

文章编号 1004-924X(2025)24-3823-12

天基与地基光学观测中星座卫星干扰的量化评估

艾宏旭^{1,2,3}, 纪珍辰^{1,2,3}, 赵若彤³, 韩 圆¹, 姚家琦^{1,2},
王文杰³, 李 文¹, 孙志斌^{1,2*}

(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;

3. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要:为精确建模低轨卫星星座的光度特性并评估其对地基观测的干扰影响, 本文以 Starlink 卫星为代表, 系统研究了其光度模型、观测几何特征及对天文观测的影响规律。首先, 基于 NEOSat 天基观测数据, 建立了昼侧与夜侧光度模型, 定量描述了卫星亮度随相位角变化的特征。其次, 结合星座轨道参数与光学几何关系, 提出了一种融合天基测光与地基仿真的高效评估方法, 综合考虑卫星反射亮度、曝光时间和拖尾效应, 构建了卫星尾迹数量的预测模型。最后, 搭建地基多视场观测实验系统, 通过单视场与双视场对比实验, 验证了不同探测星等极限和视场条件下的观测能力。结果表明, Starlink 卫星的平均视星等约为 6.9 ± 0.9 等, 昼侧与夜侧模型的拟合优度分别为 $R^2 = 0.54$ 和 0.85 ; 卫星尾迹数量与曝光时间呈近线性关系。地基实验显示, 双视场系统在相同条件下的可观测目标数约为单视场的两倍, 有效提升了空间目标探测范围。该研究建立了多源观测融合的低轨卫星光度定量评估框架, 为地基天文台优化观测策略与制定干扰规避方案提供了理论依据和数据参考。

关键词:低轨卫星; 光度模型; 天基观测; 地基观测; 多视场观测

中图分类号: V11 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253324.3823

CSTR: 32169.14.OPE.20253324.3823

Quantifying constellation satellite interference in optical observations from ground and space

AI Hongxu^{1,2,3}, JI Zhenchen^{1,2,3}, ZHAO Ruotong³, HAN Yuan¹, YAO Jiaqi^{1,2},
WANG Wenjie³, LI Wen¹, SUN Zhibin^{1,2*}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

* Corresponding author, E-mail: zbsun@nssc.ac.cn

Abstract: To accurately model the photometric characteristics of low Earth orbit satellite (LEO) constellations, this study focuses on Starlink satellites and systematically investigates their brightness models, observational geometry, and impacts on ground-based astronomy. Using NEOSat space-based observations, we established separate day-side and night-side brightness models, which quantitatively describe

收稿日期: 2025-10-28; 修订日期: 2025-11-12.

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFC2604900); 国家重点研发计划项目 (No. 2023YFC2604904)

how satellite brightness varies with phase angle. Day-side brightness mainly depends on solar reflection, while night-side brightness reflects indirect illumination. Combining constellation orbital parameters and optical geometry, we proposed an efficient assessment method that integrates space-based photometry with ground-based simulation. This approach accounts for satellite reflective brightness, exposure duration, and trail effects, and a predictive model was constructed to estimate the number of satellite trails in images. A ground-based multi-field observational experiment was conducted to test detection capabilities under different conditions, comparing single-field and dual-field setups, and evaluating various limiting magnitudes and field-of-view (FOV) constraints. Results indicate that the average apparent magnitude of Starlink satellites is approximately 6.9 ± 0.9 mag, and the fit quality of the day-side and night-side models was $R^2 = 0.54$ and 0.85 , respectively. The number of satellite trails shows an almost linear relationship with exposure time, and ground-based experiments demonstrate that dual-field systems can detect about twice as many targets as single-field setups, effectively expanding the spatial detection range. Overall, this study establishes a quantitative framework for multi-source assessment of low Earth orbit satellite photometry, providing a practical reference for optimizing ground-based telescope observation strategies and developing satellite interference mitigation plans. By integrating space-based data with ground simulations, the method enables efficient prediction of satellite visibility and trail occurrence, adapts to different observational conditions, and offers data-driven guidance for minimizing observational disruptions in large-scale satellite constellations.

Key words: Low Earth Orbit (LEO); photometric model; space-based observations; ground-based observations; multi-FOV observation

1 引言

近年低轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星数量迅速增长,截至到 2025 年,LEO 卫星在轨数量将达到约 9 000 颗,占全球在轨卫星总数的近 90%。2014 年,SpaceX 公司提出了构建低轨卫星互联网星座的构想,计划通过部署约 4.2 万颗卫星取代部分地面传统通信设施,实现全球范围内低成本、高速且稳定的卫星宽带服务。如此大规模的 Starlink 卫星星座对地基天文观测构成了潜在影响,引发天文学界的广泛关注与讨论^[1]。

在天基观测方面,加拿大的近地天体监测卫星 (Near-Earth Object Surveillance Satellite, NEOSat) 于 2020 年开展了一项为期六个月的光学观测任务,系统采集了 Starlink 卫星的空间光度数据。该观测计划通过持续监测低轨卫星在不同太阳相位角下的反射光特性,分析其光度表现并评估其对天文观测的潜在影响。研究结果表明,Starlink 卫星在低相位角 (夜侧) 与高相位角 (昼侧) 条件下的光度特性均表现出较高的

稳定性,卫星的反射亮度分布均较为一致^[2]。该发现为深入理解低轨卫星在不同照明条件下的光学行为提供了实验依据。

地基观测低轨卫星存在多项技术挑战。由于卫星视运动速度可达约 200 arc minute/min,而望远镜视场较小,观测时需在卫星速率跟踪和恒星速率跟踪之间权衡^[3-4]。卫星速率跟踪可获取完整光度信息,但会导致恒星图像拖尾或模糊;恒星速率跟踪则可保持背景恒星清晰,但快速掠过的卫星可能产生拖尾,长曝光下甚至会引起局部像素饱和。近年来,针对 Starlink 等低轨卫星的大规模、多波段光度观测研究不断推进^[5],建立了适用于不同观测条件和相位角的定量光度模型。

随着低轨卫星数量的持续增长,相关观测技术不断发展,观测方法与系统日益完善,为评估近地轨道目标的可观测性及其光学特性提供了有力支撑。2014 年,Gruntman^[6]等人提出 SBO 观测方法,用于探测近地轨道上的毫米级碎片,旨在完善空间环境模型,其研究重点是碎片的通量和密度,而非大型目标。2017 年,Chen^[7]等人

