

编者按 为系统总结“十四五”期间中国微波遥感领域取得的突破性进展,前瞻性谋划“十五五”及更长时期的发展路径,并充分发挥微波遥感技术对国家重大战略需求的支撑作用,《空间科学学报》联合中国空间科学学会空间遥感专业委员会、空间地球科学专业委员会,特邀施建成、董晓龙、林明森、卢乃锰、张云华担任执行主编,贾永君、徐娜、张德海、仇晓兰、胡斯勒图、徐丰、程晓、杨晓峰、雷洋担任执行副主编,精心策划推出“星瞰地球:微波遥感技术与应用前沿进展”专题,相关论文将陆续在本刊刊出。

LU Wenqiang, CHEN Ran, XU Na, MENG Xiangguang, LIAO Mi, LIU Yan, TANG Qi, CHENG Yan, YANG Guanglin, HU Xiuqing, ZHAO Xiangang, SUN Yueqiang. Occultation Distribution and Collaborative Observations of Fengyun Meteorological Satellites and Commercial Satellites (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, 46(3): 692–706. CSTR:32142.14.cjss.2025–0213. DOI:10.11728/cjss2026.03.2025–0213

空间地球科学

风云气象卫星与商业卫星的掩星 分布与协同观测*

鲁文强^{1,2,3} 陈冉^{4,5} 徐娜^{1,2,3} 孟祥广^{4,5}
廖蜜^{1,2,3} 刘艳⁶ 唐琪⁷ 程艳⁸
杨光林^{1,2,3} 胡秀清^{1,2,3} 赵现纲^{1,2,3} 孙越强^{4,5}

1(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心 北京 100081)

2(许健民气象卫星创新中心 北京 100081)

3(中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室 北京 100081)

4(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

5(中国科学院大学 北京 100049)

6(中国气象局地球系统数值预报中心 北京 100081)

7(航天天目(重庆)卫星科技有限公司 重庆 401332)

8(天津云遥宇航科技有限公司 天津 300452)

摘要 GNSS 无线电掩星技术是构建全球高精度大气与电离层探测体系的关键手段。中国风云三号业务化掩星系统数据质量高、稳定性强、标准化程度高,然而受其轨道构型限制,在赤道和极区仍存在覆盖不足的问题。近年来,天目、云遥等商业掩星星座的快速发展,为通过多源协同观测提升掩星数据时空密度提供了新的可能。基于风云三号、天目星座和云遥星座的实测掩星数据,系统评估三类星座的空间分布特征及其联合观测效益。结果表明,引入商业星座能够显著增加全球掩星事件数量,增强对低、高纬度区域的覆盖能力,并将地方时覆盖从分时段分布提升至近全天时连续分布。尽管观测密度整体提升,中纬度局部地区仍存在数据过度集中和高分辨率下的观测空白,反映出轨道构型与星座协同规划尚需进一步优化。研究为中国风云系列与商业掩星星座的协同发展提供了关键参考。

* 国家自然科学基金项目资助 (U2442216)

2025-12-10 收到原稿, 2026-03-17 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

关键词 GNSS 无线电掩星, 风云气象卫星, 商业卫星星座, 联合观测, 轨道布局

中图分类号 TP701

Occultation Distribution and Collaborative Observations of Fengyun Meteorological Satellites and Commercial Satellites

LU Wenqiang^{1,2,3} CHEN Ran^{4,5} XU Na^{1,2,3} MENG Xiangguang^{4,5}
LIAO Mi^{1,2,3} LIU Yan⁶ TANG Qi⁷ CHENG Yan⁸ YANG Guanglin^{1,2,3}
HU Xiuqing^{1,2,3} ZHAO Xiangang^{1,2,3} SUN Yueqiang^{4,5}

¹(National Satellite Meteorological Center/National Center for Space Weather, Beijing 100081)

²(Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081)

³(Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081)

⁴(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

⁵(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

⁶(Earth System Modeling and Prediction Centre, China Meteorology Administration, Beijing 100081)

⁷(Aerospace Tianmu (Chongqing) Satellite Science and Technology Co., Ltd., Chongqing 401332)

⁸(Tianjin Yunyao Aerospace Technology Co., Ltd., Tianjin 300452)

Abstract GNSS Radio Occultation (RO) serves as a key technique for constructing a global high-precision atmospheric and ionospheric sounding capability. China's operational Fengyun-3 (FY-3) RO system produces data of exceptional quality, characterized by high accuracy, stability, and standardization, making it the current accuracy benchmark in RO sounding. However, due to its orbital configuration, the FY-3 system alone still exhibits coverage gaps in equatorial and polar regions. In recent years, the rapid development of commercial constellations such as Tianmu and Yunyao has enabled multi-source RO cooperative observations, offering a promising approach to enhance the spatiotemporal density of RO data. Based on RO measurements from the FY-3, Tianmu, and Yunyao constellations, this study systematically evaluates the spatial distribution characteristics and joint observation benefits of the three systems. Results demonstrate that integrating commercial constellations significantly increases the number of global RO events and improves coverage at low and high latitudes. Local time coverage is also enhanced from segmented intervals to nearly continuous throughout the day. Despite the considerable improvement in observational density, data overconcentration in certain mid-latitude areas and small-scale gaps under high-resolution analysis remain, indicating that orbital configurations and constellation coordination require further optimization. This study provides quantitative references for the future collaborative development of China's FY-3 and commercial RO constellations.

Key words GNSS radio occultation, Fengyun meteorological satellites, Commercial satellite constellation, Joint observation, Orbital configuration

0 引言

GNSS 无线电掩星 (Radio Occultation, RO) 技术是一种通过分析 GNSS 信号在穿越地球大气层时产生的路径弯曲和延迟, 反演大气折射率垂直分布的高精度探测手段^[1]. 基于其折射率信息, 可进一步获取温度、气压、湿度以及电离层电子密度等关键气象与空间环境参数, 具备长期稳定、无需定标的特点. 掩星数据的垂直分辨率高达百米量级, 可精细刻画大气层的垂直结构. 此外, 由于其基于时间测量, 且信号不受云、降水等天气条件影响, 掩星数据具备高精度、高稳定性与长期一致性, 能够为气候研究提供具备绝对基准的高质量数据集^[2]. 同时还具有全天时、全天候连续观测的能力, 不受昼夜和恶劣天气限制. 凭借上述优势, 该技术已在多个关键领域发挥了重要作用, 包括数值天气预报中的数据同化^[3]、气候变化监测^[4], 以及空间天气中的电离层探测^[5]. 其应用有效提升了天气系统分析的准确性和极端事件的预报能力, 并推动了高可靠性气候基准数据集的建设.

该技术起步于 20 世纪末的 GPS/MET 试验任务, GPS/MET 在轨运行了两年时间, 获得很多宝贵的观测资料. 利用 GPS/MET 掩星数据, 成功反演得到中性大气 0~60 km 高度的大气参数剖面, 验证了其基本原理的可行性^[6]. 随后 CHAMP^[7] 与 GRACE^[8] 等卫星任务持续推进其向业务化应用转化. 2006 年发射的 COSMIC-1 六星座首次实现了掩星探测的业务化运行, 被视为掩星技术发展的重要里程碑^[9]. 近年来, 以 COSMIC-2^[10] 和 Sentinel-6/Jason-C^[11] 为代表的新一代卫星任务进一步提升了其全球覆盖能力和数据质量, 而欧洲 MetOp 系列卫星搭载的 GRAS 仪器也能够持续提供稳定的业务化掩星观测数据^[12].

中国掩星探测虽然起步较晚, 但是发展迅速, 目前已形成清晰的业务化发展路线. 风云三号系列卫星是其中的核心承载平台. FY-3C 卫星率先搭载中国首个业务化 GNOS-I 掩星探测仪, 实现了从无到有的突破^[13]. 后续的风云-3D 卫星延续并优化了 GNOS-I 的性能, 确保了观测数据的高质量与稳定性^[14]. 技术的迭代在 FY-3E 卫星上得到体现, 其作为首颗晨昏轨道气象卫星, 搭载了性能更为先进的 GNOS-II 型掩星探测仪, 在对全球中性大气和电离层的探测精度与

数量上均实现显著提升. 此后, FY-3F (上午轨道) 与 FY-3G (倾斜轨道) 卫星的加入, 标志着中国具备了全球范围内全天候、高时空分辨率的大气、降水和空间环境综合探测能力, 进入了业务化应用的新阶段^[15,16].

