0254-6124/2022/42(3)-0476-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Yan, MENG Xiangguang, BAI Weihua, SUN Yueqiang, LIAO Mi, HAN Ying. Analysis of Beidou Radio Occultation Data from FY-3D Satellite (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(3): 476–484. DOI:10.11728/cjss2022.03.210208019

FY-3D 卫星的北斗掩星分布特征与误差特性*

刘 艳[1] 孟祥广[1,3,4] 白伟华[1,3,4]
孙越强[1,3,4] 廖 蜜[3] 韩 英[4]

1(中国气象局地球系统数值预报中心 北京 100081)

2(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

3(中国气象局国家卫星气象中心 北京 100081)

4(北京石油化工学院数理系 北京 102617)

摘 要 利用 2018 年 1－3 月 FY-3D 卫星的掩星折射率数据，研究了北斗导航卫星系统的掩星分布特点、数据精度以及误差统计特征。北斗导航卫星系统同步静止轨道掩星沿卫星轨道呈弧状分布在南北两极地区，倾斜轨道掩星在东西半球低纬度地区分别形成一小一大两个空洞，中地球轨道掩星则全球均匀分布。北斗掩星折射率数据精度在探测核心区域，即 12～32 km 范围内，与 ERA5 再分析资料计算的折射率相比，平均偏差的标准差约为 1.5%，在核心区外，标准差从 1.5% 逐渐增大到 6%。静止轨道掩星的平均偏差在高层略大于倾斜轨道和中地球轨道掩星。下降掩星在 20 km 以上区域的标准差大于上升掩星，20 km 以下区域小于上升掩星。高纬地区北斗掩星标准差最小，低纬地区最大，对流层中下层尤其明显。分析结果表明，北斗掩星的数据精度和误差特征与 GPS 掩星数据相似。

关键词 数据精度，掩星，北斗卫星导航系统，风云卫星

中图分类号 P356

Analysis of Beidou Radio Occultation Data from FY-3D Satellite

LIU Yan[1] MENG Xiangguang[1,3,4] BAI Weihua[1,3,4]
SUN Yueqiang[1,3,4] LIAO Mi[3] HAN Ying[4]

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

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

3(*National Satellite Meteorology Center*, *China Meteorology Administration*, *Beijing* 100081)

4(*Department of Mathematics and Physics*, *Beijing Institute of Petrochemical Technology*, *Beijing* 102617)

* 科技部国家重点研发项目（2018 YFC1506702）和中国气象局 GRAPES 数值天气预报模式发展专项共同资助

2021-02-08 收到原稿，2021-12-19 收到修定稿

E-mail：liuyan@cma.gov.cn

Abstract　Based on the Beidou radio occultation refractivity data of FY-3D satellite from January to March in 2018, the distribution characteristics of Beidou occultation, data accuracy and statistical characteristics of errors are studied. The Beidou Geostationary Orbit (GEO) occultation is distributed arc-shaped along the satellite orbit in the northern and southern polar regions, the Inclined Geo-Synchronous Orbit (IGSO) occultation forms one large and one small cavity respectively in the low latitude areas of the eastern and western hemispheres to form two cavities, and the Middle-Earth Orbit (MEO) occultation is distributed uniformly around the world. The accuracy of the Beidou occultion refractivity is within the range of 12～32 km in the core area. Compared with the ERA5 reanalysis data, the standard deviation of the average deviation is about 1.5%. In the range of height below 12 km and above 35 km, the standard deviation gradually increases from 1.5% to 6%. The deviation of GEO occultation over 35 km is slightly larger than that of IGSO and MEO occultation, but the standard deviation is smaller than that of these two types of occultation. The standard deviation of the descending occultation above 20 km is higher than that of the ascending occultation, but the area below 20 km is less than that of the ascending occultation. The standard deviation of the Beidou occultation is the smallest in high latitudes, followed by that in low latitudes and the largest in middle latitudes, especially in the middle and lower troposphere. The accuracy and error characteristics of the Beidou radio occultation data are consistent with the GPS radio occultation data, indicating that the Earth atmosphere occultation detection does not depend on the satellite navigation system.

Key words　Data accuracy, Radio occultation, Beidou navigation satellite system, Fengyun satellite

0　引言

全球导航卫星系统(GNSS)掩星(Radio Occultation, RO)探测是一种新型的地球大气探测技术, 可以长期稳定、经济地获得地球大气的三维结构。GNSS 发射的电磁波信号经过大气层时, 由于受到电离层和大气介质折射的影响, 信号传播路径会发生弯曲, 导致低轨卫星(LEO)接收到的信号出现延迟。通过信号延迟可以推算得到大气折射指数以及电离层的电子密度[1]。掩星观测具有高精度、高垂直分辨率、全天候、全球覆盖、无系统偏差等优势, 因此其对于数值天气预报、全球气候变化以及空间天气的长期监测至关重要[2]。