设计了由三颗太阳同步轨道卫星组成的观测系统,配备 $10^\circ \times 10^\circ$ 视场传感器,可在三天内观测 80% 以上的 LEO 目标,验证了多星协同观测的有效性。2020 年 Tregloan-Reed^[8] 等人使用 SDSS 系统及 Sloan r' 和 g' 滤光片观测 Starlink 的 Darksat 卫星,发现其在 475.4 nm 波长下比 Starlink-1113 暗 0.77 ± 0.05 星等。2022 年, Bassa^[9] 等人采用离散模拟结合概率密度函数的方法,系统评估了大规模星座对地面光学和近红外观测的影响。

为了全面分析近地轨道卫星视星等的变化及其对光学观测的影响,本文基于几何反射原理建立了相位角-视星等模型,以描述卫星在不同照明条件下的光度特性。在卫星仿真平台上,对不同版本的 Starlink 卫星开展多波段地基观测模拟,研究观测卫星轨迹数量随观测波段和曝光时间的变化规律。此外,本文还搭建了一套由望远镜和 sCMOS 相机构成的地基观测系统,开展单视场与双视场实验,对不同探测星等极限和视场(Field of View, FOV)配置下的观测能力差异进行了定量分析。

2 Starlink 卫星天基观测模型分析

Starlink 卫星的轨道高度比 NEOSSat 低约 235 km。图 1 展示了两颗 Starlink 卫星在地球夜侧与昼侧运行期间的观测情形。当 NEOSSat 处于夜侧对 Starlink 进行观测时,目标主要受太阳光照射;而当 NEOSSat 位于昼侧进行观测时,目标则同时受到太阳光与地球反射光的共同照射,这一复合照明条件对光度探测结果产生显著影响。为量化地球反射光对卫星照明条件的贡献,引入观测方向与晨昏线之间的夹角 ξ ,作为地球反照通量的几何表征参数。此外,当观测目标的视星等低于 $M_v 8 \sim 8.5$ 时,NEOSSat 探测器趋于积分饱和,该效应在昼侧观测中尤为显著,部分原因在于天空背景亮度较高,进一步加剧了探测器动态范围的限制。

图 2 展示了包括积分饱和和测量数据在内的 Starlink 卫星视星等观测结果,其中饱和数据以红色标注(彩图见期刊电子版)。尽管部分饱和和测量值仍能反映卫星相对光度变化趋势,且观测

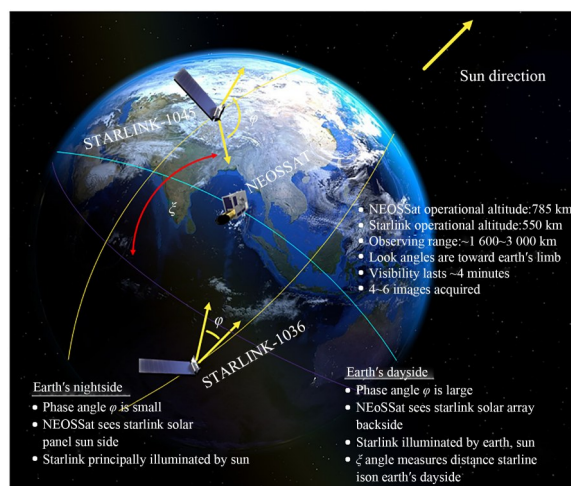


图 1 NEOSSat 对 Starlink 观测几何示意图

Fig. 1 Typical observation geometry of NEOSSat for Starlink

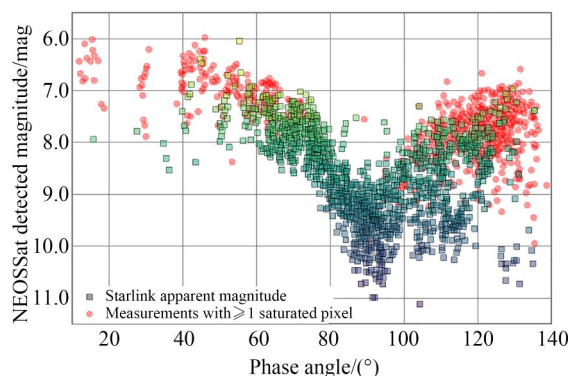


图 2 Starlink 卫星视星等与相位角的关系

Fig. 2 Variation of starlink apparent magnitude with phase angle

数据中包含部分未饱和的有效测量,但为了保证光度模型的准确性,分析中排除了饱和数据,只使用未饱和的测量值进行建模。光变曲线显示,当相位角约为 90° 时,星座在昼侧和夜侧的观测光度的变化趋势存在显著差异,因此研究分别建立了昼侧与夜侧的光度模型^[10-11]。具体而言,当相位角 $\varphi < 90^\circ$ 时,Starlink 卫星主要受太阳光照射,太阳能板面向卫星观测方向;当相位角 $\varphi > 90^\circ$ 时,卫星亮度受到地球反射光与卫星本体结构反射光的共同影响,整体星等变化幅度可达约 2 等。

下面对两种光度模型进行详细分析:

(1)夜侧模型:假设 Starlink 太阳能板始终朝向太阳,且与 NEOSSat 位于同一观测平面内,采用平面太阳能板与圆柱形卫星本体的光度模型,

对观测光度进行建模,模型表达式为^[12]:

$$M_{\varphi < 90^\circ} \approx M_{\text{Sun}} - 2.5 \log_{10} \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a_{\text{sp}} A_{\text{sp}} \langle \cos(\varphi) \rangle}{R^2} \right) - 2.5 \log_{10} \left(\frac{a_{\text{bus}} A_{\text{bus}} F(\varphi)}{R^2} \right), \quad (1)$$

该模型分别计算卫星太阳能板和平面圆柱本体的镜面与漫反射贡献,结合观测视角和相位角变化,估算观测方向的总反射辐照度,从而模拟不同几何条件下的可见光亮度。该方法充分考虑轨道几何约束,可较准确描述 Starlink 卫星光度特性,适用于日照区的天基观测分析。其中,圆柱本体的漫反射相位函数表示为:

$$F(\varphi) = \frac{1}{4\pi} \{ (\pi - \varphi) \cos \varphi + \sin \varphi \}, \quad (2)$$

其中: M_{Sun} 是太阳视星等(-26.74)、 a_{sp} 是太阳能板漫反射系数, A_{sp} 是太阳能板横截面积, φ 是目标相位角, R 是观测者到卫星的距离(1 000 km), a_{bus} 是圆柱本体反射系数, A_{bus} 是圆柱本体横截面积^[13]。

(2) 昼侧模型:昼侧光度观测需要对地球表面反射的光通量进行建模。如图 3 所示,Starlink 卫星在地平线以上所观测的地球半球面可近似视为一个平坦的照明圆盘,该圆盘的半径为 c ,相当于实际被太阳照亮的地球表面区域^[11-13]。为帮助对其他星座分析量化,将低轨卫星轨道高度 h 与地球半径 $R_{\oplus}$ 参数化为 $H = h/R_{\oplus}$ 。