近年来, 小卫星以其研制周期短、研制成本低、发射方式灵活以及可通过星座组网提升观测密度等方面的巨大优势, 取得迅速发展^[17]. 2025 年 8 月 27 日, 中国气象局印发《关于促进商业气象小卫星发展与应用的指导意见》, 首次明确构建风云卫星为主、商业小卫星为辅的天基观测体系. 该指导意见从促进有序发展、优化数据政策、提供技术支撑、鼓励协同创新四方面进行了部署, 为商业气象小卫星发展提供了政策保障. 在此背景下, 中国以天目卫星星座^[18]、云遥卫星星座^[19] 为代表的商业 GNSS 掩星探测星座发展迅速. 这类商业星座成本低、部署快、规模化发展, 逐渐成为全球掩星探测领域的重要数据来源, 有效弥补了当前风云卫星主干星座观测资源数量的不足. 然而, 商业星座带来的数据量快速增长, 对数据处理和协同观测提出了更高要求.

本文单独分析了风云卫星和天目卫星星座卫星、云遥卫星星座掩星在轨布局及时空分布特征, 进一步对风云卫星与商业卫星联合观测的时空分布进行评估, 分析其在全球覆盖中的互补性, 为多星座轨道构型优化提供建议.

1 风云卫星掩星资料分析

1.1 风云卫星在轨布局

中国自 20 世纪 70 年代起开始发展气象卫星, 截至 2026 年 1 月, 已发射 23 颗气象卫星, 其中 10 颗在轨运行, 形成以极轨与静止气象卫星协同工作的业务化观测体系, 是继美国、俄罗斯之后第三个同时拥有极轨气象卫星和静止气象卫星的国家. 风云三号是中国第二代低轨气象卫星, 当前在轨运行的具备掩星能力的 FY-3 系列卫星包括 FY-3D (2017 年发射), FY-3E (2021 年发射), FY-3F (2023 年发射), FY-3G (2023 年发射), FY-3H (2025 年发射)^[20], 如图 1 所示.

FY-3D/E/F/H 均采用近极地太阳同步轨道, 轨道倾角为 98.75°, 轨道高度约 830 km, 轨道周期约 102 min, 在时间上形成完整的晨昏—上午—下午观测布局. FY-3D 部署在下午轨道 14:00 LT 左右. FY-

3E 部署在晨昏轨道, 是全球首颗民用晨昏轨道业务卫星, 有效填补了卫星观测资料的空白. FY-3F 部署在上午轨道, 降交点地方时为 10:00–10:20 LT, 旨在恢复并增强上午观测能力. FY-3G 采用非太阳同步倾斜轨道, 轨道倾角为 $50^{\circ}\pm 1^{\circ}$, 专用于降水观测. FY-3H 卫星为下午轨道卫星, 升交点地方时约 14:00 LT, 将接替在轨超期服役的风云三号 D 星, 是



图 1 风云卫星在轨布局 (截至 2026 年 1 月)

Fig. 1 Deployment of Fengyun satellites in orbit by January 2026

风云三号系列气象卫星第 8 颗星.

FY-3D/E/F/G/H 均搭载了自主研发的 GNSS 掩星探测仪, 具备接收 GPS 和 BDS 等系统信号的能力, 单星日均产出掩星事件约 1500 条^[21], 其掩星数据质量显示精度水平已经较高, 相关数据在国家卫星气象中心业务系统中持续稳定推出. FY-3D 已超期服役, FY-3H 将接替 FY-3D 业务化观测任务, 因而这里未将 FY-3D 纳入本次掩星事件的统计分析范围. 下面对 FY-3E/F/G/H 四颗掩星的掩星事件进行时空分析.

1.2 风云卫星掩星事件时空分析

GNSS 掩星事件发生在 GNSS 与低轨卫星之间信号传播路径与大气层的切点处, 其空间分布特征与卫星轨道构型密切相关. 这里统计的数据时间跨度为 2025 年 11 月 1–3 日, 总样本量为 18218 条. 经不同时间段对比, 3 天数据的掩星分布特征具有一致性, 数据的空白区域主要由轨道构型导致, 与时间跨度不足无关. 由图 2 可知, 掩星事件分布与纬度存在显著相关性. 极轨卫星 FY-3E, FY-3F 和 FY-3H 的掩星

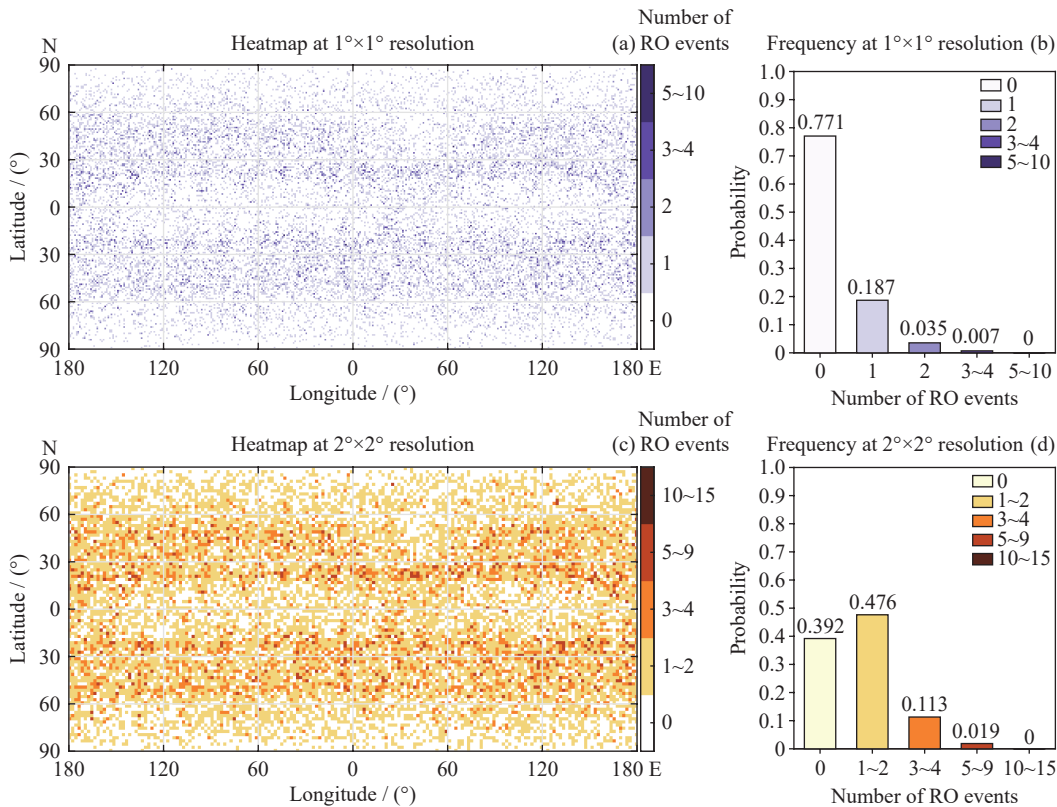


图 2 掩星事件空间分布及网格频次统计

Fig. 2 Spatial distribution of occultation events and grid frequency statistics

事件呈沿经线方向的条带状分布. 经统计, 掩星事件密度在南北纬 25° — 55° 附近最高, 而在赤道区域 (10°S — 10°N) 偏少, 仅占 8.79%. 然而由于轨道倾角等因素的影响, 高纬度极地区域 ($>80^{\circ}$) 掩星事件稀少, 在总掩星事件数量中占比为 2.50%. 相比之下, 低倾角轨道卫星 FY-3G 的掩星事件主要集中于中低纬度地区 (45°S — 45°N), 占比达到 78.51%, 高纬度地区无分布. 卫星轨道、地方时覆盖及接收机性能等因素共同导致全球掩星事件在空间分布上存在一定的不均匀性^[22]. 从图 2 的直方图中可知, $1^{\circ}/2^{\circ}$ 分辨率下, 0 次掩星事件网格分别占全球区域的 77.1% 和 39.2%, 在空间分布上存在较大空白.