最早的地球大气掩星探测项目可追溯到 1995 年美国 Microlab-1 卫星上的 GPS/MET(Global Positioning System/Meteorology)掩星试验, 该试验从理论与实践两方面证明了掩星技术可以精确探测地球大气[3,4], 并促进了其他掩星探测计划的发展, 例如德国 CHAMP(CHAllenging Minisatellite Payload)[5] 掩星、阿根廷 SAC-C(Satellite de Aplicaciones Cientificas-C)[6] 掩星以及美德合作的 GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)[7] 掩星等。2006 年中国台湾与美国合作的 COSMIC(Constellation Observation System for Meteorology, Ionosphere and Climate)项目由 6 颗低轨卫星组成星座, 资料量显著增加且可近实时获取, 开始了掩星探测技术在数值天气预报中的业务应用[8]。继 COSMIC 之后, 欧盟气象卫星 METOP[9,10] 和中国风云气象卫星也开始搭载掩星载荷[11-13]。2019 年发射的 COSMIC-2 卫星是 COSMIC 的后续计划, 由 6 颗 LEO 卫星组成低纬度星座, 同时接收 GPS 和 GLONASS 的信号, 并达到了迄今为止掩星载荷的最高信噪比, 可以更有效探测大气低层信息, 提高数据精度[14,15]。

风云气象卫星自 2013 年 9 月发射的 FY-3C 卫星开始搭载掩星载荷 GNOS(GNSS Occultation Sounder), 该载荷可实现北斗(BDS)和 GPS 掩星的同时探测。继 FY-3C 之后, 所有风云极轨卫星都计划搭载 GNOS 载荷。目前在轨的有 FY-3C 和 2017

年 11 月发射的 FY-3D 两颗卫星。自 GNOS 开始提供数据以来，利用 GNOS 数据开展了各种研究，包括数据质量的评估和算法改进[16-21] 以及科学研究等[22,23]。GNOS 的 GPS 掩星数据已在中国气象局[13]和国外主要数值预报中心业务中应用[24]。

但是与 GPS 掩星相比，GNOS 北斗掩星只有一些初步的结果[17,18,23]，无论研究还是应用都严重滞后，因此需要加强北斗掩星的研究。北斗导航系统的轨道与其他导航卫星系统的轨道不相同，是国际上唯一由中地球轨道（MEO）、同步静止轨道（GEO）及倾斜同步轨道（IGSO）三种轨道组成的混合星座导航系统。这些特有的空间几何结构会对掩星事件的分布以及精密定轨造成影响。FY-3C 和 FY-3D 发射时，北斗导航卫星系统尚未满星座运行，GNOS 接收的是北斗二代导航卫星信号，该导航系统主要在亚太地区上空运行，会造成很多区域观测不到参考星，影响掩星数据的精度。因此，需要结合掩星数据反演过程，研究北斗掩星数据精度是否与其他 GNSS 掩星数据精度一致，这是北斗掩星数据能否被广泛应用的前提。目前北斗导航卫星系统已于 2020 年实现全球覆盖，FY-3E 及其后续卫星将接收北斗三代导航卫星信号，也需要研究北斗掩星数据的误差特征，为 GNOS 探测器的改进提供参考依据。

本文利用 FY-3D 的 GNOS 北斗掩星数据以及 ECMWF 的第 5 代再分析资料 ERA5 作为精度评估的第三方数据，分析 GNOS 的 BDS 掩星数据精度以及误差特征。

1 GNOS 载荷与反演方法

GNOS 是搭载于风云气象卫星上的掩星探测仪器，由中国科学院国家空间科学中心研制，是国际上首台北斗与 GPS 双卫星导航系统兼容的星载掩星探测仪[13]。该载荷由 3 副天线、3 台射频单元和 1 台数据处理单元组成，其采用了低噪声射频前端技术，高动态、高灵敏度信号捕获跟踪技术，以及相位中心稳定天线技术等多种技术手段。在设计上充分考虑 GPS 与 BDS 信号的差异，兼顾了中性大气和电离层的探测需求，探测范围覆盖了 800 km 直到近地面的高度区间[12,13]。GNOS 大气掩星的数据处理包括以下步骤。

步骤 1 获取导航卫星的精密星历和精密钟差等辅助数据，利用 GNOS 定位观测数据和上述辅助数据，进行低轨卫星 LEO 精密定轨，得到 LEO 精密轨道和 GNOS 接收机精密钟差。

步骤 2 利用步骤 1 的数据以及大气层掩星数据，消除掩星信号观测链上的各种误差，提取出大气层附加相位量。

步骤 3 利用大气层附加相位数据，使用 ROPP 软件[25] 反演得到各级大气掩星数据，包括大气弯曲角、折射率以及温度和气压等。

GNOS 的 GPS 掩星探测采用先进的开环追踪技术，极大地改善了对流层低层的探测问题，但是北斗掩星由于接收 B1 I 频段的码速率比较大，导致接收机内部使用的多普勒模型不能满足通过北斗 B1 I 伪距码跟踪北斗 B1 I 的精度，因此 GNOS 的北斗掩星探测目前仍使用闭环跟踪技术。