Starlink 卫星所探测的昼侧光通量由两部分组成,具体取决于卫星相对于地球晨昏线的位置,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。橙色区域 G_1 表示卫星太阳能板位于本地地平线以内、从卫星正下方到晨昏线范围内,接收的地球

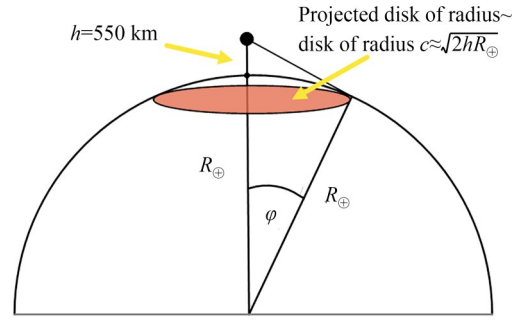


图 3 低轨卫星观测平面示意图

Fig. 3 Observation plane schematic of a LEO satellite

反射太阳光部分。黄色区域 G_2 则对应卫星本体以各向同性方式受到的昼侧地球反射光照部分^[14]。

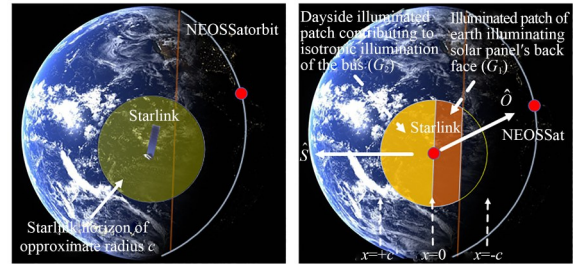


图 4 左图:Starlink 卫星观测地平线圆盘,右图:主要地球光源 G_1 和 G_2

Fig. 4 Left: Starlink horizon view; Right: Main earth light sources G_1 and G_2

当 Starlink 卫星的相位角大于 90° 时,卫星主要处于昼侧,其位置位于地球昼侧,所接收到的辐射能不仅来自太阳的直接照射,还受到地球反射光的显著影响,因此其光照条件由太阳直射光与地球反射光共同决定。对应的昼侧光度模型可表示为^[15]:

$$R_{\oplus} \approx \frac{F_{\text{sun}}}{\pi} a_{\oplus} \langle \hat{n} \cdot \hat{s} \rangle \left\{ 2 \int_0^{\sqrt{\frac{2}{H}}} \int_0^{\sqrt{\frac{2}{H}-X^2}} \frac{dXdY}{(1+X^2+Y^2)^{3/2}} \right\}, \quad (3)$$

$$M_{\varphi > 90^\circ} = M_{\text{Sun}} - 2.5 \lg \left(\frac{1}{\pi} \cdot a_{\oplus} \langle \hat{n}_{\text{patch}} \cdot \hat{s}_{\text{patch}} \rangle \right) - 2.5 \lg(Q_1) - 2.5 \lg \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{Dha_{\text{bus}}}{R^2} \right) - 2.5 \lg \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a_{\text{spback}} A_{\text{spback}} \cos(\varphi - \pi)}{R^2} \right) - 2.5 \lg(Q_{\text{total}}) - 2.5 \lg \left(\frac{1}{\pi} \cdot \frac{a_{\text{bus}} A_{\text{bus}} F_{\text{bus}}(\varphi)}{R^2} \right), \quad (4)$$

其中: $X = x/h$, $Y = y/h$, $H = h/R_{\oplus}$ 。公式(3)中大括号内的双重积分表示地球光照系数 Q_1 。在

对公式(3)进行数值积分后,视角因子 Q_1 可近似为 $Q_1 \approx 2.54 \cdot (1 - e^{X/1.1})$, 其中 $X = x/h$ 是从

Starlink子卫星点到地球晨昏线的线性距离相对于圆柱型卫星本体高度 h 的归一化距离。这里的 $a_{\oplus}$ 是地球反照率,使用的是地球反照率的全球平均值 $a_{\oplus}=0.3$ 。 $\hat{n}_{\text{patch}}$ 和 $\hat{s}_{\text{patch}}$ 分别是卫星位置向量和太阳向量在地心惯性坐标系中的单位向量, a_{spback} 是太阳能板面朝空间侧的反照率, A_{spback} 是太阳能板的面积(约 30 m^2), Q_{total} 是 Q_1 和 Q_2 的总和, D 是圆柱本体的直径, a_{bus} 是圆柱本体的反照率^[16-17]。

3 结果与分析

为了加强对不断增长的近地轨道卫星群光度特性的分析,本研究基于NEOSSat获取的短时光学观测轨迹,对约250颗Starlink卫星进行了特征分析,总共包含超过1400次观测,如图5所示^[18]。表1总结了NEOSSat卫星上搭载的相机及探测器系统的主要参数。

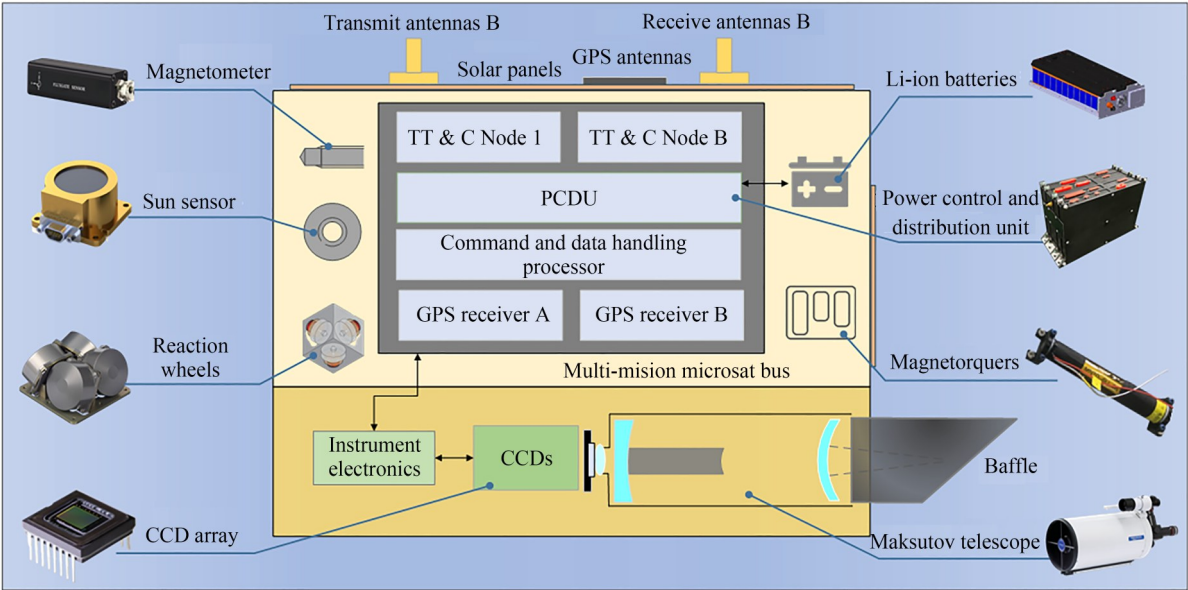


图 5 NEOSSat载荷与平台分布示意图
Fig. 5 Schematic diagram of NEOSSat payload and platform distribution

