引文格式:宋敏峰,何秀凤.星载BDS-3-R极地观测时空性能仿真分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(1):171-181.DOI:10.13203/j.whugis20230262

Citation: SONG Minfeng, HE Xiufeng. Simulation and Analysis of Spatiotemporal Performance of Spaceborne BDS-3-R Polar Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(1):171-181.DOI:10.13203/j.whugis20230262

星载BDS-3-R极地观测时空性能仿真分析

宋敏峰[1] 何秀凤[1]

1 河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京,211100

摘 要:针对多种轨道类型的北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 satellite navigation system,BDS-3)的反射信号进行极地观测具有独特性,对为期10 d的极地BDS-3反射(BDS-3 reflectometry, BDS-3-R)仿真事件进行分析,并提出了新的时空观测性能评估方法。从卫星轨道高度和倾角两个方面,对BDS-3-R技术在极地观测中的时空性能开展研究。结果表明,在极地区域(纬度高于66.34°)随着卫星轨道高度增加,重访周期变长、空间分辨率逐渐降低。当轨道高度为800 km时,重访周期约为35 h,平均空间分辨率约为17.6 km。同时发现,高轨地球静止轨道卫星有利于极地区域掠射观测事件的产生。此外,随着轨道倾角接近90°,重访周期逐渐变长;当倾角小于80°或大于100°时,BDS-3-R在南北极中心区域存在监测盲区。因此,推荐采用[70°,80°]和[80°,90°]倾角的双星组网方式进行极地观测。分析结果也表明,极地观测趋于采用较大反射天线倾角,且指向方位对反射事件数量有明显影响。

关键词:北斗卫星导航系统;BDS-3-R;GNSS-R;极地观测;对地观测时空性能;仿真

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-07-09

DOI:10.13203/j.whugis20230262 **文章编号**:1671-8860(2026)01-0171-11

Simulation and Analysis of Spatiotemporal Performance of Spaceborne BDS-3-R Polar Observations

SONG Minfeng[1] *HE Xiufeng*[1]

1 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: **Objectives**: The polar region is a globally critical area, and its environmental monitoring is vital for climate change research. Given the unique application potential of the BeiDou-3 satellite navigation system (BDS-3) reflectometry (BDS-3-R) technology for polar observation, we aim to systematically evaluate and quantify its spatiotemporal observation performance under various orbital configurations to guide future mission planning. **Methods**: We take BDS-3 satellites of multiple orbit types as the research objects and conduct a detailed analysis of a 10 d BDS-3-R polar observation simulation event. Based on this analysis, we innovatively propose a new set of spatiotemporal observation performance evaluation methods. Focusing on two core parameters of satellite orbital altitude and orbital inclination, we deeply investigate their influence mechanisms on the polar coverage capability and revisit characteristics of BDS-3-R. **Results**: The simulation results reveal a close relationship between the spatiotemporal performance in the polar region (latitudes above 66.34°) and the orbital parameters. As the satellite orbital altitude increases, while the observation range may expand, the revisit period correspondingly lengthens, and the spatial resolution significantly decreases. Quantitative analysis shows that at a typical orbital altitude of 800 km, the revisit period is approximately 35 hours, with an average spatial resolution of about 17.6 km. Notably, high-orbit geostationary Earth orbit (GEO) satellites were found to be conducive to generating grazing angle observation events in the polar region. Regarding orbital inclination, the revisit period gradually lengthens as the inclination ap-

基金项目:中央高校基本科研业务费专项(B250201065);国家自然科学基金(42304053);江苏省卓越博士后计划(2023ZB382)。

第一作者:宋敏峰,博士,副研究员,主要从事GNSS-R算法及海洋、极地应用研究。minfeng@hhu.edu.cn

通信作者:何秀凤,博士,教授。xfhe@hhu.edu.cn

proaches 90°. More critically, when the inclination is set below 80° or above 100°, the BDS-3-R observations produce distinct monitoring blind zones in the central Arctic and Antarctic regions. Furthermore, the analysis indicates that polar observation missions tend to adopt a larger reflector antenna tilt angle, and the pointing azimuth has a significant regulatory effect on the number of obtainable reflection events. **Conclusions:** The performance evaluation framework and the quantitative results obtained in this study successfully reveal the optimal orbital configuration for the BDS-3-R system in the polar environment. The study recommends a dual-satellite networking approach with inclinations of [70°, 80°] and [80°, 90°] for comprehensive polar coverage observation, providing an important theoretical basis and technical support for the orbital design, satellite configuration, and mission planning of future GNSS-R-based polar exploration missions.

Key words: BDS; BDS-3-R; GNSS-R; polar observation; spatiotemporal performance of Earth observation; simulation

利用全球卫星导航系统(global satellite navigation system, GNSS)反射信号进行地球表参数探测的技术(GNSS reflectometry, GNSS-R)因具有观测成本低、覆盖范围广、时空采样能力强等优势展现出巨大的发展潜力。已有许多学者的研究证实,GNSS-R技术在地基[1]、机载[2]、船载[3]以及星载[4]多种平台上都实现了对地表多参数观测的可行性[5],如海面风场[6]、海冰探测[7]、海面高度[8]和土壤湿度[9]等。然而,由于GNSS信号在经过地表反射后到达星载平台时非常微弱,因此该技术的一些应用还存在一定的局限性,例如在海面测高方面的应用[10]。尽管如此,相比陆地和粗糙海面,极地区域的海冰和冰盖等反射面具有更强的反射特性,使得GNSS-R技术在冰冻圈区域的应用迅速发展。目前,有限的星载极地GNSS-R观测数据表明,该技术可以有效探测极地海冰的时空变化[11]、海冰高度[12]和冰盖高度[13]等参数。因此,已有学者提出了专注于极地观测的GNSS极地反射测量探测系统卫星计划[14]和专注于土壤湿度和冻土的水文GNSS卫星计划[15]等。这些研究将进一步推动GNSS-R技术的发展,并为全球极地区域的监测和认知提供重要支持。

在当前全球温室效应不断加剧的背景下,对冰冻圈进行高时空分辨率监测的需求日益迫切。全球气温上升导致海水膨胀,并加速南北两极冰川和冰盖的消融,进一步促使海平面上升,严重威胁全球沿海地区的数亿人口。此外,2018年发布的中国北极政策白皮书指出,提高中国对南北极地环境的监测能力,加深对南北极区域的认知和了解具有重要意义。因此,随着中国北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)的全面建成,结合BDS相对于其他卫星系统的多轨道类型特点,对基于北斗三号(BDS-3)信号的星载反射(BDS-3 reflectometry,BDS-3-R)极地观测仿真性能进行分析显得尤为必要,可为低地球轨道(low Earth orbit,LEO)卫星轨道参数的设计提供借鉴。文献[15]基于GPS系统仿真和分析了单颗LEO卫星对GNSS-R事件分布和数量的影响,指出全球海洋反射事件需依靠极轨或近极轨卫星,并且反射事件数随轨道高度增加而显著增加。在针对BDS的独特性方面,文献[16]对LEO卫星BDS-R事件进行了仿真分析,发现LEO卫星高度和升交点赤经仅影响反射事件数量而不影响分布,而轨道倾角对两者都具有显著影响。文献[17]对多系统GNSS-R事件进行了仿真,但仅研究了反射事件数和分布等指标。文献[18]进一步分析了卫星轨道高度、倾角、升交点赤经以及天线波束对观测平均回访时间和覆盖率的影响,并给出了多颗卫星组网观测的性能。文献[19]以风云三号E星为基础,重点分析了不同反射天线覆盖和安装条件下多个星载GNSS-R参数,指出天线波束宽度对各仿真参量的影响最大,倾斜角度次之,而倾斜方向的影响最小。