掩星事件发生与地方时有关. 地方时是指按本地经度测定的时刻. 地方时分布反映了卫星观测的时间窗口与地球自转的空间关联, 通过分析地方时分布, 可针对性优化轨道相位, 填补关键时段的观测缺口, 提升全球观测的时间连续性. 图 3 给出了风云卫星掩星事件地方时分布特征. 可以看出, 风云三号系列卫星的掩星事件在地方时分布上具有明显规律: FY-3H 的事件主要集中于中低纬度地区的 01:00—05:00 LT 与 13:00—17:00 LT; FY-3E 的事件主要集中于中低纬度地区的 04:00—08:00 LT 与 16:00—20:00 LT; FY-3F 则集中于 08:00—12:00 LT 与 20:00—24:00 LT; FY-3G 呈弧形带状分布. 这种分布差异源于各卫星的轨道构型与任务协同设计, FY-3H, FY-3E, FY-3F 在中低纬不同时段形成有效互补, 而 FY-3G 在全球区域内的弧形带状分布一定程度上增加了中低纬度地区的掩星事件数量, 增强了全球连续监测能力.

然而当前风云三号掩星事件在部分地方时区间内密度仍然较低, 并且赤道低纬度区域与极地高纬度区域仍有不足.

2 中国商业卫星掩星资料分析

2.1 中国商业卫星在轨状态与轨道布局

天目卫星星座和云遥卫星星座等系列星座代表了当前中国商业 GNSS 掩星探测的主力. 天目卫星星座目前在轨 23 颗卫星, 均为太阳同步轨道, 轨道高度约 520 km, 轨道倾角为 97° , 轨道周期约 95 min. 轨道布局上, 23 颗卫星均匀部署于 7 个独立轨道面, 对应 7 个地方时, 如图 4 所示. 各轨道面依据探测任务需求灵活配置 1~4 颗卫星, 通过差异化卫星数量分配, 实现轨道资源与探测需求的精准匹配, 为数值天气预报、台风监测预报、空间天气监测预报预警等业务提供稳定可靠的数据支撑^[23].

截至 2025 年 11 月, 云遥共有 47 颗掩星探测卫星在轨运行^[24], 卫星轨道采用高倾角+低倾角的混合玫瑰星座设计, 包括约 97° 的较高倾角准太阳同步轨道和约 50° 的低倾轨道, 轨道高度约 500 km, 实现了全球大气层以及电离层信息的全球覆盖及均匀分布, 轨道布局如图 5 所示.

2.2 中国商业卫星星座掩星事件时空分析

商业星座数据的引入显著增加了掩星事件的总量, 并改善了其全球空间分布结构. 这里的数据来源于天目卫星公司提供的天目掩星星座 (TM) 数据集及云遥宇航公司提供的云遥掩星星座 (YY) 数据集,

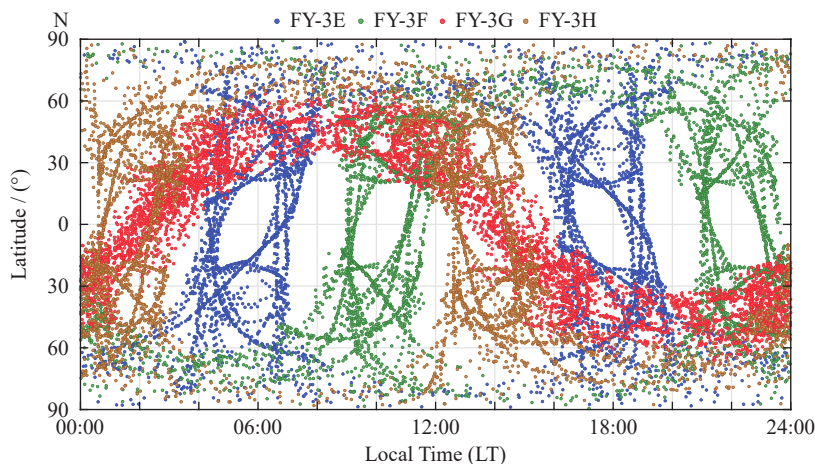


图 3 风云卫星的地方时分布

Fig. 3 Local Time (LT) distribution of Fengyun satellite

时间跨度均为 2025 年 11 月 1—3 日, 天目掩星星座总样本量为 111581 条, 云遥掩星星座总样本量为 169473 条, 在不同分辨率下掩星事件的空间分布热力图如图 6 所示. 总体而言, 从数量上看, 全球掩星观测

覆盖率得到明显提升, 空间上受卫星轨道布局影响, 高密度区呈现沿经线方向的条带状分布, 同时欧洲上空显示大片空白可能是受到战争影响的干扰信号导致的. 天目卫星星座和云遥卫星星座均显著提升了低

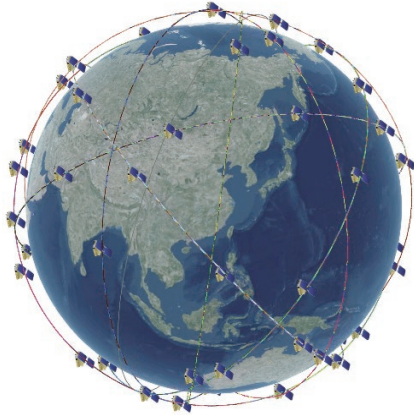


图 4 天目卫星星座在轨布局
Fig. 4 In-orbit deployment of Tianmu (TM) constellation

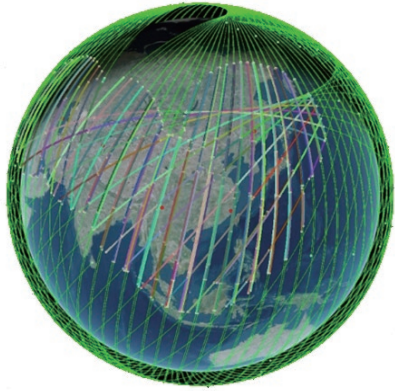


图 5 云遥卫星星座在轨布局
Fig. 5 In-orbit deployment of Yunyao (YY) constellation

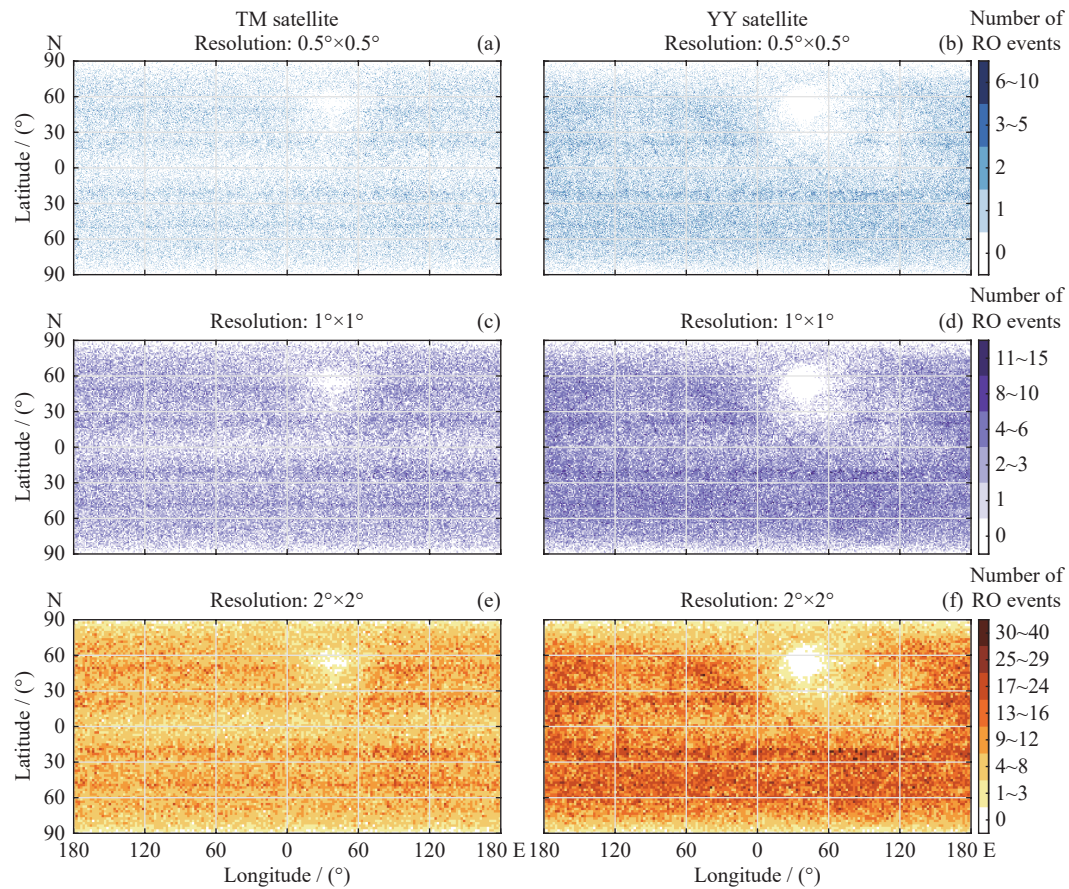


图 6 天目与云遥商业卫星在不同分辨率下掩星事件的空间分布热力图
Fig. 6 Spatial distribution heatmaps of occultation events for TM and YY commercial satellites at different resolutions