表 1 NEOSSat 卫星搭载相机与探测器系统的主要参数
Tab. 1 Main parameters of the onboard camera and detector system of the NEOSSat satellite

Parameter	Specification
Telescope	Rumak-Maksutov
Aperture diameter	157 mm
Focal length	893 mm (f/5.7)
FOV	0.85° × 0.85°
Detector	Two 1 024 × 1 024 pixels CCD arrays
Spectral range	350~1 050 nm

本研究比较了不同轨道构型对卫星光度学的影响,并揭示了从空间视角观察到的卫星亮度规律。结果表明,Starlink卫星在低相位角(夜侧)和高相位角(日侧)条件下的光度特性均表现出高度稳定性,说明无论卫星是否被阳光照亮或处于黑暗中,其反射亮度分布均相对一致^[19]。这一比较不仅有助于完善卫星观测的缓解策略,还能辅助在强背景光照条件下探测微弱空间目标,为天文学界的光学观测提供支持^[20]。表2概述了所研究卫星的相关参数。

表 2 Starlink 各版本卫星的参数
Tab. 2 Parameters of different versions of Starlink satellites

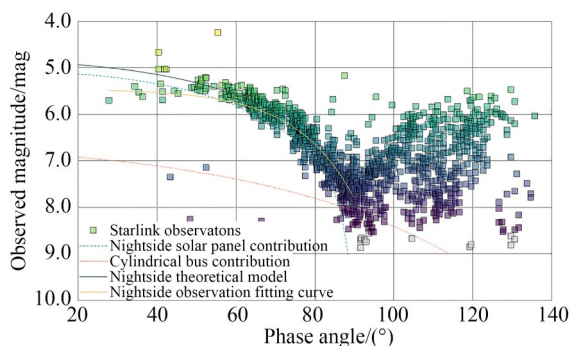
Constellation	Number	Orbital altitude /km	Inclination /(°)	Maximum cross-sectional area/m ²
Starlink V1.0	1 584	550	53	2.8
Starlink V2.0	4 060	604	148	17.3
VisorSat	533	580	70	10.5

3.1 天基观测 Starlink 的光度特性

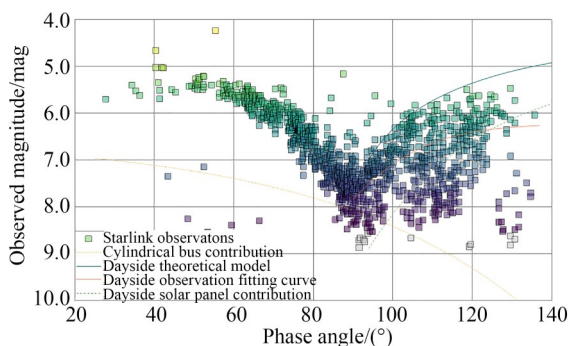
基于前述夜侧模型,图6(a)展示了与实测 Starlink 数据最为匹配的拟合结果。模型参数设定为太阳能板表面反射率 a_{sp} 为 2%, 太阳能板面积 A_{sp} 为 30 m^2 , 卫星本体反射率 $a_{bus} \approx 0.7$, 其几何尺寸约为 $3 \text{ m} \times 1.25 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 。拟合结果显示,该模型能够较好地预测相位角 φ 在 $40^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的天基光度观测数据^[29]。模型与实际测量数据的良好一致性表明,在观测期间,Starlink 卫星的太阳能板大致保持朝向太阳。图6(a)中的黄色实线代表 NEOSSat 对 Starlink 典型星等测量数据的拟合结果(彩图见期刊电子版)。可以看出,在相位角 $\varphi < 90^\circ$ 的夜侧观测条件下,星等随相位角增加呈现出显著的升高趋势。

图6(b)表明,相较于 Starlink 太阳能板的镜面反射光以及高相位角条件下本体的漫反射贡献,圆柱本体的各向同性反射分量在整体光度中占比很小。基于此,在模型构建过程中,对于相

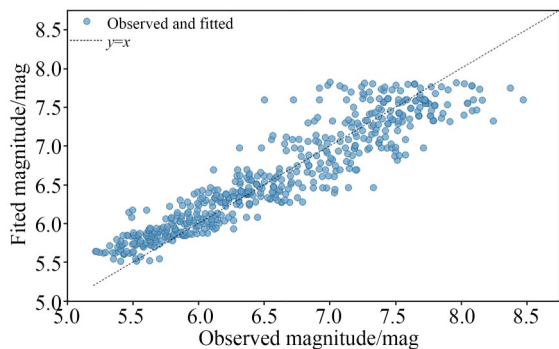
位角较高的昼侧观测情形,可忽略本体各向同性项的影响,重点考虑太阳能板的镜面反射与本体的漫反射贡献。图中还展示了 NEOSSat 获取的 Starlink 特征星等数据及其拟合结果。分析结果显示,当相位角 $\varphi > 90^\circ$ 时,即在昼侧观测条件下,目标星等随相位角增加显著降低。图6(c)和图6(d)分别展示了夜侧与昼侧模型中实测星等与拟合星等之间的对应关系,用以验证模型的精度与可靠性。从图6(c)可见,夜侧数据点总体分布在理想线($y=x$)附近,相关性较高,决定系数 $R^2=0.852$, 均方根误差 $RMSE=0.299 \text{ mag}$, 表明模型在夜侧观测条件下能够较准确地再现 Starlink 卫星的亮度变化趋势。图6(d)为昼侧模型的验证结果。昼侧模型的拟合精度相对较低,数据点在理想线附近分布较为分散, $R^2=0.544$, $RMSE=0.346 \text{ mag}$ 。这种差异主要是在昼侧观测时,太阳能板的镜面反射起主要作用,亮度随入射角变化显著。



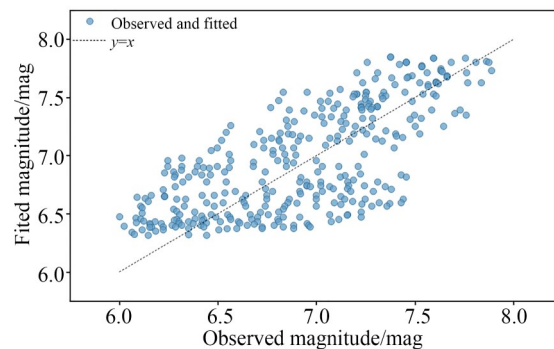
(a) 夜侧Starlink光度测量分析
(a) Photometric analysis of night-side starlink observations