综上所述,虽然许多学者对GNSS-R事件进行了仿真研究,但利用BDS-R信号进行极地观测的相关仿真分析研究仍较为欠缺。因此,本文着重对基于BDS-3系统信号进行极地观测的时空性能进行分析,为未来BDS-3-R卫星计划的研究提供有益参考。

1　GNSS-R 极地观测时空性能估计方法

为评估星载 BDS-3-R 的极地观测能力，引入观测空间分辨率和平均重访周期这两个指标。由于星载 GNSS-R 技术采用前向散射观测模式，因此其地面观测轨迹是随机的，无法依据固定轨道来准确计算平均重访周期和空间分辨率。先前的研究采用经纬度格网划分的方式进行估算[18]，该计算方式简单，但并不严格。在纬度较高的地区，基于特定步长划分的网格呈现长条状，不能准确地对应重访周期的定义。在接近极地的地区，条带状的网格形状使得平均重访周期的估计不准确，因此该方法不适用于极地观测时的观测时空性能评估。对此，本文提出了一种基于 K 近邻思想的 GNSS-R 对地观测平均重访周期和空间分辨率估计方法。

1.1　GNSS-R 观测平均重访周期估计

观测平均重访周期指的是地面轨迹重复经过同一区域所需的时间。为了准确求得重访周期时长，需要基于大量的观测值采用平均的方式进行估计。本文通过计算以任意观测点为中心的一定距离范围内所有邻近观测轨迹的平均观测时间间隔作为平均重访周期。假设某区域在一定时间内经过的轨迹如图 1 所示。

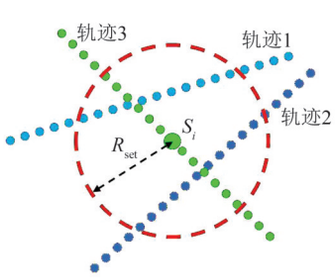


图 1　某区域一定时间内经过的 GNSS-R 观测轨迹

Fig. 1　GNSS-R Observation Trajectory of a Certain Region in a Certain Period

首先获取该区域内以观测点 S_i 为圆心、R_{set} 为半径的圆的范围内的所有观测点，得到观测时间数组序列 $T_i=\{t_1,t_2,\cdots,t_{n-1},t_n\}$，$n$ 为该范围内所有观测点的个数，t_n 表示第 n 个观测点的观测时刻。假设该时间序列中观测历元时间是递增的，此时对该时间序列求序列差，得到时间差序列 δT_i，即：

$$\delta T_i=\{t_2-t_1,t_3-t_2,\cdots,t_{n-1}-t_{n-2},t_n-t_{n-1}\} \tag{1}$$

若半径 R_{set} 范围内所有点与观测点 S_i 归属同一个地面轨迹，则时间差序列 δT_i 内的元素均为观测历元时间差 T_{epoch}，且为固定值。若存在大于 T_{epoch} 的值，则表明该区域存在不同的观测轨迹。因此，可通过预设阈值 Δt_{set} 来计算观测轨迹的数量。若轨迹点在地球表面的移动速度为 v_i，则 Δt_{set} 的计算公式为：

$$\Delta t_{set}=\frac{2R_{set}}{v_i} \tag{2}$$

为便于判断，v_i 也可采用平均值替代。若探测到 R_{set} 半径范围内的观测轨迹数量为 N_{track}，则该观测点位置的平均重访周期 $t_{revisit}$ 的计算公式为：

$$t_{revisit}=\frac{t_{max}-t_{min}}{N_{track}-1} \tag{3}$$

式中，t_{min}、t_{max} 分别为 N_{track} 个轨迹中观测时间最早和最晚的轨迹在该范围内的平均观测时刻。遍历所有观测点即可求得不同区域平均重访周期。由于 GNSS-R 地面观测轨迹的随机性，因此，在较长的时间段内估计的重访周期会更准确。在计算过程中，本文未考虑当轨迹数为 0 或者 1 的情况，此时认为平均重访周期为无限大，不参与计算。当仿真时间较长时，观测数量较大，此时这两种特殊情况很少，且对最终的评估结果影响很小。

1.2　GNSS-R 观测空间分辨率估计

基于面观测模式的空间分辨率可由影像像素点获得，基于地面轨迹观测模式的空间分辨率可分为轨迹向分辨率和轨迹旁向分辨率。轨迹向分辨率与观测采样率有关，而旁向分辨率与卫星的轨道以及观测模式有关。如冰、云和地面高度 2 号（ice，cloud，and land elevation satellite-2，ICESat-2）卫星观测的旁向分辨率为 3.3 km[20]。当卫星以重复轨道运行时，旁向分辨率很容易获取，而对于偏移重复轨道或者类似 GNSS-R 技术的随机双极地雷达观测模式而言，其旁向分辨率与时间相关。由于 GNSS-R 卫星地面投影轨迹与地面观测轨迹完全不同，因此很难计算旁向分辨率。对此，很多学者采用格网覆盖来计算空间覆盖率与重访周期[16,21]。这种方式是通过预设网格大小并根据观测时长来评估观测性能，无法直接计算旁向分辨率。对此，本文从实际观测随机轨迹出发，提出基于最近观测轨迹距离来直接估计平均观测空间分辨率，原理如图 2 所示。

假设在一定观测时长内某观测区域的地面点轨迹如图 2 所示。轨迹 1、轨迹 2、轨迹 3、轨迹 4 分别指不同的观测轨迹，且所有轨迹的观测点

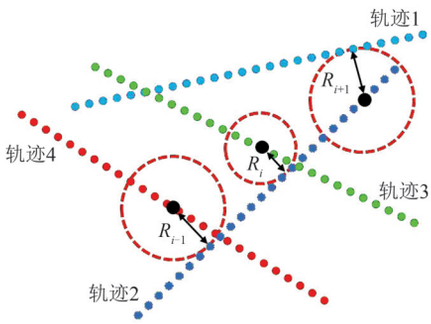


图2 平均观测空间分辨率计算原理图

Fig. 2 Diagram of Average Spatial Resolution Calculation

个数之和为n。首先,求取每个轨迹上的观测点与其最近轨迹的最短直线距离,如图2中的R_{i-1}、R_i、R_{i+1},则可定义该观测时长下此区域的平均观测空间分辨率为:

$$D_{\text{mean_spatial}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}R_i \tag{4}$$

