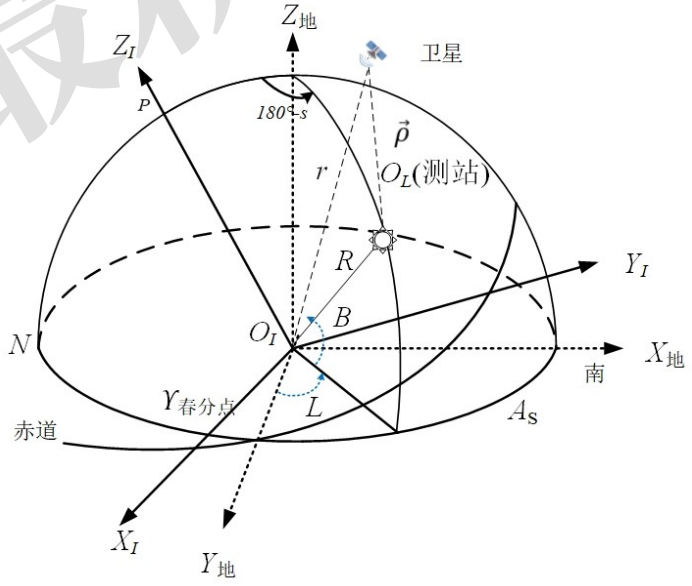


图 6 测站坐标转换示意图

如图 6 所示，地心惯性坐标系 ECI(Earth -Centered intertial coordinate system)的原点为地球质心 O_I，X_I 轴为地心指向春分点方向，Z_I 轴为地心指向北极方向，Y_I 轴与

$X_I O_I Z_I$ 平面垂直并构成右手坐标系。则测站O_L坐标（B、L、H）在 ECI 坐标系下的位置矢量$\vec{R}$可表示为：

$$\vec{R} = x_I \cos s\vec{i}_I + x_I \sin s\vec{j}_I + z_I\vec{k}_I \tag{11}$$

其中：

$$x_I = \left[\frac{a_e}{\sqrt{1-e_e^2 \sin^2 B}} + H\right]\cos B \tag{12}$$

$$z_I = \left[\frac{a_e(1-e_e^2)}{\sqrt{1-e_e^2 \sin^2 B}} + H\right]\cos B \tag{13}$$

$$s = S + L \tag{14}$$

式中：参考椭球的长半轴a_e=6,378,137 m，参考椭球偏心率e_e=0.08181919，S 为格林尼治恒星时，s 为当地恒星时，$\vec{i}_I$、$\vec{j}_I$、$\vec{k}_I$ 为各坐标轴方向单位向量。

TLE（Two Line Elements，两行根数）是一套由北美防空司令部（NORAD，North American Aerospace Defense Command）标准化制定并公开发布的轨道参数格式，专门用于定量描述卫星、航天器、太空碎片等空间目标的轨道状态[32,33]。利用其配套配套轨道预测模型 SGP4(Simplified General Perturbations model)可计算未来一段时间空间目标在 ECI 坐标系下的位置和速度矢量。设通过 SGP4 获取的低轨卫星在 ECI 坐标系下的位置矢量为$\vec{r}$、速度矢量为$\vec{v}_r$，则在 ECI 坐标系中采取矢量运算法，可得低轨卫星相对于测站O_L的位置矢量为[34]：

$$\vec{\rho} = \vec{r} - \vec{R} = \begin{bmatrix} r_{xI} - R_{xI} \\ r_{yI} - R_{xI} \\ r_{zI} - R_{xI} \end{bmatrix} \tag{15}$$

如图 6 所示，大地站心地平直角坐标系原点为测站中心O_L，基本平面为参考椭球在O_L点的切平面，$X_{地}$ 指向正东，$Y_{地}$ 沿当地子午圈指向正北，$Z_{地}$ 轴指向天顶。坐标系转换需将坐标原点由地心移动到站心，再乘以地心惯性系到测站地平坐标系的方向余弦阵。由此可得，在站心直角坐标系下，低轨卫星相对于测站O_L的位置矢量、速度矢量为：

$$\vec{\rho} = \begin{bmatrix} -\cos s\sin B & \cos s\cos B & \sin s \\ -\sin B & \cos B & 0 \\ -\cos B\sin s & \sin s\sin B & \cos s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{xI} - R_{xI} \\ r_{yI} - R_{xI} \\ r_{zI} - R_{xI} \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\vec{v_\rho} = \begin{bmatrix} -\cos s\sin B & \cos s\cos B & \sin s \\ -\sin B & \cos B & 0 \\ -\cos B\sin s & \sin s\sin B & \cos s \end{bmatrix} \cdot \vec{v_r} \tag{17}$$