(b) 昼侧Starlink光度测量分析
(b) Photometric analysis of day-side starlink observations



(c) 夜侧模型下观测与拟合星等的相关性
(c) Correlation between observed and fitted magnitudes (Night-Side)



(d) 昼侧模型下观测与拟合星等的相关性
(d) Correlation between observed and fitted magnitudes (Day-Side)

图6 Starlink 光度测量的夜侧和昼侧模型分析

Fig. 6 Starlink photometry: nightside and dayside models

Starlink 位于地球昼侧的相对位置可通过角度 ξ 进行量化,该角度定义为从 Starlink 子卫星点 (sub-satellite point) 至晨昏线之间的偏转角,其计算公式为^[21]:

$$\xi = 90 - \arccos(\hat{n}_{\text{patch}} \cdot \hat{s}_{\text{patch}}) \approx -\frac{x}{R_{\oplus}}. \quad (5)$$

图 7 展示了基于不同观测方向与晨昏线夹角 ξ 的昼侧光度拟合模型结果。模型拟合曲线表明,随着地球昼侧相位角的增大,Starlink 卫星亮度的主要贡献来源于其太阳能板背面的反射。夹角 ξ 所对应的照明曲线反映了 Starlink 卫星在昼侧观测条件下的光度变化特性^[21]。可以看出,随着该夹角的增大,模型预测的卫星亮度逐渐减弱。这表明在昼侧观测条件下,Starlink 的主要亮度贡献来源为太阳能板背面的镜面反射,而这种反射强度对观测几何和入射角变化十分敏感。因此,该模型能有效表征昼侧观测几何对卫星亮度的影响,为理解卫星在高相位角条件下的反射特性及其对地基观测干扰提供了依据,同时也可作为卫星表面反射特性优化及低可见性设计提供参考,从而在设计阶段降低卫星对地基观测的潜在影响。

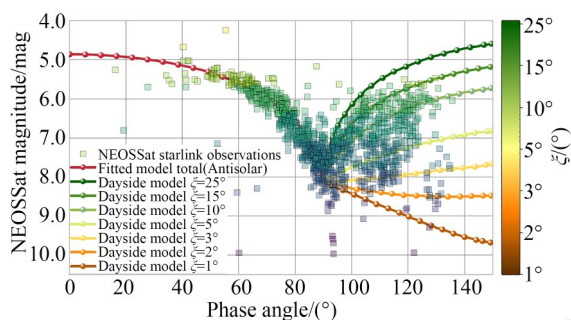


图 7 Starlink 在不同 ξ 角下的夜侧与昼侧光度模型

Fig. 7 Starlink nightside and dayside photometry under varying ξ angles

本文图 6 和图 7 所示的卫星光度变化规律与多项代表性研究结果高度一致。Tregloan-Reed 等^[8]对 Starlink Darksat 的观测表明,其夜侧星等分布在 5~8.5 等之间,且随相位角增大逐渐变暗,与本文夜侧模型(4~9 等)的变化趋势相符。Mallama 等^[22]基于 10 万次可见光观测指出,Starlink 卫星夜侧星等范围为 4~9 等,平均分布于 5.5~7.5 等,进一步印证了本文模型的相位角依

赖特性。Cole 等^[11]的研究给出了平均星等 5.5 ± 0.13 ,夜侧范围为 4~8 等,同样验证了本文结果的可靠性与一致性。

此外,NEOSSat 的在轨观测研究也对部分我国低轨卫星及运载器碎片进行了光学测量。Scott 等^[23]基于 NEOSSat 数据,对 345 次近地交会事件进行了系统分析,观测对象包括风云一号 C (Feng Yun-1C) 碎片和长征四号 (CZ-4) 火箭残骸等中国来源的空间目标,并给出了其光度变化范围(约 9~12 等)及接近几何特征。该研究表明,NEOSSat 数据中已包含我国 LEO 目标的实测记录,为后续基于实测数据建立更精确的卫星光度模型提供了重要参考。

3.2 地基多波段光学卫星轨迹观测的模拟分析

在前述天基光度观测数据基础上,本文进一步开展了针对不同版本 Starlink 卫星的多波段地基观测研究。此类观测需明确各目标的轨道层级、轨道倾角及卫星数量,并综合考虑观测方向、观测波段与曝光时间等关键参数。本文通过构建卫星与观测场景,对探测器在 i, g 和 r 波段及不同曝光时间条件下的卫星轨迹平均观测数量进行了模拟分析。

仿真过程中,卫星在成像帧上通常表现为明显轨迹。通过多次仿真平均结果,可有效减弱轨迹数量的波动,提高观测结果的稳定性与统计可靠性^[24-25]。图 8 展示了在 i, g 和 r 波段,针对不同观测时间与观测条件所进行的离散模拟结果。模拟假设卫星分布于两个轨道层,每层包含 72 个轨道面,每个轨道面部署 22 颗卫星,轨道高度为 500 km,轨道倾角为 53° 。在每组模拟中,统计了特定曝光时间下,垂直指向天顶的圆形视场内可见的卫星轨迹数量,并通过大量重复模拟计算其平均值,以提高统计稳定性。

仿真结果表明,卫星轨迹数量与观测波段范围及曝光时间密切相关(如图 8 中实心点所示)^[26],该关系可通过以下简化表达式进行近似建模:

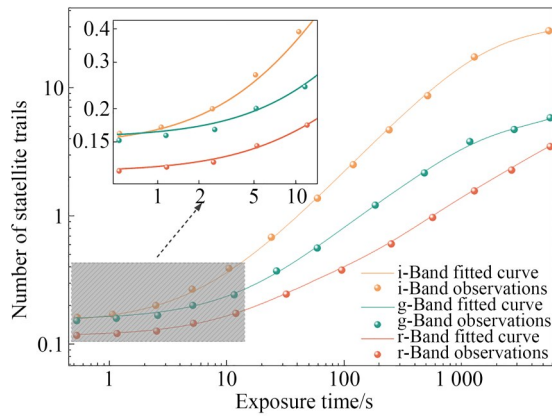
$$N_{\text{trail}} = \rho_{\text{sat}} (A_{\text{fov}} + L_{\text{fov}} \omega_{\text{sat}} t_{\text{exp}}), \quad (6)$$