式中,$D_{\text{mean_spatial}}$即为该区域内的平均观测空间分辨率。由于两条轨迹相交处的平均观测空间分辨率非常高,而远离交点处偏低,因此还可以进一步采用空间滤波方式进行平滑处理。

2 GNSS卫星可见性及反射事件仿真

卫星可见性是指GNSS-R卫星在轨运行时,其搭载的直射信号天线可接收到GNSS卫星发射的信号,某一时刻卫星可见数量也决定着该时刻GNSS-R载荷可获取地表反射信号的数量,可见卫星数量越多,GNSS-R卫星对地观测能力越强。然而,由于GNSS-R载荷上的反射信号天线并非全向天线,因此在实际场景中,GNSS-R载荷在轨处理反射信号的数量一般少于卫星可见数量。图3展示了GNSS-R卫星上GNSS卫星可见性示意图。

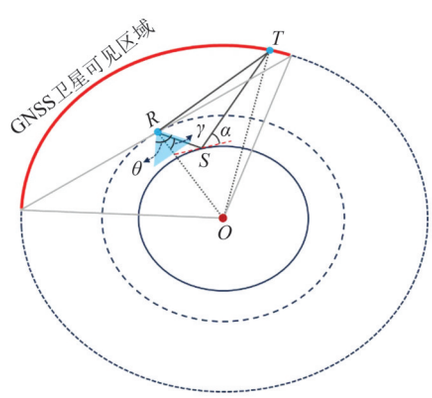


图3 GNSS卫星可见性示意图

Fig. 3 Diagram of GNSS Satellite Visibility

图3中,R为GNSS-R卫星,T为GNSS卫星,S为镜面反射点,O为地心,θ为GNSS-R卫星反射信号天线波束角,γ为反射信号到达GNSS-R卫星时与R至O连线的夹角。红色曲线区域为GNSS卫星可见区域。假设当卫星在空间中均匀分布时,可以通过卫星数量以及卫星可见区域的覆盖面积来计算卫星的可见数[18],然而,由于GNSS卫星轨道的倾角仅为55°,且BDS-3卫星采用3种轨道形式,因此这种均匀分布的假设并不严格。为了解决这个问题,本文通过二行星历(two-line element, TLE)模拟了实际情况中单个GNSS-R卫星在轨运行时4大导航系统的卫星可见数,并进行反射事件仿真。TLE来自网站https://celestrak.org[22]。在仿真中,GNSS-R卫星的轨道根数来自TDS-1卫星,参与计算的GNSS卫星系统及其数量如表1所示。

表1 GNSS-R及GNSS卫星部分参数及数量

Table 1 Part of Parameters of GNSS-R and GNSS Satellites

导航系统	轨道类型	轨道倾角/(°)	轨道高度/km	数量
BDS-3	MEO	55.5	21 500	24
	GEO	1.5	35 600	3
	IGSO	57.5	35 700	3
GPS	MEO	54.5	20 200	31
GLONASS	MEO	64.8	19 100	24
Galileo	MEO	56.0	23 222	24

在仿真过程中,首先计算在某时刻GNSS-R卫星以及GNSS卫星的位置,然后判断在GNSS-R卫星处的GNSS卫星可见数。判断卫星可见的主要标准是GNSS-R卫星至GNSS卫星的卫星高度角大于0°。需要指出的是,本文在仿真分析中认为GNSS-R卫星至GNSS卫星的高度角大于0°时即满足反射事件要求,并判定为一次反射事件,忽略了GNSS-R反射信号天线的天线波束宽度、天线倾斜角和倾斜方向等因素,默认反射信号接收天线为全向天线。这种假设对后期优化GNSS-R接收机通道数和GNSS-R的探测能力具有重要参考意义[17]。对于与这些因素相关的分析,可以参考文献[18-19]。同时,为了研究在极地观测时的时空观测性能,分析时仅考虑镜面点纬度大于66.34°时的反射事件。

3 极地区域观测时空性能分析

由于星载GNSS-R技术为被动式的多基地

观测模式,轨道高度及轨道倾角是影响观测时空性能的重要因素[18]。本文从 GNSS-R 卫星轨道高度以及轨道倾角对重访周期和空间分辨率两方面的影响展开研究。

3.1　轨道高度影响

3.1.1　平均空间分辨率和重访周期分析

本文基于 TDS-1 卫星和 BDS-3 卫星轨道数据进行仿真分析,仿真总时长 10 d,采样率为 1 s,并引入了 GNSS-R 卫星处卫星高度角大于 0°的条件。基于文献[23-24]中的 GNSS-R 几何计算方法,仿真了轨道高度为[400,1 800] km 情况下(其他参数与 TDS-1 相同)的所有可观测的 BDS-3-R 事件,并计算了星载 BDS-3-R 技术在南北极圈的观测空间分辨率和平均重访周期沿经纬度方向的变化特征,结果如图 4、图 5 所示。

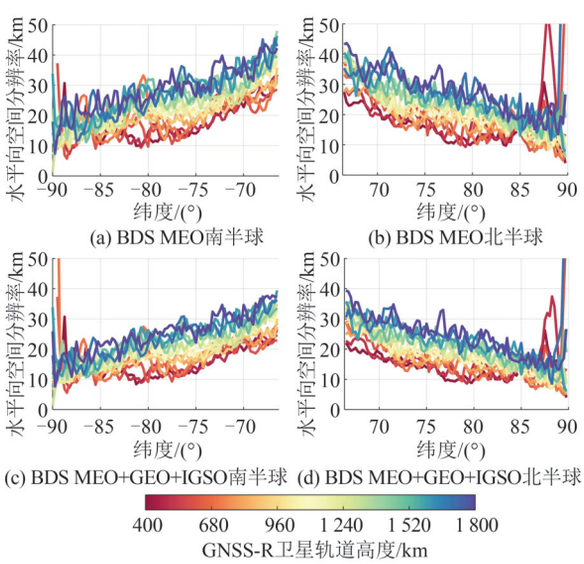


图 4　不同轨道高度场景下观测空间分辨率沿纬度变化

Fig. 4　Spatial Resolution Distributions Along Latitude in Different Orbit Altitude Scenarios