由$\vec{\rho}$、$\vec{v}_\rho$可计算出空间目标相对于测站的方位角为θ，高度角为δ为：

最新资料

$$\begin{cases} \theta = \arctan(\dfrac{\rho_{sf}}{\rho_{wf}}) \\ \delta = \arccos(\dfrac{\rho_{zf}}{\|\vec{\rho}\|}) \end{cases} \tag{18}$$

当图像全站仪以正北方向完成初始定向后，调整视准轴使度盘水平角、垂直角分别为θ、δ，在预报时刻低轨卫星目标即会出现在望远镜视场范围内。

2.4 拍摄功能设计

图像全站仪具有马达功能，可以实现“360°+180°”上半天球自动旋转，偏振片步进马达可以实现偏振片透光轴精确定位。在此基础上课题组通过集成串口程序实现测量平台上半天球定位定向拍摄、全天域自动拍摄、自动跟踪拍摄等影像拍摄功能。

由于图像传感器、马达定位、测量传感器等结构分属不同控制系统，需统一协调各部件功能，进行配套软件设计，为此将平台划分为定向拍摄、自动拍摄、跟踪拍摄 3 种功能模块。具体拍摄功能模块划分如下图 7 所示



图 7 功能模块划分图

图 7 中 3 种拍摄功能为递进关系，其中定向拍摄模块是建立在测站基础信息基础上，进行必要的拍摄参数设定，拍摄指定方位 Stocks 图像、偏振度图像、偏振角图像等；自动拍摄功能模块是在定向拍摄功能的基础上，输入拍摄时间、循环类型、单方位数量等功能参数，对全天域或某部分天域进行自动循环拍摄；跟踪拍摄模块是在自动拍摄模块的基础上，对图像中的低轨卫星目标进行识别、判定、确认以及运动轨迹计算。

3 功能测试

为全面测试观测系统的成像效果、结构稳定性以及自动化程度，课题组设计了定向功能拍摄、全自动拍摄、卫星跟踪拍摄 3 个科目进行测试。2025 年 3 月 5 日，在郑州某楼顶对系统功能进行测试，采集期间天空晴朗无云，采集前先将全站仪精确整平，输入测站坐标参数，以北方向为 0°方位，按照指定方位拍摄、全自动拍摄、卫星跟踪拍摄 3 个科目进行测试。具体实验现场如下图 8 所示。