纬度赤道区域 ($10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$) 的掩星探测覆盖能力, 掩星事件数量明显增加, 2° 分辨率下的 0 次掩星事件分别占全球区域的 3.3% 与 2.8%, 1° 分辨率下的 0 次掩星事件网格分别占全球区域的 23.8% 与 18%, 而 0.5° 分辨率下的 0 次掩星事件更是达到全球区域的 67.5% 与 55.6%, 可见未发生掩星事件的空白区域占据了较大空间.

商业星座的引入在提升掩星事件整体覆盖能力的同时, 也加剧了其空间分布的不均衡性. 部分中纬度区域观测事件过度集中, 而赤道地区和高纬度地区的覆盖密度在一定程度上仍相对有限.

在时间维度上, 商业卫星极大地填补了风云卫星在时间覆盖上的空缺. 由图 7 可以看出, 天目卫星星座与云遥卫星星座的掩星事件在 00:00—24:00 LT 全时段近乎分布均匀, 这种近全时段覆盖为捕捉大气参

数的日变化特征提供了更完整的时间序列, 显著增强了掩星观测的时间连续性. 特别地, 云遥卫星星座的 18~20 星部署在低倾角轨道, 有效提升了低纬度地区掩星观测数量.

3 风云+商业卫星掩星联合观测分析

3.1 掩星事件时空分析

基于 2025 年 11 月 1—3 日的 FY-3E/F/G/H、天目星座及云遥星座掩星事件数据集对掩星事件时空分布进行分析.

表 1 统计的联合观测数据总量相比单一卫星星座有了大幅增加. 由于云遥卫星星座发射卫星数量较多, 因此掩星数据更为庞大. 在覆盖能力方面, 由于云遥卫星星座低倾角轨道卫星 18~20 星提供了更多中

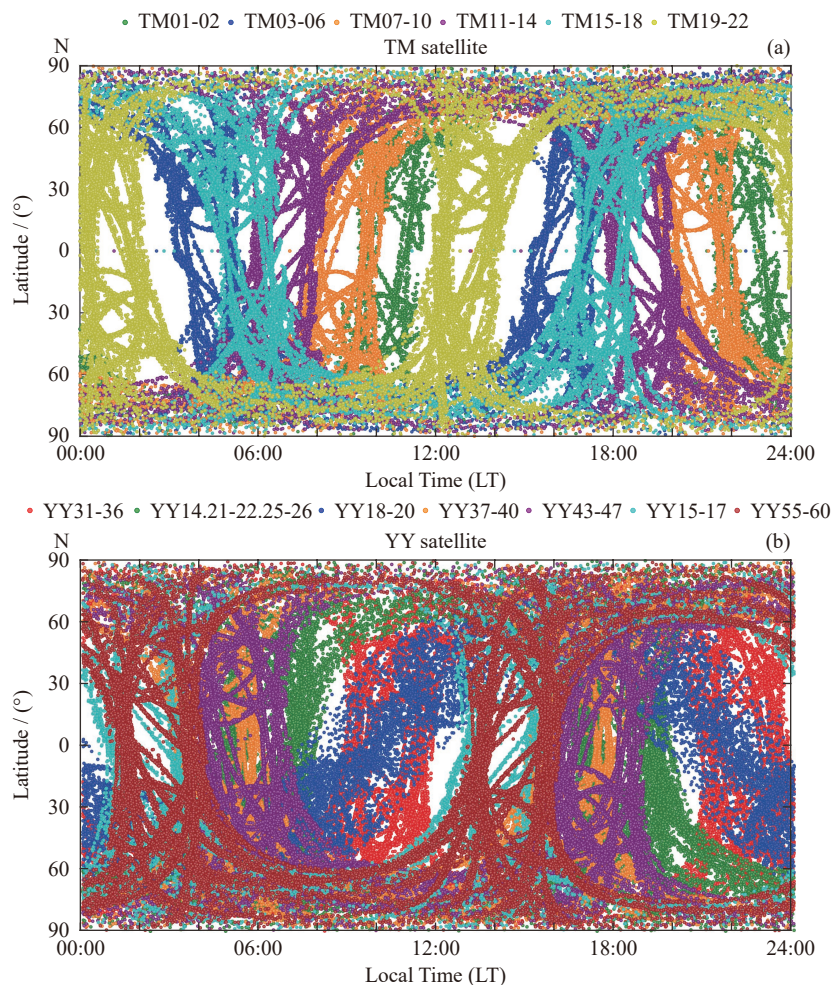


图 7 天目与云遥掩星事件的地方时分布

Fig. 7 Local time distribution of occultation events for TM and YY satellite

表 1 不同纬度带的掩星数量和占比
Table 1 Numbers and proportions of RO in different latitude bands

掩星星座	低纬度赤道(10°S–10°N)		中低纬度(10°–45°)		中高纬度(45°–80°)		高纬度极地地区(>80°)	
	数量	占比/(%)	数量	占比/(%)	数量	占比/(%)	数量	占比/(%)
FY-3	1601	8.79	10021	55.01	6140	33.70	456	2.50
TM	9139	8.19	50583	45.33	46966	42.09	4893	4.39
YY	18135	10.70	78926	46.57	67144	39.62	5268	3.11
联合观测	28875	9.65	139530	46.62	120250	40.18	10617	3.55

低纬度的观测数据, 原来风云卫星低纬度观测较少的问题在联合观测后得到改善, 数量从 1601 次提升到 28875 次, 提升超 17 倍. 高纬度地区尤其是极地边缘的掩星事件同样增加, 从 456 次提升至 10617 次.

从各卫星系统的掩星数量柱状图中可清晰看到, 虽然风云卫星只接收 BDS 与 GPS 的信号, 但是其在单星单系统下的掩星事件数量显著高于天目卫星星座和云遥卫星星座, 如图 8 所示. 表 2 统计了三种掩星系统单个卫星的平均掩星事件. 风云卫星的单卫星掩星事件显著高于天目卫星星座和云遥卫星星座, 平

均 BDS 掩星事件达到 2469 次, 平均 GPS 掩星事件达到 2315 次.