由图 4 可知,在不同卫星轨道高度的情况下,南北半球高纬度地区的平均空间分辨率随纬度的分布呈现相似的趋势,即纬度越高,分辨率越高。但随着轨道高度的增加,空间分辨率逐步降低,并且南北极的变化趋势基本一致。图 4(a)~4(b)显示了仅考虑 BDS-3 中地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星的情况,而图 4(c)~4(d)则加入了地球静止轨道(geostationary Earth orbit,GEO)和倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星的结果。对比发现,高轨卫星的加入对空间分辨率的提升很小,并且对南北极区域的影响基本一致。例如,在轨道高度为 400 km,纬度为 75°时,高轨卫星的加入使得空间分辨率从 14 km 提高至 12 km。图 5 展示了平均重访周期随纬度的变化情况。从图 5 中可以看出,单颗卫星的重访周期约为 35 h。随着轨道高度的增加,平均重访周期显示微小的增加趋势,并且高轨卫星的加入对平均重访周期的影响并不显著,如图 5(a)~5(b)和图 5(c)~5(d)所示,尤其是纬度越低时,重访周期的曲线波动更加平稳。

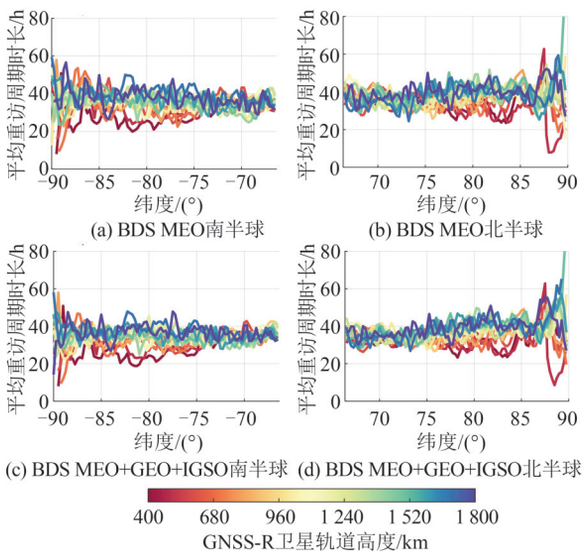


图 5　不同轨道高度场景下观测平均重访周期沿纬度变化

Fig. 5　Observed Mean Revisited Period Distributions Along Latitude in Different Orbit Altitude Scenarios

图 6 显示了轨道高度影响空间分辨率沿经度变化的趋势。随着轨道高度的增加,极地观测空间分辨率逐步减低,总体范围在[15~40] km 之间。考虑高轨卫星后,空间分辨率在经度[50°,180°]范围内普遍提高,尤其在经度 75°和 180°处变化明显。这主要是由 3 颗 IGSO 卫星的特殊轨道引起的。进一步分析表明,IGSO 的影响随着低轨 GNSS-R 卫星轨道高度的增加而变得显著。随着低轨卫星轨道高度的升高,其观测区域也会增大,这也解释了为什么 IGSO 能影响经度 180°区域。不同轨道高度对平均重访周期沿经度的影响较小,如图 7 所示。总体上,轨道高度越低,重访周期在经度上的变化趋势越趋于平稳且稍有减小。此外,高轨卫星的引入整体上缩短了重访周期,特别是在纬度[65°,180°]区域,而[−150°,60°]区间的重访周期基本没有变化。

3.1.2　单颗 GNSS 卫星日均反射事件数量分析

此外,为分析 BDS-3 卫星不同轨道对反射事件数量的影响,采用单颗卫星每日平均观测数量指标展开分析。为进一步分析高轨 GNSS 卫星

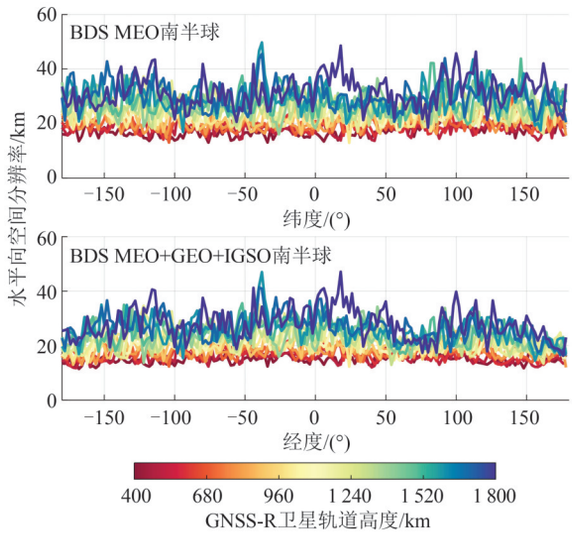


图6 不同轨道高度场景下观测空间分辨率沿经度变化

Fig. 6 Spatial Resolution Distributions Along Longitude in Different Orbit Altitude Scenarios

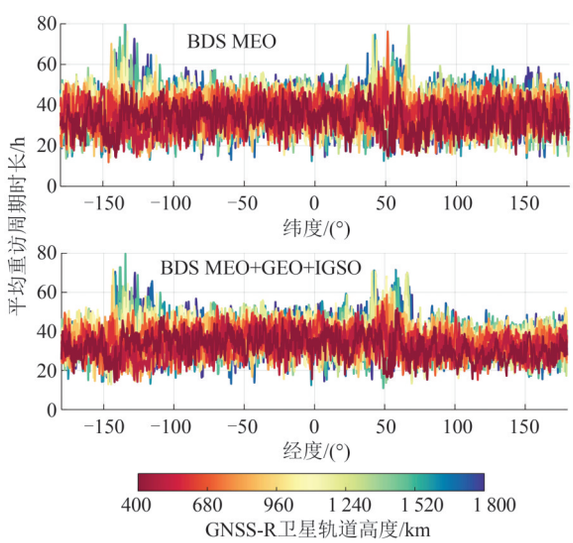


图7 不同轨道高度场景下平均观测重返周期沿经度变化

Fig. 7 Observed Mean Revisited Period Distributions Along Longitude in Different Orbit Altitude Scenarios

对掠射观测的影响,反射事件的判定条件改为了镜面点处卫星高度角大于0°。假设某种轨道所有卫星在n_{day}内的反射事件数量为N_{all},且卫星总数为n_{sat},则单颗卫星每日的平均观测数量N_{sat}为:

$$N_{sat}=\frac{N_{all}}{n_{sat}\times n_{day}} \tag{5}$$

计算了GNSS-R卫星轨道为600 km时(其他参数与TDS-1相同)BDS-3系统的MEO、GEO和IGSO以及GPS系统的MEO的单颗卫星平均反射事件数量,结果如图8所示,其中θ_{RT}表示GNSS-R卫星处的卫星高度角,λ_S为镜面反射点处纬度。