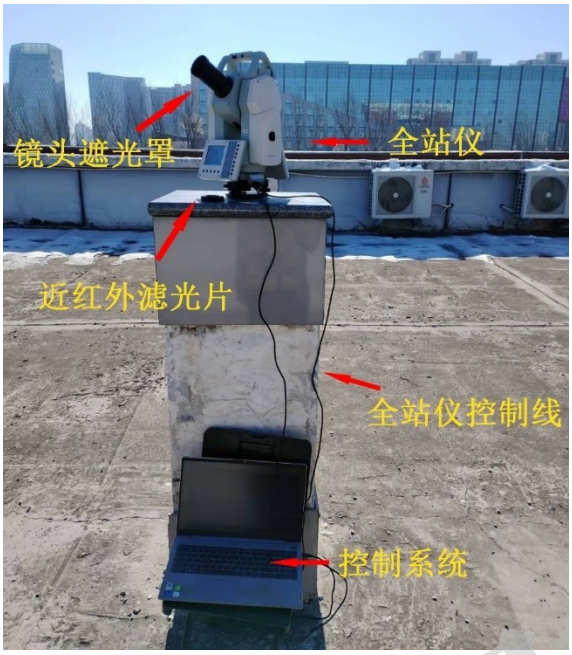


图 8 外场实验

3.1 定向拍摄功能测试

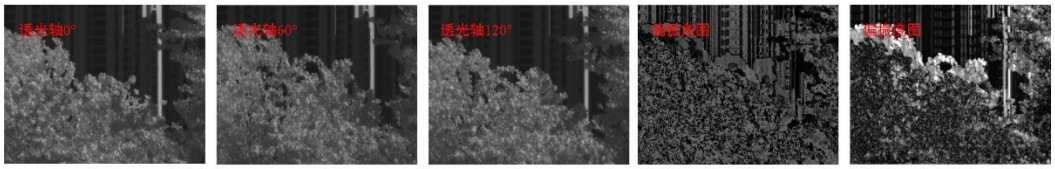
定向功能测试，主要测试设备成像性能优劣，是获取高质量卫星偏振影像的基础。为此为课题组对建筑物、植物、多元素背景进行了拍摄，得到目标物 0°、60°、120° stocks 图像，及同步处理的偏振度、偏振角图，如下图 9 所示。



(a) 建筑物偏振组图



(b) 植物偏振组图



(c) 多元素偏振组图

图 9 定向拍摄测试

由图 9 可知，基于全站仪架构的偏振测量平台继承了全站仪精密的光路系统结构，可以对复杂场景清晰成像，无论建筑物轮廓、植被细节均可以清楚显示；通过计算软件可以对目标场景偏振度、偏振角图像自动计算处理并实时显示拍摄场景的偏振信息。由此可见基于全站仪光路系统设计的近红外偏振测量光路具有良好的成像效果，可以满足低轨卫星的成像需求。

3.2 全自动拍摄功能测试

全自动拍摄功能测试，主要测试设备自动化水平，定位定向准确性，是后续低轨卫星长时间、高动态、稳定跟踪的重要支撑。为此，课题组将测量平台设置为自动测量模式，按照方位 0°起始、间隔 30°，高度角 20°起始、间隔 20°为一组，拍摄全天空大气偏振模式，按照设置采集时间 25min，从早晨 8:10 至 8:40 采集全天空偏振态数据 1 组，共 48 个方 144 张图片，同步解算各方位的大气偏振度、偏振角值，部分典型方位的大气偏振度、偏振角组图如下图 10 所示。

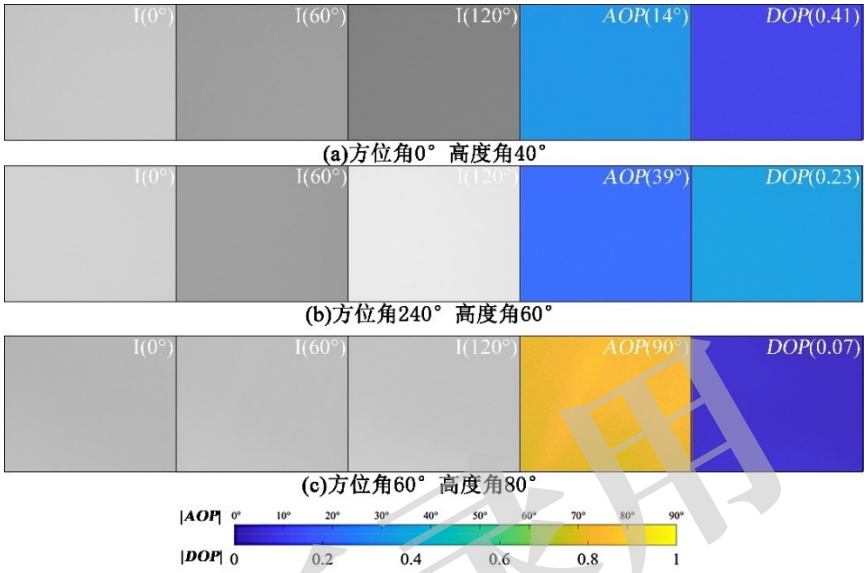


图 10 大气偏振态测量图

由图 10 可知，对于白昼天空背景光而言，偏振片不同透光角度滤除的背景光光强存在明显不同，采用偏振滤光技术可以有效提升降低天空背景光影响。将全天空 48 个方位的大气偏振角（AOP）、大气偏振度（DOP）内插绘制出全天空大气偏振态分布图，如下图 11 所示。