2 数据与方法

论文使用的数据为国家卫星气象中心[*]2018 年 1－3 月 FY-3D 的 GNOS 北斗掩星折射率数据。第三方评估数据来自欧洲中期天气预报中心 ECMWF 第 5 代再分析资料 ERA5，比较 FY-3D 的北斗掩星折射率与 ERA5 计算的折射率之间的差异。折射率计算公式为

$$N = 77.6 \times \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \times \frac{e}{T^2}. \tag{1}$$

其中，P 为气压（单位 hPa），T 为温度（单位 K），e 为水气压（单位 hPa）。根据式(1)，利用 ERA5 资料的温度、湿度和压力场数据计算得到折射率。

评估方法是分析 FY-3D 的北斗折射率数据与 ERA5 计算的折射率数据的平均偏差和标准差。由于折射率的数据量级从地面的 400 N 左右随高度指数递减，到 50 km 时只有零点几个单位 N，因此平均偏差均采用 ERA5 计算的折射率进行归一化处理，即分析 $\frac{N^{\mathrm{o}} - N^{\mathrm{b}}}{N^{\mathrm{b}}}$ 的平均值和标准差，N^{o} 表示观测折射率，N^{b} 表示 ERA5 计算的折射率。

[*] http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Data/Satellite.aspx

由于掩星数据与 ERA5 再分析资料的时空分辨率不同，为能够比较，需要进行时空匹配。时间匹配方法是，将 ERA5 分析时间前后 3 h 内的掩星数据都归为当前时间内的观测数据，空间匹配是以双线性插值方法将掩星周围 4 个点的 ERA5 资料插值到掩星观测点上。最后，将观测值与 ERA5 计算的折射率在垂直方向做 lg$N$ 插值，分别插值到 400 m 间隔的高度上。ERA5 数据的最高高度约在 50 km，因此本文分析 0～50 km 范围内北斗数据的精度和统计特征。

由于电磁波信号出错等原因，可能存在错误的掩星数据或者离模拟值很远的离群观测，因此采用 GRAPES 模式对风云卫星 GPS 掩星同样的质量控制方法来剔除错误和离群数据。首先，在背景场检查中，如果掩星廓线归一化后的平均偏差有超过 100% 的数据，则剔除整根廓线；其次，如果整根廓线的平均偏差超过了 20% 的观测达到 12% 以上，则剔除整根廓线；最后，将掩星廓线中平均偏差超过 10% 以上观测标志为缺测。

对于任何匹配的样本，可以利用如下公式计算其平均偏差和标准差，即

$$X_i = \frac{N_i^{\mathrm{o}} - N_i^{\mathrm{b}}}{N_i^{\mathrm{b}}}, \tag{2}$$

$$\overline{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i, \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})}. \tag{4}$$

式中，下标 i 代表第 i 对匹配的掩星，n 代表匹配的样本总数，$\overline{X}$ 表示平均偏差，σ 表示平均标准差。

3　结果分析

3.1　掩星事件分布及数量

掩星事件发生在 GNSS 与 LEO 卫星之间的切点位置。FY-3D 轨道高度在 830 km 以上，轨道倾角接近 98.7°。北斗二代卫星导航系统由 5 颗 GEO、5 颗 IGSO 和 4 颗 MEO 卫星组成，并主要位于亚太地区上空，这些特点决定了北斗掩星事件的分布特征。图 1 给出了 BDS 掩星事件分布情况。由图 1 可以看出，由于 GEO 卫星位于赤道上空，相对地面保持静止不动，因此 GEO-LEO 掩星事件主要分布在纬度 60°－90°南北极区范围内，并沿卫星轨道呈弧形带状分布。IGSO 卫星在中国上空呈 8 字形运行，IGSO 卫星的分布和运行状况造成 IGSO-LEO 掩星事件在低纬度地区形成一小一大两个空洞，并且东半球的掩星事件多于西半球的掩星事件。MEO 卫星轨道高度