其中: ρ_{sat} 表示瞬时卫星密度,即单位天区面积内的卫星数量, ω_{sat} 表示沿曝光方向的卫星角速度。曝光参数包括视场面积 A_{fov} 、视场宽度 L_{fov} 以及有效曝光时间 t_{exp} ^[27-28]。为了与仿真结果进行对比,

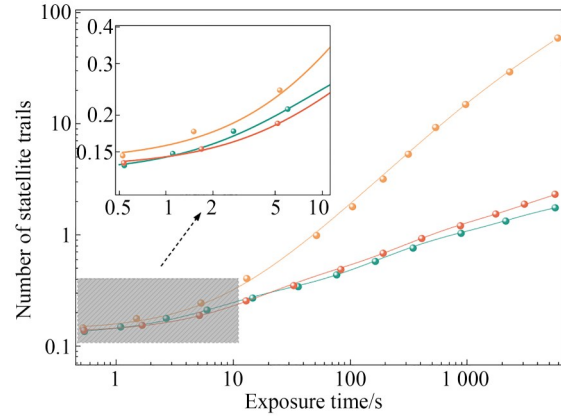
这里采用圆形视场,其视场半径为 R_{fov} ,因此 $A_{\text{fov}} = \pi R_{\text{fov}}^2$, $L_{\text{fov}} = 2R_{\text{fov}}$ 。

仿真结果提供了瞬时卫星密度 ρ_{sat} 和平均角速度 ω_{sat} 。基于这些参数,公式(6)能够预测不同观测条件下的卫星轨迹数量。预测结果与仿真数据基本一致,但在曝光时间较短时,由于轨迹数量较少,仿真结果表现出一定的波动。针对 Darksat 和 VisorSat 的预测显示,其轨迹数量较低,其中 i 波段轨迹最多,其次为 r 波段, g 波段最少。

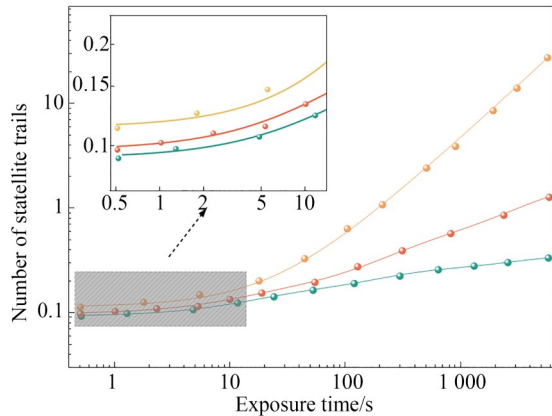
基于上述地基观测模拟结果,可有效减轻卫星星座对天文观测的干扰,并优化地基天文台的观测策略。地基观测设备可采用动态调整曝光时间的方法,以抑制卫星拖尾对像元信噪比的影响。具体而言,可根据拖尾信噪比与曝光时间平方成反比的关系,在卫星轨迹密集期确定最优曝光时间上限,避免像素饱和,并结合卫星亮度的相位角依赖特性,预估卫星过境高峰期。同时,优先选择近红外波段进行观测,以降低可见光波段的反射亮度干扰。这些策略可减少干扰轨迹数量,从而提升观测数据的可用性。



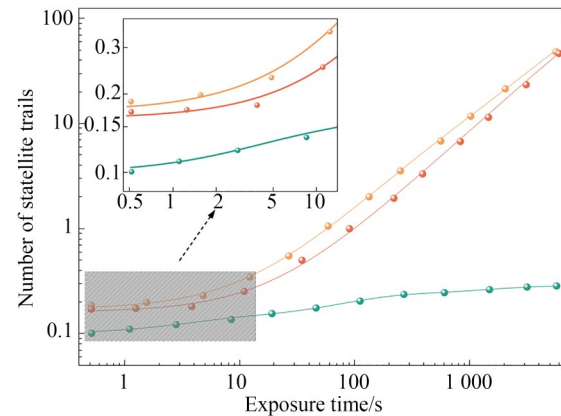
(a) Darksat 卫星轨迹观测分析
(a) Trajectory observation analysis of darksat



(b) VisorSat 卫星轨迹观测分析
(b) Trajectory observation analysis of visorsat



(c) V1.5Starlink 卫星轨迹观测分析
(c) Trajectory observation analysis of V1.5Starlink



(d) V2.0Starlink 卫星轨迹观测分析
(d) Trajectory observation analysis of V2.0Starlink

图 8 可见卫星轨迹数量与曝光时间 t_{exp} 和波段范围的关系,实线表示基于公式(6)计算的预测结果

Fig. 8 Number of visible satellite tracks as a function of exposure time t_{exp} and band range. The solid line represents the prediction result calculated based on Eq. 6

3.3 地基多视场光学卫星观测实验与分析

基于几何照明与反射模型,本文分析了空间

观测条件下卫星相位角与视星等之间的关系。结果表明,卫星的视星等主要集中在 6~8 等范围

内。本研究进一步探讨了地基光学系统在不同探测星等极限条件下的观测能力。在本节中,利用望远镜和 sCMOS 相机系统设计并开展了一项地基观测实验,旨在分析在不同探测星等极限条件下可观测目标数量的变化,并比较不同视场配置(单视场与双视场)对观测能力的影响。探测星等极限是指在特定观测条件下,观测系统所能探测到的最暗天体^[29-30]。为调节探测星等极限,本实验通过改变曝光时间来实现不同的探测极限。

探测星等极限可以通过理论模型和经验公式进行估算。一般来说,望远镜系统的探测星等极限可表示为^[31-32]:

$$m_{\text{lim}} = -2.5 \log_{10} \left(\frac{N_{s, \text{min}}}{F_0 \cdot A \cdot T \cdot \eta} \right), \quad (7)$$

其中: $N_{s, \text{min}}$ 表示由信噪比条件决定的最小可探测光子数, F 为到达望远镜口径单位面积的光子通量(单位为 $\text{photons}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$), D 为望远镜口径直径(单位为 cm), A 为有效口径面积, T 为曝光时间(单位为 s), η 为系统总体效率(包括大气透过率、反射镜反射率、探测器量子效率等)。该公式反映了探测星等极限随口径、曝光时间及大气条件变化的规律。

实验观测系统由一台短焦望远镜和一台 sCMOS 相机组成。主要设备参数列于表 3 中。相机由计算机控制以进行连续曝光,曝光时间范围为 $1 \sim 500 \text{ ms}$ 。实验在夜间低光污染环境中进行,观测的天空区域位于天顶附近,以最大程度减小大气消光的影响。

表 3 实验设备参数配置

Tab. 3 Experimental equipment parameter configuration

Parameter	Specification
Telescope aperture	80 mm
Focal length	400 mm
Imaging band	380~780 nm
Detector model	Andor ZYLA 5.5