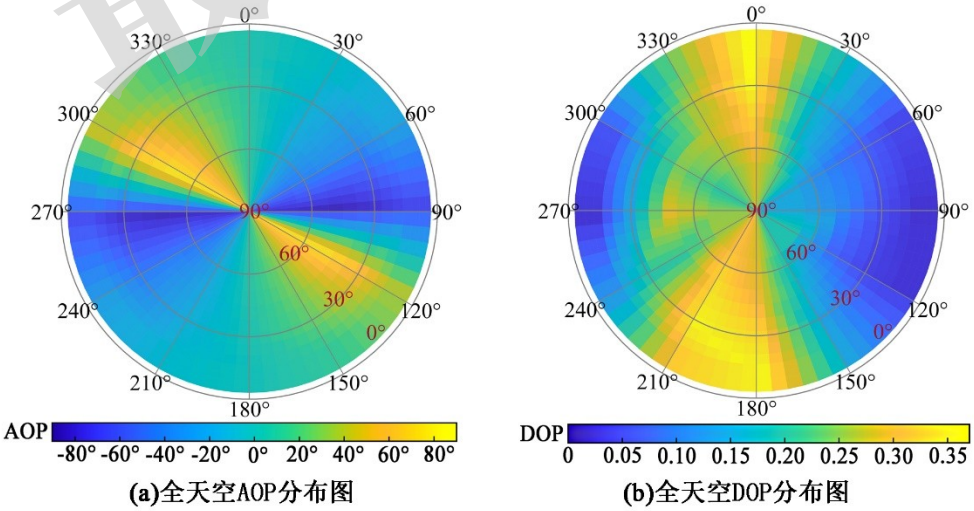


图 11 全天空大气偏振态分布图

由图 11 可知，设备长时间、全方向观测计算出的大气偏振态与传统的瑞利散射模型符号较好，验证了偏振滤光提升目标探测信噪比的可行性，也表明了全站仪轴系结构稳定、反应灵敏、自动化程度高，可以满足低轨目标长时间、高动态跟踪观测。

3.3 跟踪拍摄功能测试

跟踪拍摄功能测试，主要测试设备对于低轨卫星预测、跟踪能力、偏振探测能力，为后续轨道计算、算法优化提供参考。为此课题组选取 Starlink-5134 卫星为观测目标，该卫星轨道高度约 540km，底版尺寸为 3.8m×13m，亮度为 3~7mag，运动角速度约为 20″/s[35]。

测量开始前，通过 GNSS 天线获取测站概略坐标，完成原子钟授时，通过全站仪指向算法计算卫星概略方位，并驱动全站仪视准轴调整至该方位。测量开始后，通过系统图像识别提取功能确定目标卫星，根据卫星运动速度数据进行轨迹预测及跟踪，在跟踪过程中分别按照 0°、20°、40°、60°、80°、100°、120°、140°、160°旋转偏振片透光轴对恒星进行跟踪观测，并同步提取卫星坐标、时间信息。如图 12 所示。