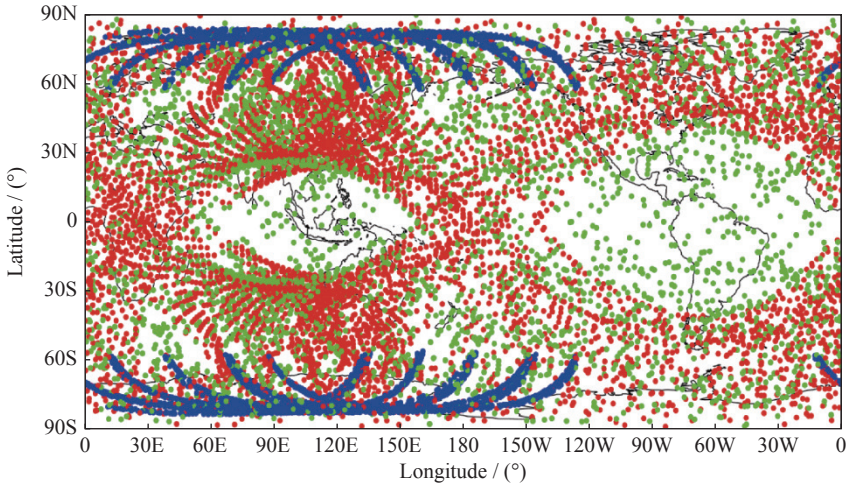


图 1　2018 年 1 月 1 日至 3 月 31 日期间 FY-3D 卫星北斗掩星事件的水平分布（蓝点为静止轨道掩星，红点为倾斜轨道掩星，绿点为中地球轨道掩星）

Fig. 1　Horizontal distribution of Beidou RO events in FY-3D satellite from 1 January to 31 March in 2018 (Blue dots respresent GEO RO, red dots represent IGSO RO, and green dots represent MEO RO)

与 GPS 的卫星轨道高度类似，掩星分布与 GPS 的掩星分布类似，全球均匀分布。FY-3D 的 GNOS 接收机有 6 个北斗掩星通道，其与 FY-3D 卫星的轨道特点以及北斗轨道的空间结构共同决定了北斗掩星的数量(见表 1)。由表 1 可见：约 70% 的掩星事件发生在东半球，30% 的掩星事件发生在西半球；GEO、IGSO 和 MEO 这三类掩星中以 IGSO 掩星数量最多，约占 40%。图 2 给出的是 2018 年 1－3 月间 GNOS 北斗掩星数量的时间演变，FY-3D 平均每天接收约 170 次北斗掩星事件。

3.2 探测的最低高度

掩星能够探测到的最低深度是考查其探测性能的一个重要指标。由于受水气影响，在对流层低层会引进多路径传播误差、接收机追踪误差以及超折射误差等各种误差，因此在 4 km 以下掩星的探测能力受限，能够穿过复杂大气到达近地面的廓线比例降低。图 3 给出了掩星资料按其所在经纬度位置分别划分到 10°×10°格点上后，统计得到的各格点上 GNOS 探测到的平均最低高度。从图 3 可看到，BDS 掩星探测的最低高度普遍在 4 km 之上，原因是 GNOS 北斗掩星附加相位的追踪采用闭环方法，其主要缺点是不容易跟踪到对流层低层信号，尤其是在大气边界层以下。南北两极高纬度地区的探测深度大都能到达 4 km 以下，这可能与高纬地区的水气少、反演过程受影响少有关。从图 3 中还发现一个现象，太平洋上空北斗掩星的探测高度普遍高于其他海域，并且南半球太平洋上探测的高度又是最高的，该现象值得进一步研究。

3.3 与 ERA5 计算折射率的比较

利用第 3 节的质量控制方法，给出如图 4 所示质量控制前(红线)/后(黑线)的折射率廓线。由图 4 可以看出，被剔除掉的廓线大部分是 14 km 以下和 30 km 以上出现了异常的廓线，14 km 以下的异常廓线主要因为信号探测不到更低的高度，导致反演出异常，而 30 km 以上的异常廓线主要与电离层影响有关。图 4 中质量控制前共有 13098 根廓线，质量控制后有 12539 根廓线，剔除率约为 4.3%。质量控制后上升掩星有 7008 根，下降掩星有 5531 根，其各自所占比例分别约为 56% 和 44%，其中上升掩星的剔除率为 4%，下降掩星的剔除率为 5%。以下数据精度分析和误差统计特征都是基于质量控制后的数据得到的。

图 5 所示为北斗掩星折射率与 ERA5 计算的折

表 1 不同轨道的 GNOS 北斗掩星数量和占比

Table 1 Number and proportion of GNOS Beidou RO in different orbits

轨道类型	全球			东半球			西半球		
	GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO
掩星数量	4038	5292	3768	3412	3591	2224	626	1701	1544
占比/(%)	31	40	29	26	27	17	5	13	12