图8绘制了BDS-3 MEO、IGSO和GEO 3种卫星以及GPS MEO卫星单日单颗的观测事件数量随镜面点处卫星高度角的变化。首先需要关注的是当限制$\theta_{RT}>0°$时,BDS-3-R观测几何的卫星高度角范围约为13.5°~90°,如图8中灰色区域。在此高度角区间内,BDS-3 3种轨道卫星对反射事件数量的贡献基本一致,且随着镜面反射点处卫星高度角的减小呈现线性增加的趋势。同时,GPS系统的MEO卫星也展现出相同的变化趋势。当进一步考虑$\theta_{RT}<0°$时,BDS-3系统的MEO和IGSO和GPS系统的MEO卫星仍保持相同的变化趋势,而BDS-3系统的GEO卫星从18°开始随卫星高度角减小而显著增加,与其他3种卫星的相比增长约50%。同样的结果也可在增加$|\lambda_S|>66.34°$约束下得到观察到,如图8中4条虚线所示。此时,单颗BDS-3系统的MEO、IGSO和GPS系统的MEO产生的反射事件数变化趋势基本相当,且随高度角的减小基本保持不变。相反地,BDS-3系统的GEO卫星在高度角[18°,90°]区间为0,而在[0°,18°]区间迅速增大。在10°和5°高度角时与其他卫星相比分别增大了约2.3倍和6.2倍。由此可得出结论:GEO卫星轨道的特殊性使得其难以实现高纬度地区的高卫星高度角观测,而趋向于在极地区域产生低卫星高度角的观测事件,这有利于提升以掠射观测方式为主的卫星计划对极地的观测潜力。

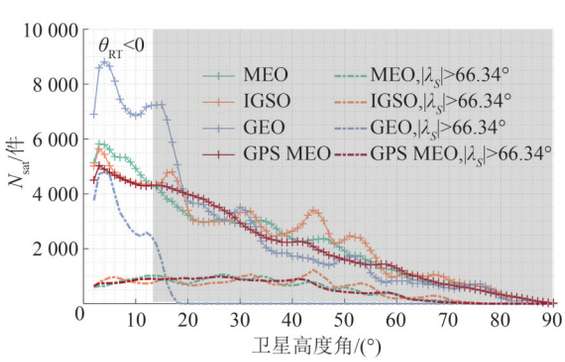


图8 GPS和BDS-3系统平均单颗卫星GNSS-R事件数

Fig. 8 Average GNSS-R Events for a Single Satellite of GPS and BDS-3

3.1.3 轨道高度的影响综合分析

为具体研究轨道高度对采样空间分辨率和平均重访周期的影响,分别计算了不同轨道高度情况下的平均空间分辨率和平均重访周期,结果如图9所示。

由图9可知,轨道高度的变化对平均空间分辨率和重访周期具有较大的影响,且对南北半球的影响基本一致。随着轨道高度的增加,平均空间

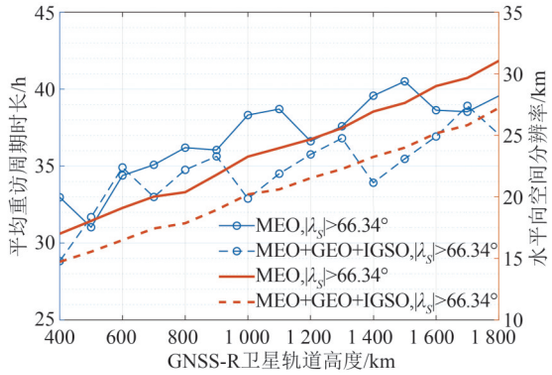


图 9　不同轨道高度对极地区域 BDS-3-R 平均空间分辨率和平均重访周期的影响

Fig. 9　Effects of Different Orbital Altitudes on Mean Spatial Resolution and Mean Revisit Period of BDS-3-R in Polar Regions

分辨率逐渐减低，重访周期逐渐增大。因此，可以认为最优化轨道高度应该尽量偏低，从而在时空采样能力方面达到最优化。然而，实际情况中需要考虑在轨载荷限制和其他复杂外界因素等问题，因此不能极度采用最低的卫星轨道。此外分析也表明，对于 BDS-3 系统而言，GEO 和 IGSO 高轨卫星的加入使得平均重访周期有不同程度的缩短。同时，高轨卫星也提高了观测空间分辨率，且其随着轨道高度升高更显著，800 km 时可提高近 12%。

3.2　轨道倾角影响

卫星的轨道倾角 η 表示卫星绕地球运行的轨道面与赤道面的夹角，范围为[0°，180°]。轨道倾角对卫星极地观测的影响很大，接近于 90°的轨道倾角有利于实现全球范围内的观测，例如 ICESat 和冷卫星系列卫星的轨道倾角均为 98°。然而，由于 GNSS-R 技术采用多基地观测模式，因此轨道倾角对 GNSS 技术在极地观测性能方面的影响需要进一步研究。因此，本文在 TDS-1 卫星轨道参数的基础上，仅改变轨道倾角，仿真和分析不同倾角下 GNSS-R 技术对极地观测时空间分辨率和重访周期的变化。仿真时长为 10 d，轨道倾角以 5°为步长，在[60°，120°]变化，基于 BDS-3 系统得到的极地区域观测空间分辨随经纬度变化的趋势如图 10、图 11 所示。

根据图 10 所示，不同轨道倾角条件下观测空间分辨率存在显著差异，随着轨道倾角偏离 90°，BDS-3-R 观测覆盖范围逐渐减小。当轨道倾角为 60°时，观测仅覆盖到纬度 73°，这也导致在覆盖边界处的采样能力较弱，进而出现巨大的曲线跳变。此外，由于对称性的影响，轨道倾角为 60°和 120°时的观测覆盖能力基本一致。图 10(c)、图 10(d)为考虑高轨卫星的结果，对比发现高轨卫星对空间分辨率的提升十分有限。这一情况主要受两方面因素影响：一方面是高轨卫星数量较少，另一方面是由于 GEO 卫星倾角较小，难以产生极地 GNSS-R 事件。

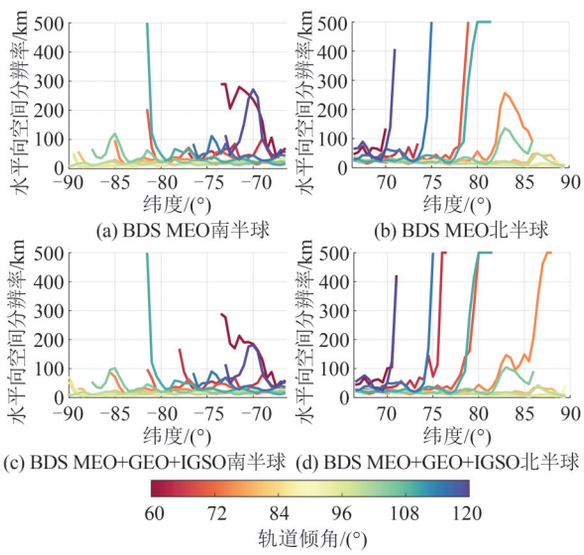


图 10　不同轨道倾角下观测空间分辨率随纬度的变化

Fig. 10　Variation of BDS-3-R Spatial Resolution with Latitude at Different Orbital Inclination Angles