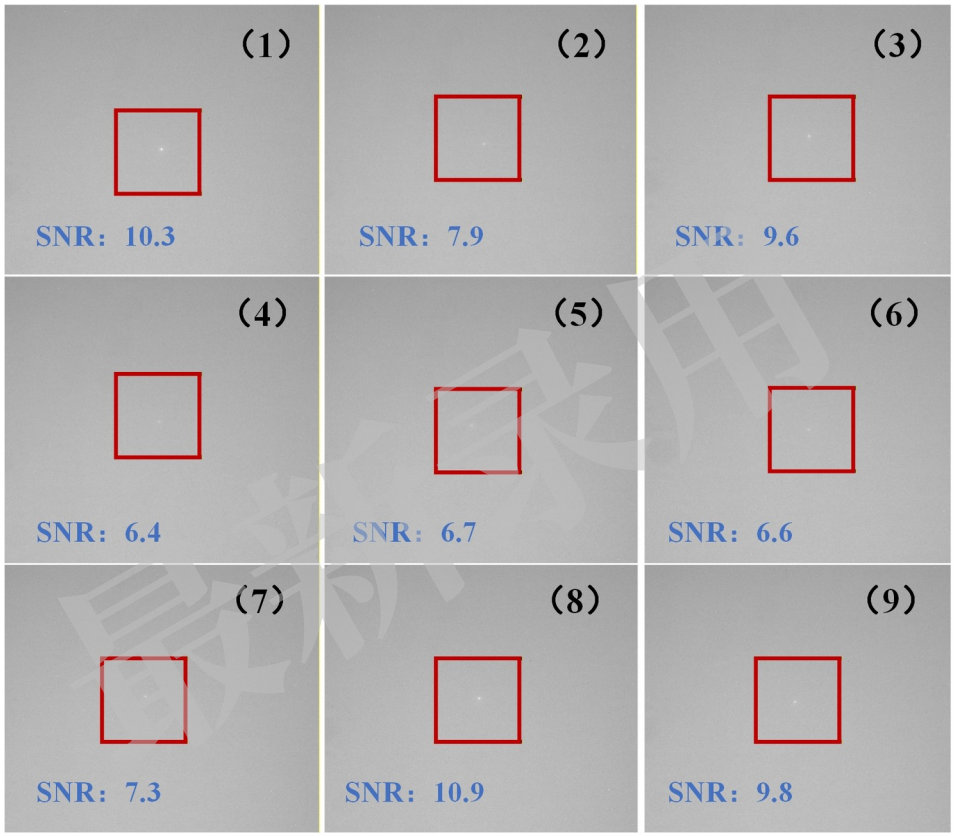


图 12 Starlink-5134 卫星偏振图像

由图 12 可知，采用不同偏振片旋转角度进行偏振滤光拍摄，图像背景灰度值存在明显变化，这是由于大气背景光存在明显偏振特性，滤光片可以有效滤除大气背景光中的偏振成分，从而提升低轨卫星等小目标的监测信噪比。虽然 3.2 节已经验证了全天空大气存在明显的偏振规律，但计算各帧星图信噪比依次为 10.3、7.9、9.6、6.4、6.7、6.6、7.3、10.9、9.8，并没有呈现明显规律性，这主要因为①卫星的帆板反射的太阳光也存在一定偏振特性，②近地面气溶胶、地表反射导致大气偏振态规律性减弱。

由图 12 可见，对于运行在 540km 高度的卫星而言，实际成像的张角不超过 0.02″，在小型光学系统重成像可视为点目标，但是由于低轨卫星高速运动产生的拖尾、大气背景噪声、大气湍流等因素影响，实际卫星成像并不是规律的圆目标，需要深入研究卫星质心提取算法并结合全站仪相机转换参数，进而精确提取卫星目标的观测方位，并结合卫星拍摄时间、测站位置根据球面三角公式可以对卫星进行精确定轨。

4 结论

全站仪具有轴系误差小、观测精度高、易于部署等特点，在小型低轨目标监测中具有独特的优势及潜力。本文基于全站仪架构设计了一款低轨目标观测系统，并开展定向拍摄自动拍摄、跟踪拍摄，试验表明该系统结构稳定、成像清晰、自动化程度高，可以满足低轨卫星监测使用。需要说明的是本观测系统仍处于原理样机阶段，关于卫星目标识别提取轨道精确计算方面设计仍有诸多不足，后续将根据实际拍卫星摄影像开展针对性算法研究。

最新录用

参考文献：

[1] LIU Ke. Concept and scenario design of agile navigation warfare supported by low-orbit constellation[J]. *Modern Defense Technology*, 2025, **53**(2): 37-44 (刘科. 低轨星座支持下的敏捷导航战概念及场景设计[J]. 现代防御技术, 2025, **53**(2): 37-44)

[2] WU Shufan,WANG Wei,WEN Jifan,et al. Review on development of LEO Internet constellation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2024,50(1):1-11 (吴树范, 王伟, 温济帆, 等. 低轨互联网星座发展研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 1-11.**)**

[3] YANG Wenhuan, HUA Guoliang, FENG Yan, *et al*. Analysis of the starlink satellite network filing application[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, **2**(1): 60-68 (杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链计划卫星网络资料申报情况分析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, **2**(1): 60-68)

[4] CHENG Jiao, WAN Song, LIU Guohua, *et al*. Application research of electric propulsion in LEO space-internet mega-constellations[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, **44**(7): 1-10 (程蛟, 万松, 刘国华, 等. 电推进在低轨空间互联网巨型星座的应用研究[J]. 推进技术, 2023, **44**(7): 1-10)

[5] WALKER C, HALL J, ALLEN L, *et al*. Impact of satellite constellations on optical astronomy and recommendations toward mitigations[J]. *Bulletin of the AAS*, 2020, **52**(2)