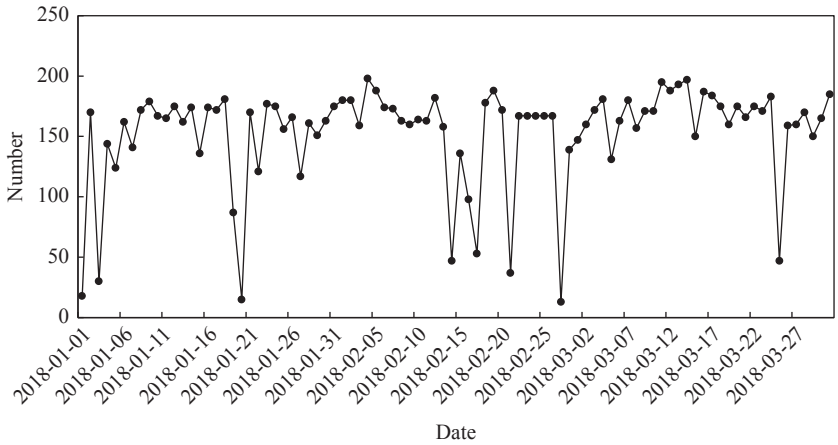


图 2 FY-3D 卫星每天的北斗掩星数量

Fig. 2 Numbers of Beidou RO in FY-3D satellite

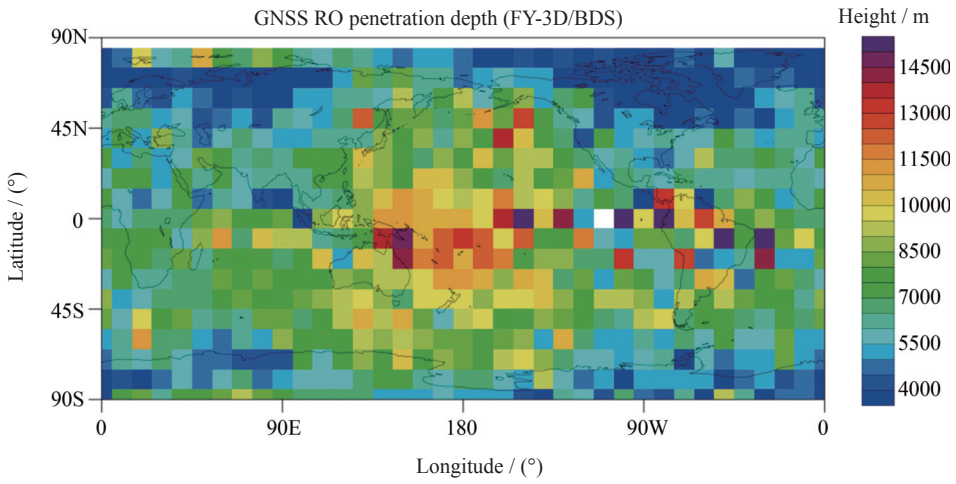


图 3　FY-3D 的北斗掩星探测到的平均最低高度

Fig. 3　Average minimum altitude detected by FY-3D's Beidou occultation

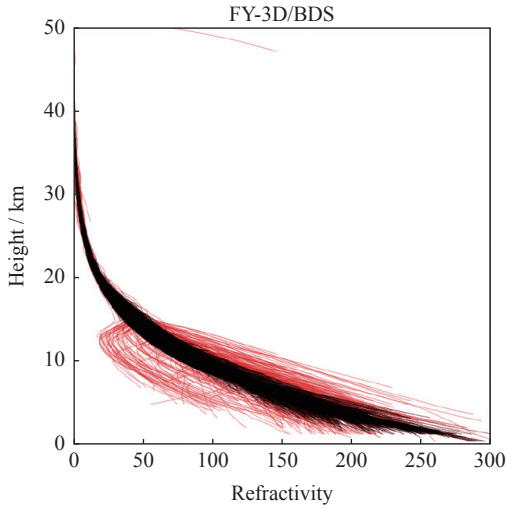


图 4　质量控制前（红色）/后（黑色）的折射率数据

Fig. 4　Refractivity before (red) and after (black) quality control

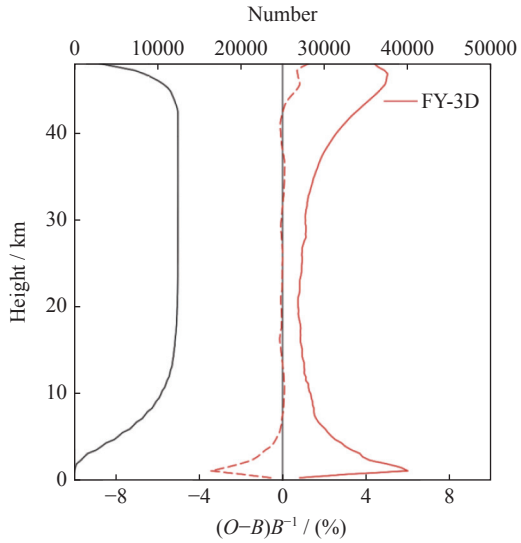


图 5　观测总数（黑实线）以及折射率观测与 ERA5 再分析资料计算的折射率平均偏差（红虚线）和标准差（红实线）。O 表示观测折射率，B 表示 ERA5 计算的折射率

Fig. 5　Mean bias (red dashed line) and standard deviation (red solid line) of refractivity compared with ERA5 reanalysis, and the number (black solid line). O stands for observation refractivity, and B stands for the refractivity based on ERA5 reanalysis