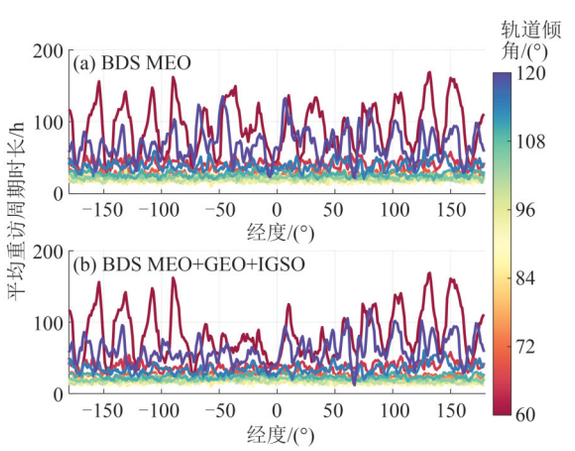


图 11　不同轨道倾角下观测空间分辨率随经度变化（仅考虑极地区域）

Fig. 11　Variation of BDS-3-R Spatial Resolution with Longitude at Different Orbital Inclination Angles (Only Polar Region Data Are Counted)

轨道倾角 η 变化对观测重访周期的影响，可参考图 12 和图 13。

由图 12 可知，不同轨道倾角条件下重访周期随纬度变化存在显著差异。倾角偏离 90°，一方面覆盖高纬度范围出现差异，另一方面由于边界处的反射事件数量少引起覆盖的观测边界重访周期不稳定。尽管倾角偏离 90°，观测覆盖范围变小，

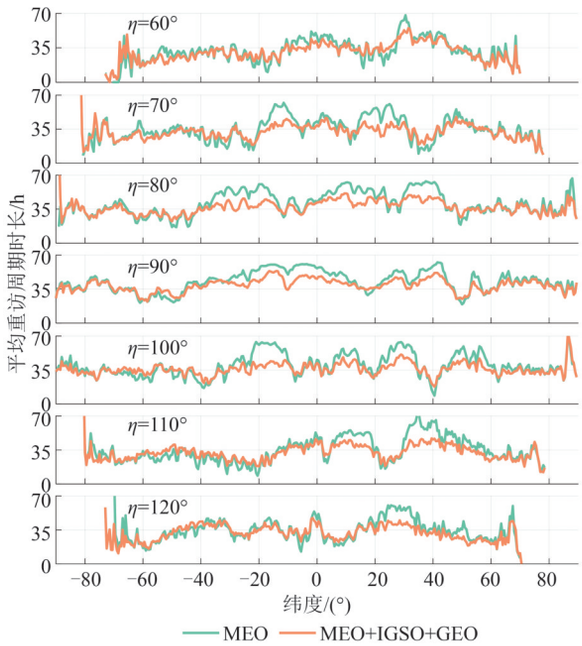


图12 不同轨道倾角条件下重访周期时长随纬度的分布

Fig. 12 Distribution of Revisit Period Duration with Latitude Under Different Orbital Inclination Conditions

但整体重访周期缩短。例如,倾角为60°和120°时,纬度为60°的区域重访周期明显小于倾角为90°时的情况。此外,考虑高轨卫星时,由图12可得在中低纬度区域重访周期明显减小,而在极地区域差异很小。图13展示了不同轨道倾角条件下重访周期时长随经度变化的结果,可观察到重访周期在经度方向的变化随轨道倾角呈现不同的变化趋势,这可能与BDS-3轨道面个数以及其他轨道根数相关,如升交点赤经,此处不展开讨论。轨道倾角越偏离90°,重访周期随经度波动越大,在纬度0°~100°区间变小明显。例如,当轨道倾角为60°和120°时,重访周期在65°左右达到最小值15 h,而倾角为90°时,整个纬度区间重访周期稳定在35 h左右。此外,由于GEO和IGSO位于东半球,东半球区域的重访周期进一步变小。然而,鉴于此处仅统计了极地区域数据,高轨卫星的加入对沿经度方向的重访周期提升较小,但提升幅度随着倾角偏离90°越大而越明显。

由于轨道倾角改变了观测值在纬度向的分布,因此观测数量趋向集中于中低纬度区域并减小该区域的重访周期。随着轨道倾角增大,整体的重访周期减小,但观测范围缩小了。轨道倾角对极地区域观测综合影响如图14所示。

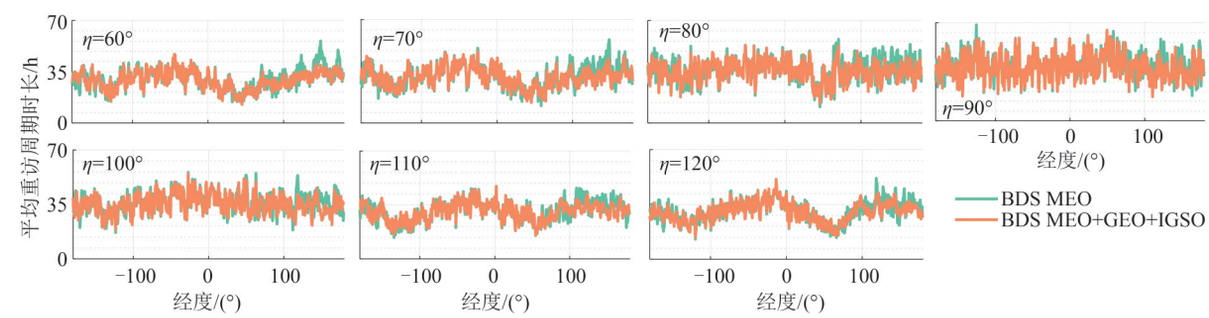


图13 不同轨道倾角条件下重访周期时长随经度的分布(仅统计极地区域数据)

Fig. 13 Distribution of Revisit Period Duration with Longitude Under Different Orbital Inclination Conditions (Only Polar Region Data Are Counted)

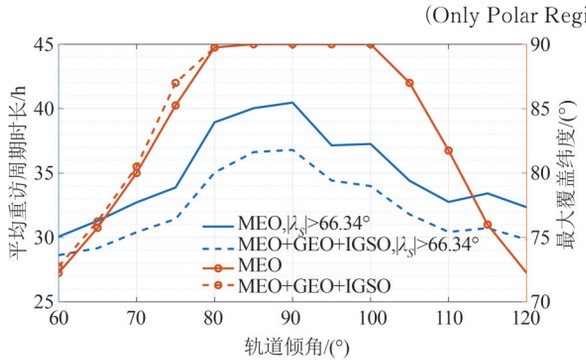


图14 不同轨道倾角对极地区域平均重访周期和观测覆盖范围的影响

Fig. 14 Effect of Different Orbital Inclination on Mean Revisit Period and Observation Coverage of Polar Region

如图14所示,随着轨道倾角接近90°,观测重访周期时长逐步增大。在仅考虑MEO卫星时,倾角为60°和80°的重访周期分别为30 h和39 h,且在倾角为90°时达到最大值约40.4 h。轨道倾角为[95°,100°]区间的重访周期约为37 h,这与文献[18]指出的采用8颗卫星组网得到的重访周期约为4.5 h结论相近。当进一步加入高轨卫星后,平均重访时长整体缩短约10%,如图14中蓝色折线所示。轨道倾角变化对极地观测覆盖范围有直接影响。当倾角为60°和120°时,观测点覆盖的最大纬度仅为71°;轨道倾角为70°和110°时,观测点最大纬度仍然低于83°;仅当倾角为[80°,100°]时,观测范围才能基本覆盖整个南北极圈。因此,若实现极地区域无盲区观测,轨道倾角需要控制在[80°,100°]以内。实际分析发现,80°的轨道倾角可以覆盖南北极的中心区域,但其位于