[6] LALBAKHSH A, PITCAIRN A, MANDAL K, *et al*. Darkening low-earth orbit satellite constellations: a review[J]. *IEEE Access*, 2022, **10**: 24383-24394

[7] LI Zhenwei, ZHANG Tao, SUN Mingguo. Fast recognition and precise orientation of space objects in star background[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 589-599 (李振伟, 张涛, 孙明国. 星空背景下空间目标的快速识别与精密定位[J]. 光学 精密工程, 2015, **23**(2): 589-599)

[8] ZHANG Mengyao, YANG Yuan, CHEN Zhixing, *et al*. Low earth orbit satellite monitoring technology based on small optical telescopes[J]. *Radio Engineering*, 2025, **55**(3): 572-579 (张梦瑶, 杨原, 陈智兴, 等. 基于小型光学望远镜的低轨卫星监测技术[J]. 无线电工程, 2025, **55**(3): 572-579)

[9] ANDERSON L G. Satellite tracking with telescope and software[D]. Monterrey: Naval Postgraduate School, 2019

[10] MÖSBAUER P. Setup of an optical system for autonomous surveillance of orbital objects[D]. Aachen: RWTH Aachen University, 2018

[11] WANG Xinglong, CAI Yaxing, CHEN Shiming, *et al*. Application and development of

multi-source information fusion in space situational awareness[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, **42**(1): 11-20 (王兴龙, 蔡亚星, 陈士明, 等. 多源信息融合在空间态势感知领域的应用与发展[J]. 航天返回与遥感, 2021, **42**(1): 11-20)

[12] MA Jin, GU Bozhong. The Influence of Axis System Errors of Altazimuth Telescope on Pointing Accuracy and Tracking Accuracy [J]. Astronomical Research & Technology, 2011, 8 (02): 132-138 (马锦,顾伯忠. 地平式望远镜轴系误差对指向精度和跟踪精度的影响 [J]. 天文研究与技术, 2011, 8 (02): 132-138.)

[13] SUN Mingguo, LIU Chengzhi, FAN Cunbo, *et al*. Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, **53**(2): 153-160 (孙明国, 刘承志, 范存波, 等. 基于 SLR 精密轨道的天文定位精度分析[J]. 天文学报, 2012, **53**(2): 153-160)

[14] POMOZI I, HORVÁTH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation. *Journal of Experimental Biology*, *204*(17), 2933-2942.

[15] ZHAO H J, XU W J, ZHANG Y, *et al*. Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight[J]. *Optics Express*, 2018, **26**(22): 28589-28603

[16] THOMAS G, COBB R, FIORINO S, *et al*. SNR modeling for ground-based daytime imaging of GEO-satellites in the SWIR[C]//2019 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE, 2019: 1-9

[17] XU Jiawei. Research on Polarization Detection Technology of Space Target under Strong Light Background[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2024 (许家伟. 强光背景下空间目标偏振探测技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2024)

[18] SCHERER M, LERMA J L. From the conventional total station to the prospective image assisted photogrammetric scanning total station: comprehensive review[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2009, **135**(4): 173-178

[19] SCHWIEGER V, KEREKES G, LERKE O. Image-based target detection and tracking using image-assisted robotic total stations[M]//SERGIYENKO O, FLORES-FUENTES W, MERCORELLI P. Machine Vision and Navigation. Cham: Springer, 2020: 133-169

[20] ZHANG Houtian, ZHENG Yong, CHEN Bing, *et al*. Development and prospect of image assisted total station and image measurement[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(6): 50-53 (章后甜, 郑勇, 陈冰, 等. 图像全站仪及图像测量发展与展望[J]. 测绘通报, 2021(6): 50-53)

[21] SUN Jie, GAO Jun, HUAI Yu, *et al*. Real-time measurement system for the pattern of all skylight polarization[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, **43**(9): 45-50, 55 (孙洁, 高隽, 怀宇, 等. 全天域大气偏振模式的实时测量系统[J]. 光电工程, 2016, **43**(9): 45-50, 55)

[22] CHEN Zhixing, GOU Wanxiang, TONG Shuai, *et al*. Research and experimental verification of atmospheric polarization state in the near-infrared band[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(1): 135-148 (陈智兴, 勾万祥, 佟帅, 等. 近红外波段大气偏振态研究及实验验证[J]. 空间科学学报, 2025, **45**(1): 135-148)