射率相比，其平均偏差和标准差。可以看到，在掩星观测的核心区域，即 8～35 km 高度范围内，北斗折射率与 ERA5 折射率非常一致，平均偏差在 0 附近，标准偏差在 1.0% 以内，反映了掩星观测无偏的特点。在 8 km 高度以下范围，平均偏差最大值约为 3.8%，标准差最大值约为 6%；在 35 km 高度以上，平均偏差在 2% 以内，标准差在 6% 以内。北斗掩星的标准差比 GPS 掩星的略高 0.5%～1%，但是统计特征非常一致，表明地球大气的掩星探测不依赖于特定的卫星导航系统。从图 5 中还可以看到，参与统计的廓线有 12500 多根，但在高度 15 km 以下和 42 km 以上区域，BDS 掩星的数量下降很快。15 km 以下的问题与 BDS 掩星没有使用开环跟踪技术有关，闭环方法很难追踪到大气低层信号，并且容易出现系统性的负折射率偏差；而 42 km 以上的问题，与大气稀薄，折射指数本身量级很小，数据反演过程（例如电离层的影

响、优化估计模型的选择等)的误差容易被放大,导致数据质量下降有关。

北斗卫星有三种轨道,其中 GEO 和 IGSO 卫星分布在亚太地区上空,卫星高度相对较高,且运行速度较慢,MEO 卫星轨道高度与 GPS 相似。北斗系统特有的空间几何结构和运行特点会对精密定轨造成影响。为进一步分析北斗卫星不同轨道对折射率反演的影响,分别统计了 MEO、IGSO 和 GEO 这三类掩星与 ERA5 计算的折射率的平均偏差和标准差(见图 6)。MEO 与 IGSO 掩星的统计特征比较一致,GEO 掩星在 35 km 以上的偏差大于 IGSO 和 MEO 掩星,可能与 GEO 是静止卫星,精密定轨难度最大有关[22],但是这三类掩星的标准差都比较接近。在 35 km 高度以下,GEO 掩星的偏差和标准差明显小于 IGSO 和 MEO 掩星。

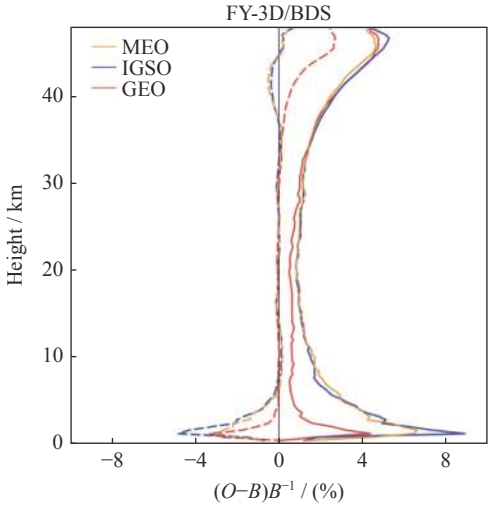


图 6 GEO、IGSO 和 MEO 掩星与 ERA5 再分析资料计算的折射率的平均偏差(虚线)和标准差(实线)

Fig. 6 Mean bias (dashed line) and standard deviation (solid line) of GEO, IGSO and MEO refractivity compared with ERA5 reanalysis

图 7 给出的是区分了上升掩星和下降掩星后,掩星折射率观测值与 ERA5 折射率偏差的平均值和标准差。对大样本而言,上升掩星和下降掩星的统计特征应该是一致的。从图 7 中可发现,GEO 上升和下降掩星在高层出现了分叉,MEO 和 IGSO 没有系统性偏差,但这三类掩星在低层都是下降掩星的偏差小于上升掩星,而在高层下降掩星的偏差大于上升掩星。这个结果与掩星观测的几何过程有关,下降(上升)掩星在高层(低层)跟踪有一个从捕获到跟踪的稳定过程,而在低层(高层)则是下降(上升)掩星由跟踪到失锁的过程,因此下降掩星的观测数据质量在低层好于上升掩星,在高层上升掩星则好于下降掩星。

在不同的纬度带,由于水气条件不同,对掩星数据的反演精度也会造成影响。图 8 以南北纬 60°−90°代表高纬地区,30°N−30°S 代表低纬度地区,南北纬 30°−60°代表中纬地区,划分了 3 个区域,研究北斗折射率在这些纬度带的特点。从不同纬度带的统计特征看,35 km 以下区域有相似的误差结构,高纬度地区的标准差最小,中纬度地区次之,低纬度地区最高;在 35 km 以上,高纬地区的偏差最大。