实验包括两种观测模式:单视场模式和双视场模式。在单视场模式下,采用单台望远镜-相机系统观测固定方向;在双视场模式下,两套相同的光学系统并排安装在同一支架上,光轴间隔

约为 5° ,分别指向相邻的天空区域。该配置可同时成像两个相邻的天区,从而扩大有效观测覆盖范围。在实验过程中,首先通过恒星标定确定系统的探测星等极限,在不同曝光时间下连续拍摄图像,并利用恒星目录匹配方法(如 Gaia DR3 数据库)自动识别并统计可探测到的恒星数量^[33]。最后,计算每种条件下的平均可观测目标数。

图 9 分别给出了单视场与双视场条件下的实验结果。可以看出,随着系统探测星等极限的提高(对应于更长的曝光时间或更高的探测灵敏度),平均可观测目标数量显著增加。当探测星等极限由 4 等提升至 7 等时,单视场模式下的平均可观测目标数量增加了约 3 倍。而在双视场模式下,由于有效视场范围的扩大,在相同条件下探测到的目标数量约为单视场模式的 2 倍。

基于前述对空间观测 Starlink 卫星的分析可知,当相位角在 $20^\circ \sim 140^\circ$ 范围内时,近地轨道卫星(如 Starlink)的视星等主要分布在 6~8 等。单视场实验结果表明,当系统探测星等极限达到 6 等时,系统能够观测到数量较多的目标,说明其具备探测典型近地轨道卫星的能力。在相同条件下,双视场系统的可观测目标数量明显高于单视场配置。此外,为观测相同数量的目标,多视场配置可使用更小的视场和更低的探测星等极限。该性能提升主要归因于有效观测角度的扩大,使更多目标能够同时进入成像范围。此外,双视场系统还增强了探测的稳定性和连续性,为多目标观测和卫星监测应用提供了显著优势。

基于上述地基多视场光学卫星观测实验结果,当探测星等极限大于 8 等时,双视场配置可显著提高观测覆盖率,为地基天文台提供优化策略以减轻卫星干扰。因此,观测系统可采用双视场或多视场布局,以扩大观测范围,特别适用于卫星密集区域的观测任务。在参数调节方面,建议将系统探测星等极限动态控制在 5~8 等区间,该范围既覆盖 Starlink 卫星的主要星等分布(6~8 等),又能避免探测星等极限过高引起的背景干扰增强。通过上述策略,可降低卫星星座对地基观测的干扰,为天文监测任务开展提供理论及数据参考。

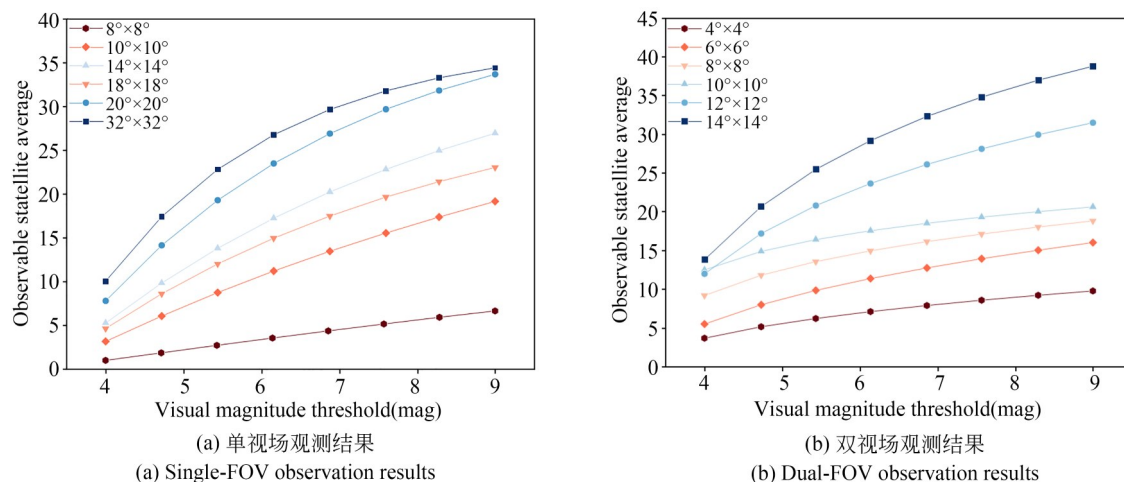


图 9 不同视场尺寸下单视场与双视场探测器的平均可观测恒星数量

Fig. 9 Average number of observable stars for single- and dual-field star sensors under different FOV sizes

4 结 论

本文以低轨卫星为目标,系统研究了低轨巨型星座在地基与天基观测中的光度特性与干扰规律,建立了昼侧与夜侧光度模型,并结合轨道几何与光学仿真开展多源观测分析。基于 NEOSat 天基测光数据的模型能够较准确描述卫星亮度随相位角变化的规律,其中夜侧模型拟合优度 $R^2 = 0.85$,昼侧为 $R^2 = 0.54$ 。对 412 颗卫星分析显示平均视星等约为 6.9 ± 0.9 等,夜侧卫星太阳能板基本保持朝向太阳,为分析卫星亮度及其对观测的干扰影响提供了定量依据。

地基仿真与多视场实验揭示了巨型星座对光学观测的干扰特性。仿真表明,卫星尾迹数量随曝光时间近线性增加,超过 100 s 时尾迹显著增多且信噪比下降,说明长曝光观测受干扰较大。结合拖尾信噪比与曝光时间平方反比关系,可在卫星密集期确定最优曝光时间,避免像素饱和,并利用相位角依赖预测过境高峰期,同时优

先选择近红外波段降低可见光反射干扰。多视场实验显示,合理配置双视场可将可观测目标数提升约 2 倍,探测星等极限动态控制在 5~8 等区间可在保证卫星亮度覆盖的同时抑制背景干扰。本方法提高了大规模卫星星座光度评估的效率,相比传统依赖高性能测光设备或复杂仿真的方法,本方法操作简单且适用灵活,可快速评估巨型星座对地面光学观测的影响。

作者贡献声明:

艾宏旭:测量方法的提出,论文构思和撰写;

纪珍辰:测量实验的设计及数据整理和分析;

赵若彤:论文的编辑写作;

韩圆:测量实验数据分析;

姚家琦:论文审核;

王文杰:论文审核;

李文:实验人员的协调和实验设备的管理;

孙志斌:提供场地、实验资源与论文指导。

参考文献:

- [1] PAN G T, DENG X Q, GAO R H, *et al.* Multi-parameter optimisation of optical bonding for the ultra-stable optical measurement bench in space-based platform [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 188: 112977.
- [2] ZHANG Z Q, TONG S F, LIN P, *et al.* Research

on the influence mechanism of angular misalignment on the transmission performance in inter-satellite coherent laser communication[J]. *Optics Communications*, 2025, 583: 131685.