如图 9 所示, 目前仍存在数据分布不均的问题, 高分辨率 0.5°网格内的掩星事件数量有所增加, 然而发生次数为 0 次的概率仍然高达 36.8%. 在三系统联合观测 1°/2°网格热力图中, 0 次掩星事件的概率仅为 5.9% 和 1%, 空间覆盖度高达 94.1% 和 99.0%, 低空间分辨率下的掩星事件已经基本覆盖全球. 然而由于多系统重叠观测, 可以观测到数据过于集中导致的数据冗余现象, 2°网格下南北纬 20°及 45°附近区域

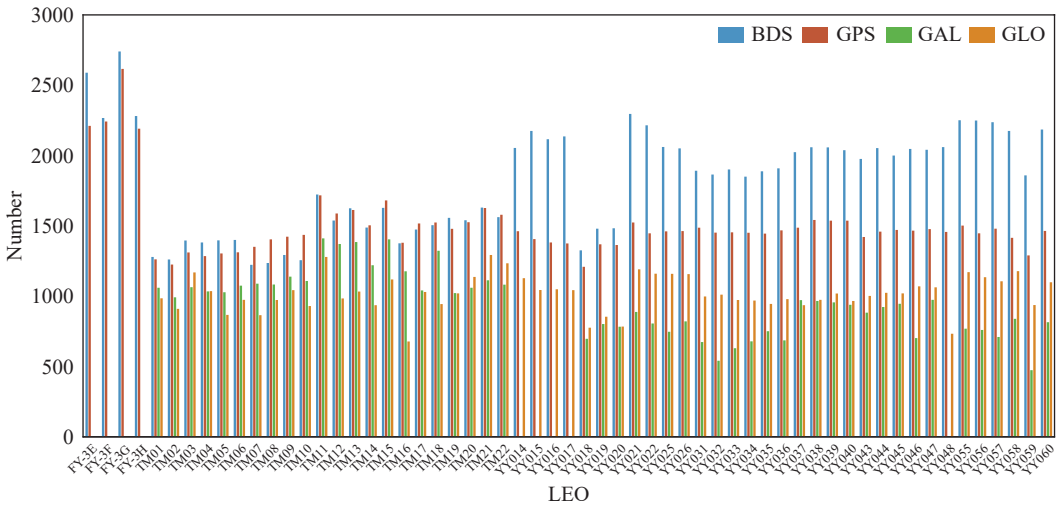


图 8 各星各系统的掩星数量
Fig. 8 Number of occultations for each satellite and system

表 2 各星各系统平均掩星数量
Table 2 Average number of occultations for each satellite and system

掩星	BDS	GPS	GAL	GLO
FY-3	2469	2315	—	—
TM	1444	1456	1149	1019
YY	2000	1445	671	1020

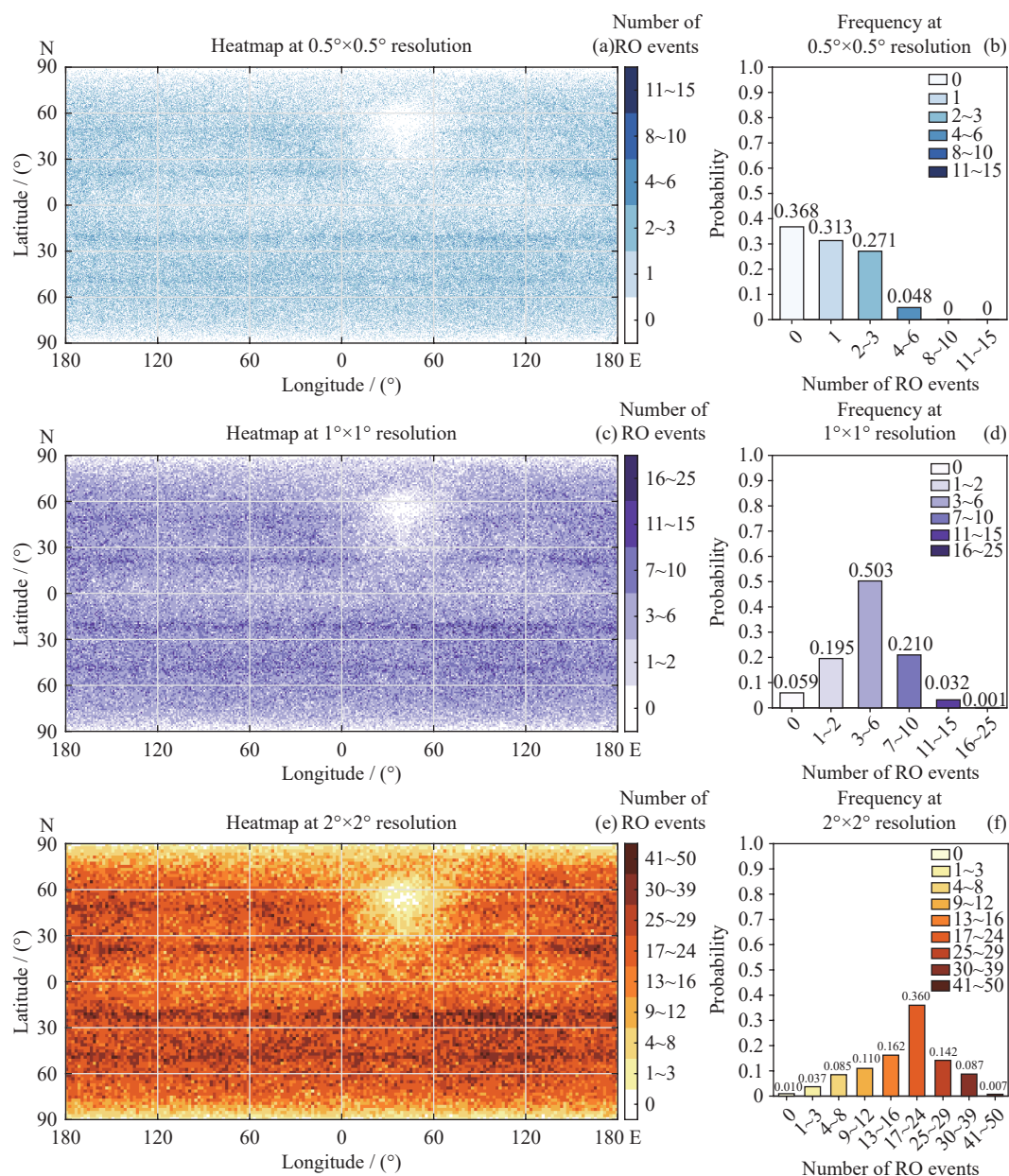


图9 联合观测不同分辨率掩星事件的空间分布和频次统计
Fig. 9 Spatial distribution and frequency statistics of occultation events from joint observation at different resolutions

掩星事件空间密度极高, 远高于其他区域, 大于 25 次的掩星事件占比超过 20%. 在部分区域和极地边缘区域, 尽管数据有所增加, 但是相对于全球平均水平或实际应用来说仍然偏少.

图 10 给出了不同系统之间联合观测的掩星星座地方时分布. 相比单风云系统, 风云三号/天目卫星星座/云遥卫星星座联合观测模式与风云三号/云遥卫星星座联合观测模式下, 地方时全时段的掩星分布密度有所提高, 但

是在 15°S—15°N 低纬度带的部分时段仍有空白, 并未完全覆盖全球. 而风云三号/天目卫星星座/云遥卫星星座联合观测近乎覆盖全时段全纬度, 实现了近乎全球全时段的连续观测. 值得注意的是, 尽管整体覆盖率极高, 但是在图中仍能观察到零星的空白区域, 这表明即便在三系统联合下, 时空覆盖尚未达到绝对的无缝隙状态. 这意味着虽然时空盲区已被大幅压缩, 但是并未完全消除.