4 讨论与结论

GNOS 掩星载荷实现了北斗掩星的观测,对于拓

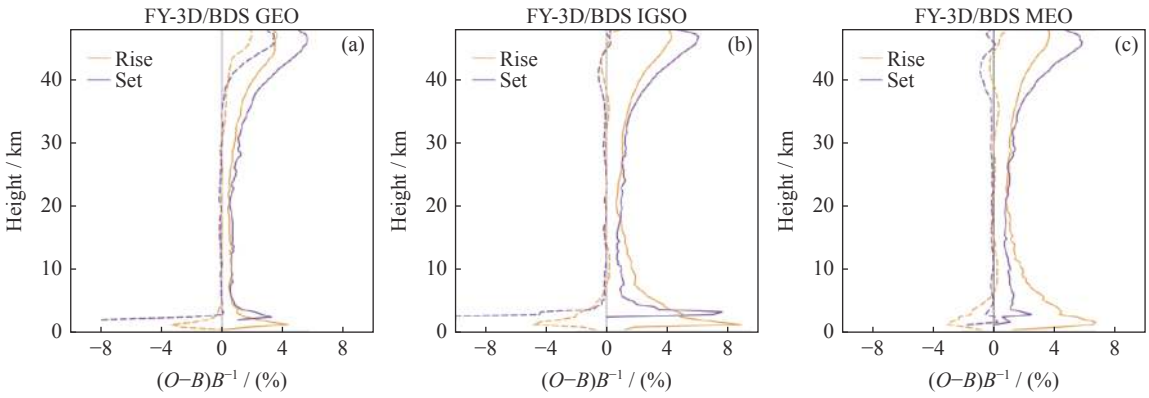


图 7 上升掩星和下降掩星与 ERA5 再分析资料计算的折射率的平均偏差(虚线)和标准差(实线)

Fig. 7 Mean bias (dashed line) and standard deviation (solid line) of rising and setting refractivity compared with ERA5 reanalysis for GEO, IGSO and MEO, respectively

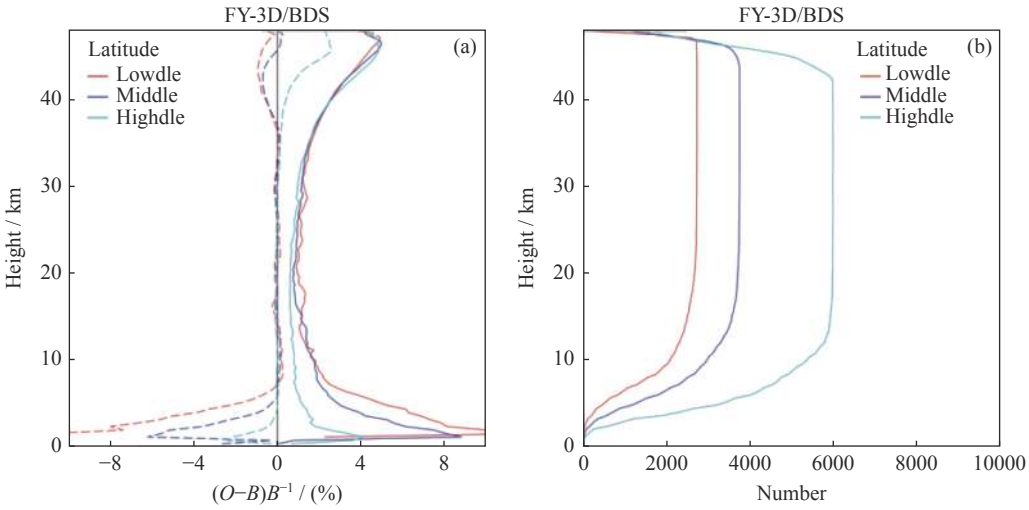


图 8　不同区域的掩星观测与 ERA5 计算折射率的平均偏差（虚线）和标准差（实线）（a）以及掩星数量（b）

Fig. 8　Mean bias (dashed line) and standard deviation (solid line) (a) of RO refractivity compared with ERA5 reanalysis and RO number (b) in low, middle and high latitudes, respectively

展北斗导航卫星系统在气象和空间天气领域的应用，以及利用掩星技术摆脱对单一导航系统的依赖具有重要意义。通过对 FY-3D 卫星的 GNOS 北斗掩星折射率数据的分析，得到以下结论。

（1）受北斗导航卫星的轨道分布、北斗二代导航卫星未满星座运行以及 FY-3D 轨道高度和倾角的共同影响，FY-3D 的 GEO 掩星事件主要分布在南北两极的高纬度地区，IGSO 掩星事件在东西半球的低纬度地区分别形成一小一大两个空洞，尤其是在中国和大洋洲区域，MEO 掩星全球均匀分布。北斗掩星事件在东半球多于西半球。

（2）北斗掩星折射率数据精度在探测的核心区域，即 12～32 km 高度范围内，与 ERA5 再分析资料计算的折射率相比，平均偏差的标准差约为 1.5%，在 12 km 以下和 35 km 以上，标准差从 1.5% 逐渐增大到 6%。

（3）GEO 掩星数据的平均偏差在 35 km 以上略大于 IGSO 和 MEO 掩星，但标准差比这两类掩星小。下降掩星在 20 km 以上区域的标准差高于上升掩星，但 20 km 以下区域小于上升掩星。