- [3] 黄成, 邱志聪, 许家忠. 地月环境下航天器近距离接近自主决策[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(6): 979-992.

HUANG C, QIU Z C, XU J Z. Autonomous deci-

- sion-making for spacecraft close approaches in the Earth-Moon environment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(6): 979-992. (in Chinese)
- [4] 李峰, 万秋华, 刘萌萌, 等. 低轨光学卫星同轨立体成像姿态规划与控制方法[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(14): 1682-1693.
- LI F, WAN Q H, LIU M M, *et al.* Attitude planning and control method of low-orbit optical satellite along-track stereoscopic imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(14): 1682-1693. (in Chinese)
- [5] TANG R F, LI Z L, LI Y Q, *et al.* Light curve measurements with a superconducting nanowire single-photon detector [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5488-5491.
- [6] GRUNTMAN M. Passive optical detection of sub-millimeter and millimeter size space debris in low Earth orbit[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 105(1): 156-170.
- [7] CHEN B E, XIONG J N. The platform design of space-based optical observations of space debris[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2017, 41(1): 109-124.
- [8] TREGLOAN-REED J, OTAROLA A, ORTIZ E, *et al.* First observations and magnitude measurement of starlink's darksat [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 637: L1.
- [9] BASSA C G, HAINAUT O R, GALADÍ - ENRÍQUEZ D. Analytical simulations of the effect of satellite constellations on optical and near-infrared observations[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, 657: A75.
- [10] HAINAUT O R, WILLIAMS A P. Impact of satellite constellations on astronomical observations with ESO telescopes in the visible and infrared domains[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 636: A121.
- [11] HALFERTY G, REDDY V, CAMPBELL T, *et al.* Photometric characterization and trajectory accuracy of Starlink satellites; implications for ground-based astronomical surveys [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022, 516(1): 1502-1508.
- [12] MRÓZ P, OTAROLA A, PRINCE T A, *et al.* Impact of the SpaceX starlink satellites on the zwicky transient facility survey observations [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2022, 924(2): L30.
- [13] RAGAZZONI R. The surface brightness of Mega-Constellation satellite trails on large telescopes[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2020, 132(1017): 114502.
- [14] ZHANG T C, LI Z X, DUAN C J, *et al.* Design of a high-power nanosecond electromagnetic pulse radiation system for verifying spaceborne detectors [J]. *Sensors*, 2024, 24(19): 6406.
- [15] TYSON J A, IVEZIĆ Ž, BRADSHAW A, *et al.* Mitigation of LEO satellite brightness and trail effects on the Rubin observatory LSST [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 160(5): 226.
- [16] TREGLOAN-REED J, OTAROLA A, UNDA-SANZANA E, *et al.* Optical-to-NIR magnitude measurements of the Starlink LEO Darksat satellite and effectiveness of the darkening treatment [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 647: A54.
- [17] LIU L, SUN R Y, ZHAO H. Identification of megaconstellations in wide-field astronomical images with machine learning [J]. *The Astronomical Journal*, 2025, 169(4): 205.
- [18] HU Y P, HUANG J Y, CHEN L. Space-based visible observation strategy for beyond-LEO objects based on an equatorial LEO satellite with multi-sensors [J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(7): 1751-1762.
- [19] ZHANG Y Q, JIANG H L, SONG Y S, *et al.* Research on angular displacement detection technology of inter-satellite laser communication based on coherent system [J]. *Optics Communications*, 2025, 574: 131050.
- [20] YUE P Y, DU J H, ZHANG R, *et al.* Collaborative LEO satellites for secure and green Internet of remote things [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(11): 9283-9294.
- [21] 童鑫, 曲友阳, 刘洁冰, 等. 低轨光学卫星相控阵数传期间太阳光规避方法[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(6): 822-832.
- TONG X, QU Y Y, LIU J B, *et al.* Sunlight avoidance planning method for data transmission with phased array of low-earth orbit optical satellites [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(6): 822-832. (in Chinese)
- [22] MALLAMA A, HORNIG A, COLE R E, *et al.* Assessment of Brightness Mitigation Practices for Starlink Satellites[J]. *arXiv preprint arXiv*: 2023.
- [23] SCOTT R L, THORSTEINSON S, ABBASI

- V. On-orbit observations of conjuncting space objects prior to the time of closest approach[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 2020, 67(4): 1735-1754.
- [24] HORIUCHI T, HANAYAMA H, OHISHI M. Simultaneous multicolor observations of starlink's darksat by the murikabushi telescope with MIT-SuME[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 905(1): 3.
- [25] ZHI H, JIANG X J, WANG J F. Multicolour photometry of LEO mega-constellations starlink and OneWeb[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2024, 530(4): 5006-5015.
- [26] PARK J, MOON S M, LIM J, *et al.* A Ka-Band CMOS beamforming Front-End IC for RF inter satellite link system[C]. 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). October 19-21, 2022, Jeju Island, Korea, Republic of. IEEE, 2022: 184-186.
- [27] LIU X, CHEN Y Z, WANG L Q, *et al.* Research on high-precision resonant capacitance bridge based on multiple transformers[J]. *Sensors*, 2024, 24(12): 3844.
- [28] GUO L, RAO P, CHEN X, *et al.* Infrared differential detection and band selection for space-based aerial targets under complex backgrounds[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, 138: 105172.
- [29] BUZZONI A. Wide-field optical tracking of LEO objects: Theoretical assessment and observing strategy[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(10): 4990-5005.
- [30] LI Z X, CAO B F, ZHANG W J, *et al.* Locating strong electromagnetic pulses recorded by a single satellite with cluster analysis and worldwide lightning location network observations [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(23): 4442.
- [31] HU Y P, BAI X Z, CHEN L, *et al.* A new approach of orbit determination for LEO satellites based on optical tracking of GEO satellites [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 84: 821-829.
- [32] YANAGISAWA T, KUROSAKI H, ODA H, *et al.* Ground-based optical observation system for LEO objects [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(3): 414-420.
- [33] SHAKUN L, KOSHKIN N, KOROBAYNIKOVA E, *et al.* Comparative analysis of global optical observability of satellites in LEO[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 67(6): 1743-1760.

作者简介:



艾宏旭(2000—),男,山东济南人,现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生,主要研究方向为空间目标探测与识别。E-mail: ahx072312@163.com

通讯作者:



孙志斌(1978—),男,山西运城人,现为中国科学院大学博士生导师,中国科学院国家空间科学中心复杂航天系统电子信息技术重点实验室研究员,主要研究方向为信息光电子学与空间科学仪器技术。E-mail: zbsun@nssc.ac.cn