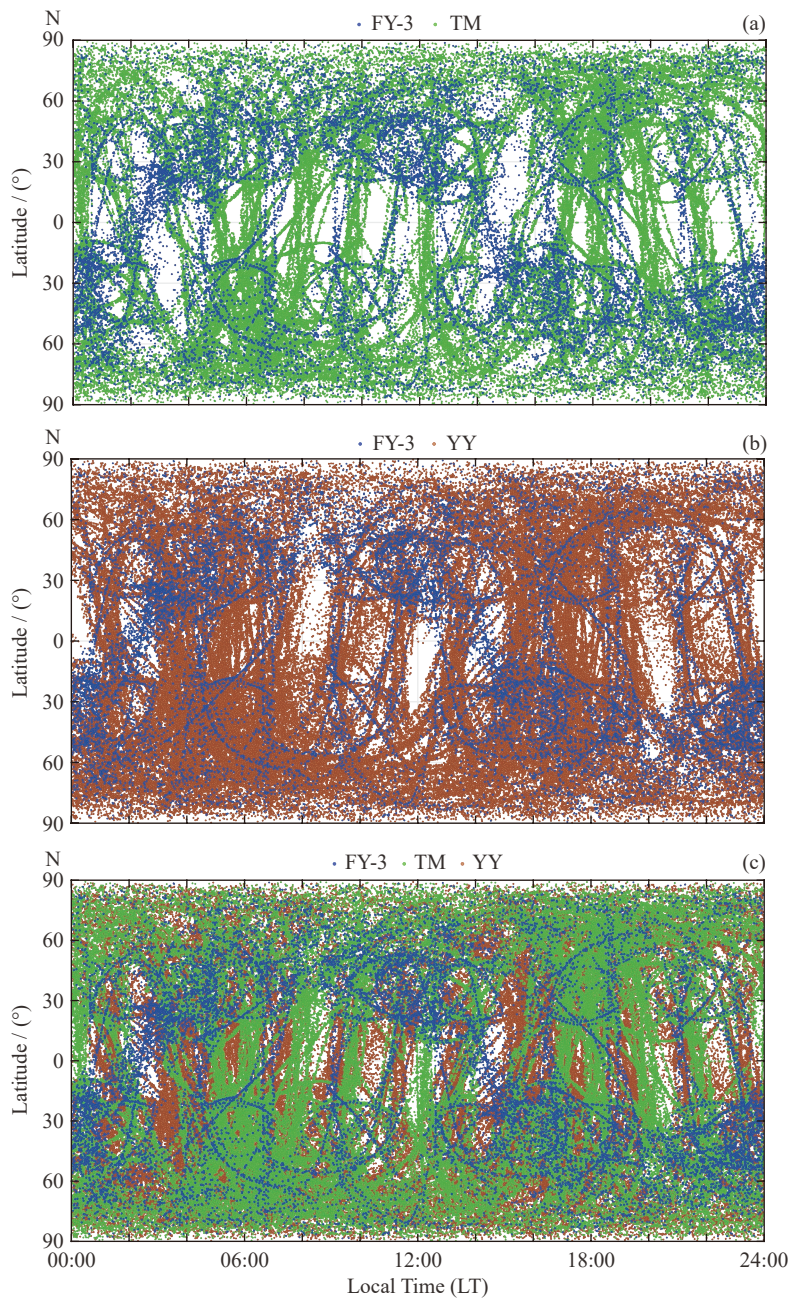


图 10 联合观测掩星事件的地方时分布

Fig. 10 Local Time (LT) distribution of joint occultation events

3.2 联合观测分析

从体系互补的角度看, 风云卫星作为中国高精度气象观测体系的核心组成部分, 其数据质量具有显著优势, 具备高精度、高稳定性和标准化程度高等特点. 相比之下, 商业星座则在广覆盖和海量数据方面起到重要补充作用, 二者形成功能互补的联合探测体系, 增强了对全球大气和空间环境的持续监测能力.

然而深入分析当前的联合观测分布特征可以发

现, 由于缺乏顶层的统一任务规划与轨道协调, 当前体系仍面临任务规划和轨道协调不足的问题. 这种多系统独立运行的模式导致资源的非均衡配置: 部分区域观测重叠, 产生大量冗余数据, 降低了整体观测效率; 另一方面, 在低纬度赤道区域及高纬度极地, 仍存在明显的覆盖盲区. 这表明单纯依靠增加卫星数量已难以线性提升观测效能, 现有的星座构型在应对全球无缝覆盖需求时已显现出局限性, 亟须从轨道设计的

源头进行优化.

3.3 轨道构型优化仿真分析

为系统性评估通过轨道设计提升掩星观测覆盖均匀性的潜力, 基于现有风云、天目及云遥星座的掩星事件分布特征, 开展了面向覆盖增强的轨道构型仿真研究. 由于极地地区的掩星事件稀疏是 GNSS 星座轨道构型导致的, 因此这里仅针对低纬度赤道区域及地方时覆盖空白进行仿真研究. 仿真卫星分为两类: 一类采用低倾角轨道, 旨在增强赤道及低纬度地区的掩星事件密度; 另一类采用特定升降交点地方时的太阳同步轨道, 主要用于填补现有联合观测体系在特定地方时区间的覆盖空白. 仿真数据采用 2025 年 11

月 1—3 日武汉大学 IGS 数据中心提供的高精度广播星历. 仿真过程中, 为聚焦轨道构型对掩星覆盖的核心影响, 排除非关键因素干扰, 仿真中轨道偏心率、升交点赤经变化率、近地点幅角、平近点角、平均近地点角及卫星时钟校正参数均设定为 0.

3.3.1 仿真卫星全球掩星事件分布特征

图 11 给出了所设计低倾角仿真卫星 (Sim-LIO) 与特定地方时太阳同步轨道仿真卫星 (Sim-SSO) 的掩星事件全球分布. 图 11 中低倾角轨道卫星的设计轨道倾角为 30° 和 45° , 掩星事件集中分布于南北纬 60° 以内的中低纬度区域. 图 12 中太阳同步轨道仿真卫星设计的降交点地方时为 09:00, 10:00,

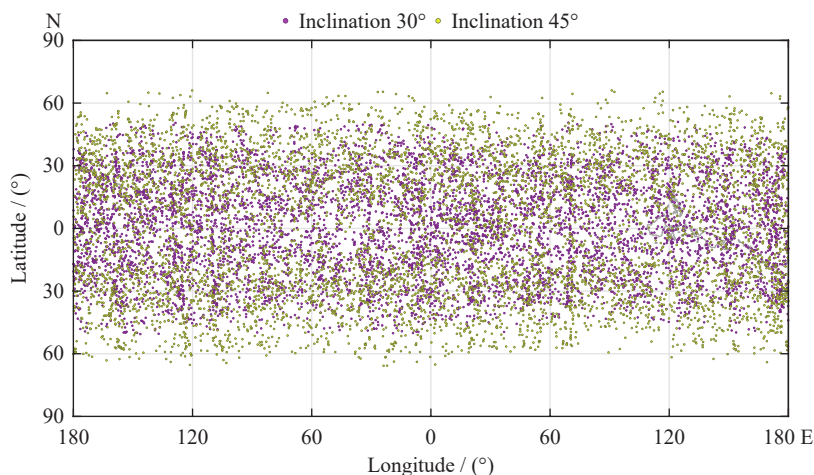


图 11 不同轨道倾角的仿真掩星事件全球分布

Fig. 11 Global distribution map of simulating occultation events with different orbital inclinations

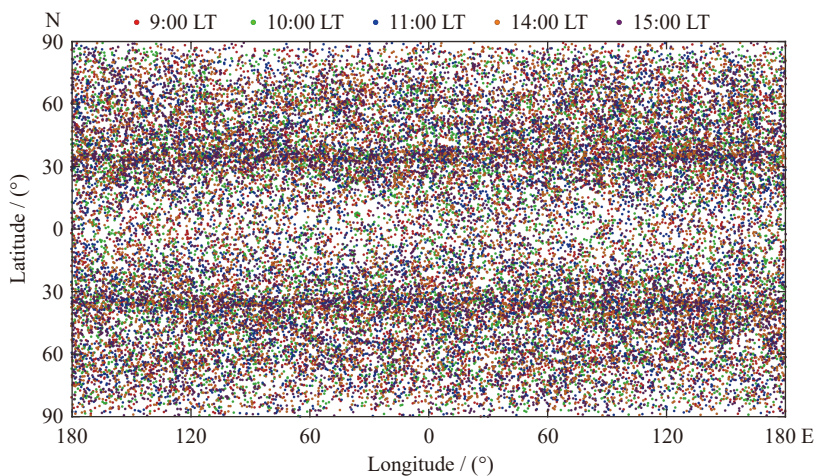


图 12 不同降交点地方时的太阳同步轨道掩星事件全球分布

Fig. 12 Global distribution map of Sun-synchronous orbit occultation events at different Local Time (LT) of descending node

11:00, 14:00, 15:00 LT, 其掩星事件呈现出沿经线方向的条带状分布. 经统计设计轨道倾角为 30° 时, $10^{\circ}\text{S}-10^{\circ}\text{N}$ 区域内掩星事件占比达 26.74%, 设计轨道倾角 45° 的占比为 14.53%, 均高于联合观测在该区域的占比, 因此有必要增加低倾角卫星的轨道部署.

3.3.2 仿真结果分析

设计多颗仿真卫星并与风云卫星、天目卫星星座、

云遥卫星星座协同观测. 仿真卫星参数包括轨道倾角 (Inclination)、升交点赤经 (RAAN, Right Ascension of the Ascending Node)、地方时 (LT), 具体见表 3. 图 13 给出了仿真与联合观测全球掩星事件分布.