（4）高纬地区北斗掩星数据的标准差最小，中纬度区域次之，低纬度地区最大，在对流层中下层尤其明显。

从研究结果分析，风云卫星的北斗掩星数据精度较高，其数据精度和误差特征与 GPS 掩星数据一致。目前北斗导航系统已实现全球满星座运行，GNOS 也可增加更多的北斗掩星通道，从而获得更多的北斗掩星数据，进一步提升北斗掩星数据的科学研究和应用价值。

由于北斗 B1 I 的码速率是 2 MHz，GPS L1/CA 的码速率是 1 MHz，北斗 B1 I 伪距码长为 GPS L1/CA 伪距码长的一半，目前接收机内部使用的多普勒模型仅能达到通过 GPS L1/CA 伪距码跟踪 L1 信号的精度，不能满足通过北斗 B1 I 伪距码跟踪北斗 B1 I 的精度，导致 GNOS 的北斗掩星尚未实现开环跟踪技术，对 4 km 以下大气的探测能力远低于 GPS 掩星，这是将来需要进一步改进的地方。

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] ANTHES R A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, **4**(6): 1077-1103

[3] WARE R, EXNER M, FENG D, *et al*. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, **77**(1): 19-40

[4] 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

[5] 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

[6] HAJJ G A, DE LA TORRE JUÁREZ M, IJIMA B A, *et al*. GPS radio occupations coming of age: spacecraft launches add two new instruments for climate monitoring[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2002, **83**(4): 37

[7] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, *et al*. The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(9): L09607

[8] 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

[9] LOISELET M, STRICKER N, MENARD Y, *et al*. GRAS-Metop's GPS-based atmospheric sounder[J]. *ESA Bulletin*, 2000, **102**: 38-44

[10] VON ENGELN A, HEALY S, MARQUARDT C, *et al*. Validation of operational GRAS radio occultation data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(17): L17809

[11] BI Y M, YANG Z D, ZHANG P, *et al*. An introduction to China FY3 radio occultation mission and its measurement simulation[J]. *Advances in Space Research*, 2012, **49**(7): 1191-1197

[12] 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

[13] SUN Y Q, BAI W H, LIU C L, *et al*. The FengYun-3 C radio occultation sounder GNOS: a review of the mission and its early results and science applications[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(10): 5797-5811

[14] ANTHES R, SCHREINER W. Six new satellites watch the atmosphere over Earth 's equator[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2019: 100

[15] SCHREINER W S, WEISS J P, ANTHES R A, *et al*. COSMIC-2 radio occultation constellation: first results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(4): e2019GL086841

[16] WANG X Y, SUN Y Q, DU Q F, *et al*. GNOS-Radio occultation sounder on board of Chinese FY3 satellites[C]//Proceedings of 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City, QC, Canada: IEEE, 2014

[17] LIAO Mi, ZHANG Peng, BI Yanmeng, *et al*. A preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from the Fengyun-3 C meteorological satellite[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, **73**(6): 1131-1140 (廖蜜, 张鹏, 毕研盟, 等. 风云三号气象卫星掩星大气产品精度的初步检验[J]. 气象学报, 2015, **73**(6): 1131-1140)

[18] WANG Shuzhi, ZHU Guangwu, BAI Weihua, *et al*. For the first time Fengyun-3 C satellite-global navigation satellite system occultation sounder achieved spaceborne Bei Dou system radio occultation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(8): 089301 (王树志, 朱光武, 白伟华, 等. 风云三号C星全球导航卫星掩星探测仪首次实现北斗掩星探测[J]. 物理学报, 2015, **64**(8): 089301)

[19] LIAO M, ZHANG P, YANG G L, *et al*. Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3 C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(2): 781-792

[20] LIAO M, HEALY S, ZHANG P. Processing and quality control of FY-3 C GNOS data used in numerical weather prediction applications[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2019, **12**(5): 2679-2692

[21] WEI J D, LI Y, ZHANG K F, *et al*. An evaluation of Fengyun-3 C radio occultation atmospheric profiles over 2015–2018[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(13): 2116

[22] BAI W D, SUN Y Q, XIA J M, *et al*. Validation results of maximum *S4* index in F-layer derived from GNOS on FY3 C satellite[J]. *GPS Solutions*, 2019, **23**(1): 19

[23] YANG Guanglin, SUN Yueqiang, BAI Weihua, *et al*. Beidou navigation satellite system sounding of the ionosphere from FY-3 C GNOS: preliminary results[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2019, **39**(1): 36-45 (杨光林, 孙越强, 白伟华, 等. 风云三号C星GNOS北斗掩星电离层探测初步结果[J]. 空间科学学报, 2019, **39**(1): 36-45)

[24] BORMANN N, DUNCAN D, ENGLISH S, *et al*. Growing operational use of FY-3 data in the ECMWF system[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(8): 1285-1298

[25] CULVERWELL I D, LEWIS H W, OFFILER D, *et al*. The radio occultation processing package, ROPP[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(4): 1887-1899

(责任编辑: 宋雅娜)