极地中心点的观测密度低于倾角为90°的情况。若考虑到采用单颗卫星BDS-3-R极地观测，轨道倾角为[80°,90°]或者[90°,100°]时最佳。若考虑双卫星组网，建议采用不同轨道倾角，例如第一颗卫星轨道倾角为[75°,80°]，第二颗卫星倾角为[85°,90°]，此时可最大化同时顾及高纬度地区和极地中心点地区。

3.3　反射天线波束角及指向影响分析

实际应用中反射信号天线为窄波束高增益天线，难以实现全向反射信号接收和处理，使得时空观测性能下降。对此，本文进一步基于仿真数据通过设置天线波束角以及指向信息来分析其对观测能力的影响，如图15所示，其中β为天线指向与天底方向夹角。

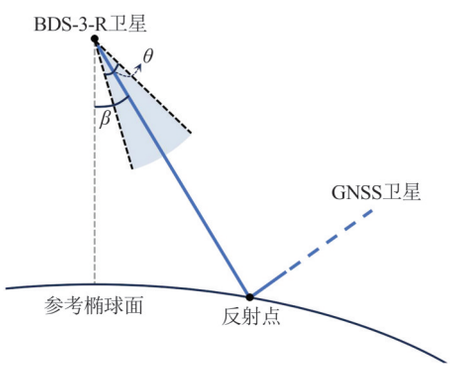


图15　反射天线波束角及指向影响分析示意图

Fig. 15　Diagram of Reflected Antenna Beamwidth and Pointing Orientations

由统计分析可得不同天线波束角度条件下仿真(TDS-1参数)观测数量与天线指向的关系，结果采用极坐标图表示，如图16所示。

图16为仅统计极地区域观测值的结果，极坐标[0°,360°]表示天线指向方位角，半径方向[0°,80°]表示天线指向与天底方向夹角。随着波束角增大，观测值数量几乎呈现正比例增多，波束角为20°、40°、60°时反射事件数量分别主要集中在天线倾角β为[50°,70°]、[40°,60°]和[30°,50°]区间。波束角为20°时，南、北两极区域的大量反射事件集中在方位角[195°,225°]、倾角为[50°,70°]区间。波束角为40°和60°时，由于波束角增大，反射事件集中的区域趋于扩大，但均可发现南北极区约210°方位的反射事件数量最多，这种分布特性可能主要与BDS-3卫星以及BDS-3-R卫星的轨道特点有关。反射天线倾角的选择与波束角和观测模式(非掠射和掠射方式)有关。实际上倾角为[50°,60°]时基本上主要为掠射观测事件，由结果可得极地区域观测采用低高度的掠射观测方式实现的观测时空性能更优。

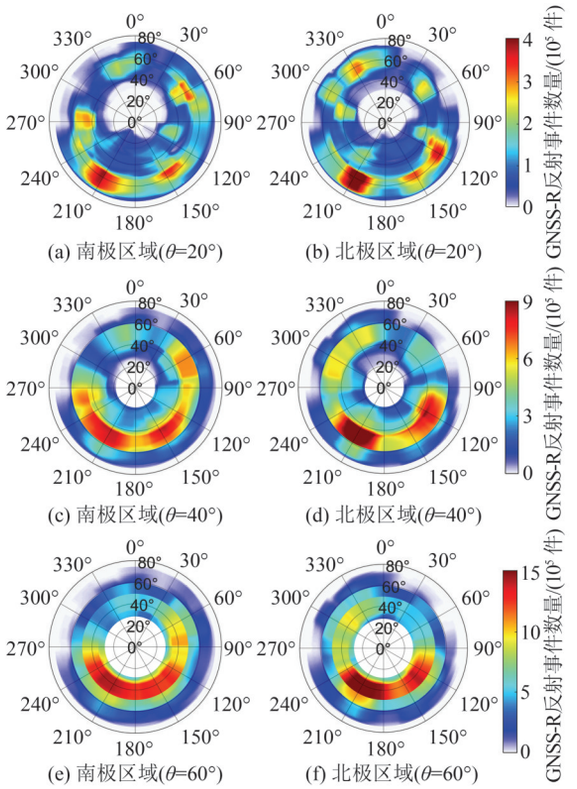


图16　不同波束宽度以及天线指向与观测值数量分布关系

Fig. 16　Distribution of Observation Counts with Respect to Different Beamwidths and Antenna Pointing Directions

4　结　语

星载GNSS-R技术因其低成本和高时空采样能力，结合极地区域反射面的高反射率特性，成为极地观测的有效手段。虽然现有的GNSS-R卫星大多只接收GPS或Galileo卫星信号，然而在中国BDS-3全面建成的背景下，探索将基于多类型轨道的BDS-3-R技术应用于极地观测显得十分必要，且有望进一步提升BDS的潜在应用价值。因此，本文在二行轨道参数的基础上，进行为期10 d的极地BDS-3反射事件仿真，并提出了新的时空观测性能评估方法，基于单颗BDS-3-R卫星观测得出以下结论：

1)随着BDS-3-R卫星轨道高度的增加，观测重访周期会逐渐增大，观测平均空间分辨率会逐渐降低。例如，当轨道高度为800 km时，重访周期约为35 h，空间分辨率约为17.6 km。

2)在反射事件卫星高度角为[20°,90°]时，3种类型轨道卫星所产生的反射事件数量基本一致。然而，在极地区域，BDS-3的GEO卫星几乎不能实现高卫星高度角观测。当卫星高度角低

于20°时,单颗高轨GEO卫星所生成的反射事件数量具有显著优势,表明高轨GEO卫星有利于掠射BDS-3-R观测事件数量的提升。

3)BDS-3-R卫星轨道的倾角对于极地观测的影响较大。当轨道倾角低于80°或大于100°时,会导致南北极中心区域出现监测盲区。然而,随着卫星轨道倾角偏离90°,观测的重访周期也会进一步增大。例如,当倾角为[95°,100°]时,重访周期约为37 h,与已有研究[18]结论相一致。而倾角为70°时,重访周期可减小至30 h,但此时最大观测纬度仅为83°。因此,采用轨道倾角分别为[70°,80°]和[80°,90°]的双星座设计可以有效提升对极地区域的观测能力。

4)针对极地区域的星载GNSS-R观测,由于GNSS卫星的轨道倾角基本在55°左右,因此星载反射信号天线的倾角、指向角以及天线波束角对观测性能影响较大。初步的分析表明,对于BDS-3-R极地观测,反射事件具有集中在特定方位向的特点,且此时采用较大天线倾角实现的极地观测时空性能会达到最优。

本文主要从几何层面仿真研究了低轨卫星轨道倾角及轨道高度对时空观测性能的分析。然而在实际应用中,卫星载荷通道数、接收机灵敏度、多卫星组网方式等对时空观测性能均造成影响。这也是后续的一个研究点。此外,本文提出的评估方法仅与特定观测周期内地面反射点的空间分布有关,因此也同样适用于多颗卫星组网的时空观测性能评估。随着在轨卫星载荷计算能力的增强和低轨微小卫星发射成本的降低,利用多系统多频段反射导航信号进行对地观测成为热点方向。基于BDS-3导航信号进行极地遥感,可以进一步拓展北斗卫星信号的潜在应用价值。

参 考 文 献

[1] SONG M F, HE X F, JIA D Z, et al. Sea Surface States Detection in Polar Regions Using Measurements of Ground-Based GNSS Interferometric Reflectometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4508414.