仿真实验表明, 部署轨道倾角在 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 范围内的低倾角卫星, 是弥补赤道地区覆盖能力短板的直接有效手段, 如图 14 所示, 除极地地区外, 0.5° 和 1° 空

表 3 仿真卫星参数
Table 3 Simulated satellite parameters

掩星	Inclination/($^{\circ}$)	RAAN/($^{\circ}$)	Local Time (LT)
LIO	30	0	—
	30	30	—
	30	60	—
	30	90	—
	30	120	—
	30	150	—
	30	180	—
	30	210	—
	30	240	—
	30	270	—
	30	300	—
	30	330	—
SSO	98.5	135	09:00
	98.5	150	10:00
	98.5	165	11:00
	98.5	210	14:00
	98.5	225	15:00

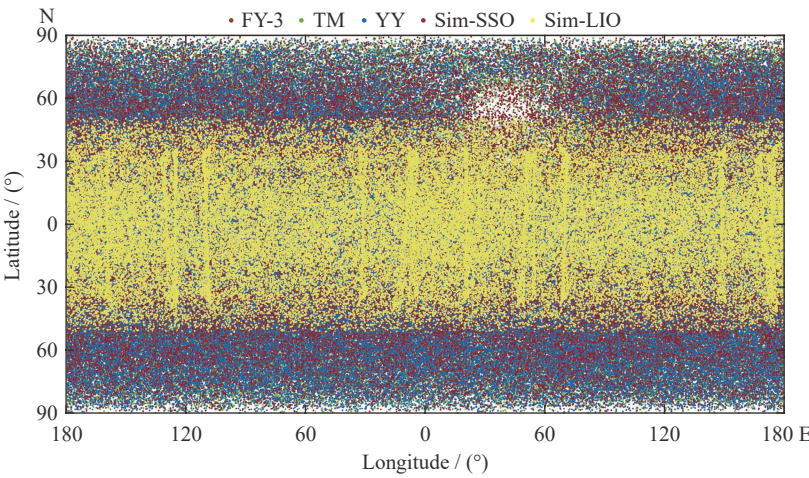


图 13 仿真与联合观测全球掩星事件分布

Fig. 13 Simulation and joint observation distribution of global occultation events

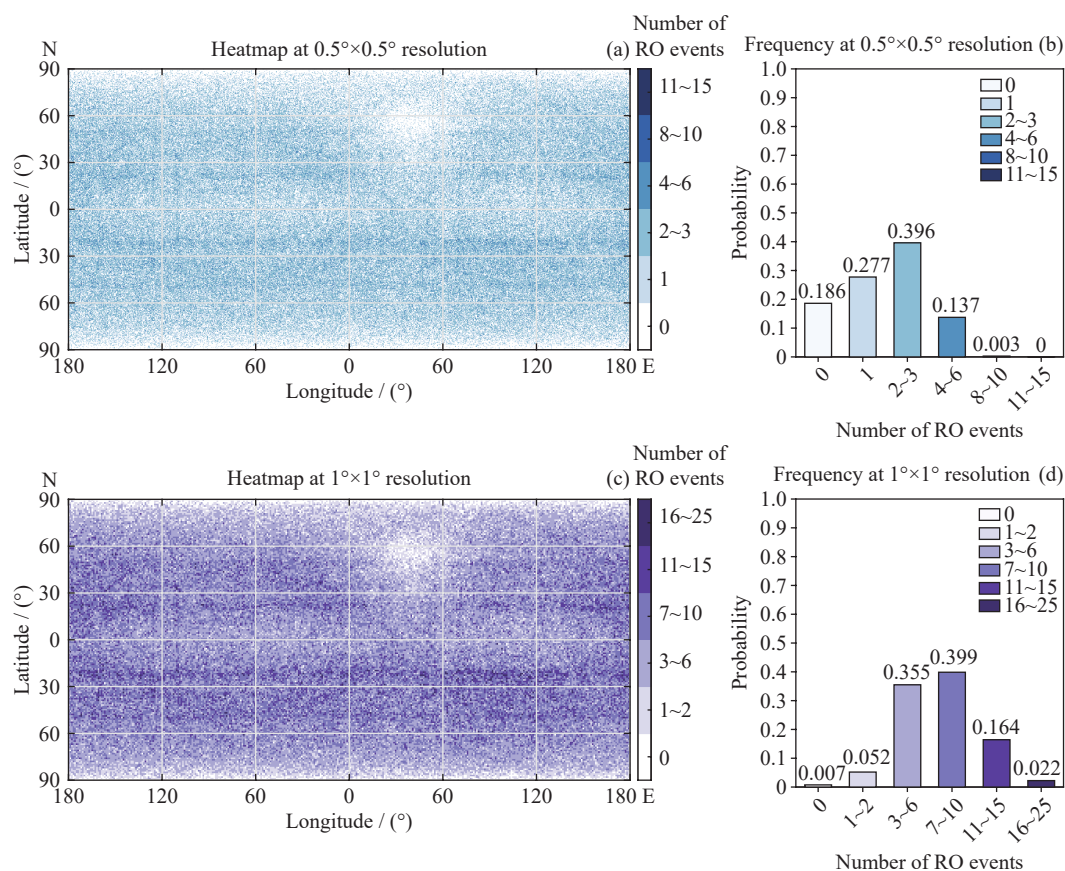


图 14 仿真与三系统联合观测不同分辨率的掩星事件空间分布及频次统计

Fig. 14 Spatial distribution and frequency statistics for occultation events of simulation and three-system joint observation at different resolutions

间分辨率下 0 次掩星事件的占比仅为 18.6%, 0.7%。WMO OSCAR 平台针对大气气候监测中大气温度观测的水平分辨率设置了分级标准, 对应不同大气层的要求为: 自由对流层 (FT) 分为 15, 100, 1000 km 三级, 上对流层/下层平流层 (UTLS) 分为 15, 100, 500 km 三级, 中上层平流层 (MUS) 及中间气层 (M) 则分为 50, 100, 1500 km 三级。轨道构型优化后的联合观测系统采用 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 与 $1^\circ \times 1^\circ$ 作为核心分辨率, 其对应的地理尺度分别约为 55 km 与 111 km。从大气气候监测的要求来看, 0.5° 分辨率已达到 FT, UTLS, MUS 及 M 各层的 100 km 突破值标准, 仿真结果显示, 该分辨率下掩星事件至少发生 1 次的区域占比可达 81.4%; 1° 分辨率的地理尺度则完全契合上述各大气层的 100 km 阈值, 并且此分辨率下仿真掩星事件的空间覆盖率达 99.3%。此外, 0.5° 分辨率的仿真结果也能够满足 UTLS 在高分辨率数值天气预报场景下的 100 km 阈值要求。

同时, 通过对太阳同步轨道卫星的降交点地方时进行系统化、互补性的规划, 例如重点填补 09:00, 11:00, 13:00, 15:00 LT 等当前覆盖相对薄弱的时段, 能够以较少的卫星数量大幅提升全球, 特别是低纬度地区的地方时覆盖均匀性。从图 15 可以看出, 全天时段基本无空白。

4 结论

基于风云卫星为主、商业小卫星为辅的天基观测体系建设导向, 系统评估了风云三号气象卫星与天目卫星星座、云遥卫星星座等商业 GNSS 掩星探测星座构建的联合观测体系时空分布。

研究表明, 由于采用大卫星平台, 风云卫星单星单系统下的掩星事件数量显著高于天目卫星星座和云遥卫星星座, 同时其数据质量具有显著优势, 具备高精度、高稳定性和标准化程度高等特点。掩星事件