[23] QI Shuxia, LIU Sheng, LI Peng, *et al*. Measurement methods on polarization distribution of light fields and their applications (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, **51**(8): 0851502 (齐淑霞, 刘圣, 李鹏, 等. 光场偏振分布测量方法及其应用(特邀)[J]. 光子学报, 2022, **51**(8): 0851502)

最新录用

[24] ZHANG Ran, CAI Hong, GUAN Le, *et al*. Polarization orientation method for cloudy sky[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, **29**(7): 1499-1510 (张然, 蔡弘, 关乐, 等. 多云天气天空偏振定向方法[J]. 光学精密工程, 2021, **29**(7): 1499-1510)

[25] MIYAZAKI D, AMMAR M, KAWAKAMI R, *et al*. Estimating sunlight polarization using a fish-eye lens[J]. *IPSJ Transactions on Computer Vision and Applications*, 2009, **1**: 288-300

[26] GATES D M. Spectral distribution of solar radiation at the Earth's surface: the spectral quality of sunlight, skylight, and global radiation varies with atmospheric conditions[J]. *Science*, 1966, **151**(3710): 523-529

[27] PRADHAN R K. Does Rayleigh scattering explain the Blueness of Sky?. Science Horizon. march, 2015. 28-31.

[28] HAN Yanli, WANG Duo, GUO Shaojun, *et al*. Near-infrared contrast of star to sky background during daytime[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, **33**(5): 969-973 (韩艳丽, 王铎, 郭少军, 等. 近红外白天恒星探测对比度分析[J]. 应用光学, 2012, **33**(5): 969-973)

[29] ZHANG Hui, ZHOU Xiangdong, WANG Xinmei, *et al*. Survey of technology status and development of all-time star sensors in near-earth space[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, **41**(8): 623719 (张辉, 周向东, 汪新梅, 等. 近地空间全天时星敏感器技术现状及发展综述[J]. 航空学报, 2020, **41**(8): 623719)

[30] SHI Chunlin, ZHANG Chao, CHEN Changyuan, *et al*. One-dimensional maximum entropy image segmentation algorithm based on the small field of view of measuring robot star map[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, **47**(4): 446-454 (时春霖, 张超, 陈长远, 等. 测量机器人小视场星图一维最大熵星点图像分割算法[J]. 测绘学报, 2018, **47**(4): 446-454)

[31] ZHANG Xu, ZHANG Chao, ZHAN Yinhu, *et al*. A method of removing abnormal data from linear array total station astronomical measurement based on star position prediction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, **52**(4): 571-578 (张旭, 张超, 詹银虎, 等. 基于星点位置预测的线阵全站仪天文测量异常数据剔除方法[J]. 测绘学报, 2023, **52**(4): 571-578)

[32] ZHANG Huiyan. The Optical Measurement Method and Precise Orbit Determination for the Satellite[D]. Xi'an: The University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center，China Academy of Sciences), 2014 (张会彦. 卫星光学测量方法与精密定轨研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2014)

[33] LIU Wei, WANG Ronglan, LIU Siqing, *et al*. TLE prediction accuracy improvement and its application in collision warning[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(4): 449-459 (刘卫, 王荣兰, 刘四清, 等. TLE 预报精度改进及碰撞预警中的应用[J]. 空间科学学报, 2014, **34**(4): 449-459)

[34] YANG Yuan, LI Chonghui, TONG Shuai, *et al*. Study on the method of observing LEO satellite with image total station[J]. *EngineeringofSurveyingand Mapping*, 2024, **33**(6): 11-17, 40 (杨原, 李崇辉, 佟帅, 等. 图像全站仪观测低轨卫星方法研究[J]. 测绘工程, 2024, **33**(6): 11-17, 40)

[35] GOU Wanxiang, LI Chonghui, ZHAN Yinhua, *et al*. Efficiency analysis of polarizing filter enhanced signal to noise ratio for daytime star measurement[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, **53**(8): 1574-1585 (勾万祥, 李崇辉, 詹银虎, 等. 偏振滤光增强白昼测星信噪比效能分析[J]. 测绘学报, 2024, **53**(8): 1574-1585)

录用稿件，非最终出版稿

最新录用