[2] MUNOZ-MARTIN J F, ONRUBIA R, PASCUAL D, et al. Experimental Evidence of Swell Signatures in Airborne L5/E5a GNSS-Reflectometry[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1759.

[3] QIN L Y, LI Y. Wind Speed Retrieval Method for Shipborne GNSS-R[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1000205.

[4] WANG Y, MORTON Y J. Coherent GNSS Reflection Signal Processing for High-Precision and High-Resolution Spaceborne Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(1): 831-842.

[5] CARDELLACH E, FABRA F, NOGUÉS-CORREIG O, et al. GNSS-R Ground-Based and Airborne Campaigns for Ocean, Land, Ice, and Snow Techniques: Application to the GOLD-RTR Data Sets[J]. *Radio Science*, 2011, 46(6): 2011RS004683.

[6] 王峰, 李建强, 杨东凯, 等. "吉林一号"宽幅01B卫星GNSS-R数据风速反演研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 56-67.
WANG Feng, LI Jianqiang, YANG Dongkai, et al. Wind Speed Retrieval Using GNSS-R Data from "Jilin-1" Kuanfu-01B Satellite[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 56-67.

[7] 叶世榕, 罗敱琪, 南阳, 等. 一种改进的星载GNSS-R卷积神经网络海冰检测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 90-99.
YE Shirong, LUO Xinqi, NAN Yang, et al. An Improved Sea Ice Detection Method Based on Spaceborne GNSS-R Using CNN[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 90-99.

[8] SONG M F, HE X F, WANG X L, et al. Study on the Exploration of Spaceborne GNSS-R Raw Data Focusing on Altimetry[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 6142-6154.

[9] 郭斐, 董桂芳, 朱逸凡, 等. 一种土地类型标签精细化的GNSS-R土壤湿度反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 47-55.
GUO Fei, DONG Guifang, ZHU Yifan, et al. A Refined Land Type Digitization Method of GNSS-R Soil Moisture Inversion[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 47-55.

[10] CARDELLACH E, LI W Q, RIUS A, et al. First Precise Spaceborne Sea Surface Altimetry with GNSS Reflected Signals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 102-112.

[11] CARTWRIGHT J, NGUYEN V, JALES P, et al. Sea Ice Classification and Altimetry Using Grazing Angle Reflected GNSS Signals Measured by Spire's Nanosatellite Constellation[C]//EGU General Assembly, Göttingen, Germany, 2021.

[12] NGUYEN V A, NOGUÉS-CORREIG O, YUASA T, et al. Initial GNSS Phase Altimetry Mea-

surements from the Spire Satellite Constellation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(15): e2020GL088308.

[13] SONG M F, HE X F, ASGARIMEHR M, et al. Investigation on Geometry Computation of Spaceborne GNSS-R Altimetry over Topography: Modeling and Validation[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2105.

[14] CARDELLACH E, WICKERT J, BAGGEN R, et al. GNSS Transpolar Earth Reflectometry Exploring System (G-TERN): Mission Concept[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 13980-14018.

[15] 王迎强, 严卫, 符养, 等. 单颗LEO卫星轨道参数对GNSS反射事件分布和数量影响的模拟研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(12): 1410-1414.
WANG Yingqiang, YAN Wei, FU Yang, et al. Simulation of Impacts of Single LEO Satellite Orbit Parameters on GNSS Reflection Event's Distribution and Number[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(12): 1410-1414.

[16] 杨东凯, 王峰, 李伟强, 等. 基于低轨卫星的北斗反射事件仿真分析[J]. 电波科学学报, 2015, 30(3): 409-416.
YANG Dongkai, WANG Feng, LI Weiqiang, et al. Simulation Analysis of BeiDou Reflection Events Based on LEO Satellites[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015, 30(3): 409-416.

[17] 柳聪亮, 白伟华, 夏俊明, 等. 低轨卫星星载GNSS反射事件模拟分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 826-831.
LIU Congliang, BAI Weihua, XIA Junming, et al. Simulation Study of Spaceborne GNSS-R Events[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6): 826-831.

[18] 王峰, 杨东凯, 张波. 星载GNSS反射信号时-空性能仿真分析[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(2): 760-766.
WANG Feng, YANG Dongkai, ZHANG Bo. Spatiotemporal Performance of Spaceborne Global Navigation Satellites System Reflectometry[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(2): 760-766.

[19] 白伟华, 赵丹阳, 夏俊明, 等. 不同反射天线覆盖和安装条件下星载GNSS-R关键参数的仿真分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 386-395.
BAI Weihua, ZHAO Danyang, XIA Junming, et al. Statistical Analysis of Simulated Space-Borne GNSS-R Data in Different Antenna Coverage and Installation Condition[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 386-395.

[20] MARKUS T, NEUMANN T, MARTINO A, et al. The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science Requirements, Concept, and Implementation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 190: 260-273.

[21] BUSSY-VIRAT C D, RUF C S, RIDLEY A J. Relationship Between Temporal and Spatial Resolution for a Constellation of GNSS-R Satellites[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, 12(1): 16-25.

[22] KELSO T S. Frequently Asked Questions: Two-Line Element Set Format[J]. *Satellites Times*, 1998, 4(3): 52-54.

[23] 宋敏峰, 何秀凤, 王笑蕾, 等. 顾及地球曲率及椭球高的GNSS-R几何计算方法[J]. 测绘学报, 2023, 52(6): 884-894.
SONG Minfeng, HE Xiufeng, WANG Xiaolei, et al. A GNSS-R Geometry Computation Method Considering the Earth's Curvature and Ellipsoidal Height[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(6): 884-894.

[24] 宋敏峰, 何秀凤, 王笑蕾, 等. 星载GNSS-R镜面点及空间路径初始化新方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 131-138.
SONG Minfeng, HE Xiufeng, WANG Xiaolei, et al. A New Initialization Method for Specular Points and Space Paths Computation in Spaceborne GNSS-R[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 131-138.