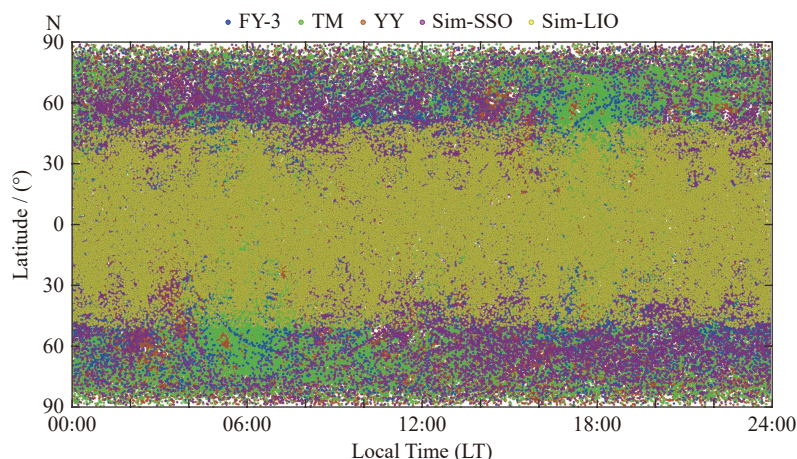


图 15 仿真与联合观测的地方时分布

Fig. 15 Local Time (LT) distribution of simulation and joint observation

分布受卫星轨道影响显著, FY-3E/3F/3H 处于太阳同步轨道, 在南北纬 20° — 50° 形成密集观测带, 但是在两极区域及赤道存在明显覆盖间隙, FY-3G 作为低倾角轨道卫星, 能够较好地补充中低纬度地区掩星探测数据. 相比之下, 数量较多的商业卫星星座能够有效提升赤道区域以及高纬度地区的观测覆盖, 初步实现了低分辨率网格下近连续的全天候覆盖. 同时, 进一步分析指出, 由于商业卫星星座发展之初的规划独立性, 部分中低纬度地区观测过度集中, 而低纬度赤道地区以及高纬度极地地区尚存在若干低密度区域.

本研究首次系统评估了风云气象卫星与中国商业卫星的掩星分布与协同观测, 分析了风云卫星单星单系统下高掩星事件数量及质量优势, 评估了商业卫星对掩星探测的贡献, 同时指出由于缺乏统一规划, 当前联合观测存在资源分配不均的问题. 未来应在风云卫星为主、商业小卫星为辅的体系框架下, 结合掩星探测网络的发展需求, 重点发展能够弥补赤道区域观测空隙的低倾角卫星与填补地方时覆盖空白的特定升降交点地方时的太阳同步轨道卫星, 以及实现高时空分辨率组网观测的低地球卫星星座, 在协同机制、轨道设计、数据融合与设备标准化等方面系统推进, 逐步构建覆盖更全面、分布更均匀、运行更高效的全球掩星探测体系.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] KURSINSKI E R, HAJJ G A, SCHOFIELD J T, *et al.* Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D19): 23429-23465
- [2] HO S P, HUNT D, STEINER A K, *et al.* Reproducibility of GPS radio occultation data for climate monitoring: profile-to-profile inter-comparison of CHAMP climate records 2002 to 2008 from six data centers[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D18): D18111
- [3] HEALY S B, THÉPAUT J N. Assimilation experiments with CHAMP GPS radio occultation measurements[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, **132**(615): 605-623
- [4] FOELSCHE U, BORSCHÉ M, STEINER A K, *et al.* Observing upper troposphere-lower stratosphere climate with radio occultation data from the CHAMP satellite[J]. *Climate Dynamics*, 2008, **31**: 49-65
- [5] YIN Ping, ZHANG Shanshan, XU Shuo, *et al.* Use of NeQuick G model and COSMIC-2 occultation data in ionospheric tomography algorithm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 975-986 (尹萍, 张珊珊, 徐硕, 等. NeQuick G 模型与 COSMIC-2 掩星数据在电离层层析算法中的使用 [J]. *空间科学学报*, 2025, **45**(4): 975-986)
- [6] ROCKEN C, ANTHES R, EXNER M, *et al.* Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D25): 29849-29866
- [7] WICKERT J, REIGBER C, BEYERLE G, *et al.* Atmosphere sounding by GPS radio occultation: first results from CHAMP[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(17): 3263-3266
- [8] BEYERLE G, SCHMIDT T, MICHALAK G, *et al.* GPS radio occultation with GRACE: atmospheric profiling utilizing the zero difference technique[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(13): L13806
- [9] ANTHES R A, BERNHARDT P A, CHEN Y, *et al.* The

- COSMIC/FORMOSAT-3 Mission: early results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, **89**(3): 313-334
- [10] Schreiner W, Weiss J, Anthes R, *et al.* COSMIC-2 radio occultation constellation: first results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **47**: e2020SW002534
- [11] DONLON C J, CULLEN R, GIULICCHI L, *et al.* The Copernicus Sentinel-6 mission: enhanced continuity of satellite sea level measurements from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, **258**: 112395
- [12] KLAES K D, ACKERMANN J, ANDERSON C, *et al.* The EUMETSAT polar system: 13+ successful years of global observations for operational weather prediction and climate monitoring[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, **102**(6): E1224-E1238
- [13] BAI W H, SUN Y Q, DU Q F, *et al.* An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(6): 1817-1823
- [14] DU Q F, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* The on-orbit performance of FY-3D GNOS[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE, 2019 7669-7671
- [15] MIAO S X, SUN K M, HU X Q, *et al.* On-orbit radiometric performance assessment of FY-3F MERSI-III: a cross-platform intercomparison approach based on global pseudo-invariant pixels[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2025, **18**: 21514-21531
- [16] ZHANG P, GU S Y, CHEN L, *et al.* FY-3G Satellite instruments and precipitation products: first report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2023, **3**: 0097
- [17] WANG Jinsong, LU Naimeng, ZHAO Xiangang, *et al.* Review and prospect on the meteorological small satellites[J]. *Advanced Small Satellite Technology*, 2024, **1**(1): 23-29 (王劲松, 卢乃锰, 赵现纲, 等. 气象小卫星发展的回顾与展望 [J]. 先进小卫星技术 (中英文), 2024, **1**(1): 23-29)
- [18] LI J F, LU C X, ZHENG Y X, *et al.* Quality assessment and assimilation of Tianmu-1 GNSS radio occultation refractivity observations: a preliminary study[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, **63**: 5803217
- [19] Yue H, Fu N, Li F, *et al.* The Yunyao LEO satellite constellation: occultation results of the neutral atmosphere using multi-system global navigation satellites[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(16): 2851
- [20] GUAN Min, ZHANG Yong, LI Yun, *et al.* Current development and future trends of Fengyun meteorological satellites[J]. *Advances in Earth Science*, 2025, **40**(2): 138-154 (关敏, 张勇, 李云, 等. 我国风云气象卫星发展现状与未来展望 [J]. 地球科学进展, 2025, **40**(2): 138-154)
- [21] LIU Yan, MENG Xiangguang, BAI Weihua, *et al.* Analysis of Beidou radio occultation data from FY-3D satellite[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 476-484 (刘艳, 孟祥广, 白伟华, 等. FY-3D 卫星的北斗掩星分布特征与误差特性 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(3): 476-484)
- [22] LUO Jia, XU Xiaohua. Comparison of the morphologies of sporadic E layers derived using GPS radio occultation data from FY3C and FY3D satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, **47**(10): 1775-1784 (罗佳, 徐晓华. 利用 FY3C 与 FY3D GPS 掩星资料研究中低纬地区偶发 E 层形态的比较 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2022, **47**(10): 1775-1784)
- [23] Huang F, Yin C, Liu Y, *et al.* Tianmu-1 constellation GNSS-R in-orbit performance: spatiotemporal characteristics, product applications and polarimetric features[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2025, **63**: 1-20
- [24] XU X Z, HAN W, WANG J C, *et al.* Quality assessment of YUNYAO radio occultation data in the neutral atmosphere[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2025, **18**(6): 1339-1353

作者简介



鲁文强 男, 1987 年 6 月出生于山东省滨州市, 现为国家卫星气象中心高级工程师, 主要研究方向为 GNSS 仪器预处理、风云三号卫星仪器地理定位等。
E-mail: luwq@cma.gov.cn



陈冉 女, 2003 年出生于河南省安阳市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要研究方向为 GNSS 掩星数据处理与应用。
E-mail: chenran26@mails.ucas.ac.cn



徐娜 (通信作者) 女, 1982 年出生于山东省烟台市, 现为国家卫星气象中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为卫星遥感器定标与定量反演。
E-mail: xuna@cma.gov.cn



孟祥广 (通信作者) 男, 1982 年出生于山东省临沂市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为基于 GNSS 的空间环境感知及 LEO 卫星精密定位定轨。
E-mail: xgmeng@nssc.ac.cn