

QX-1 GNOS M 掩星数据质量分析

刘智勇¹ 刘森² 王玺³ 张水平⁴

1(武汉大学遥感信息工程学院 武汉 430072)

2(航天东方红卫星有限公司 北京 100094)

3(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院 北京 100083)

4(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘要 QX-1 GNOS M 是首台在轨实现北斗、GPS 和 Galileo 三系统兼容的小型商业化全球导航卫星掩星探测仪。2021 年 10 月 14 日 18:51 LT, 气象一号 (QX-1) 卫星发射并入轨。自发射以来, 该卫星已收集大量观测数据。基于 QX-1 GNOS M 的结构组成及性能, 统计分析了 2022 年 8 月 17 日全天的掩星事件及其全球分布情况。通过将 8 月 17 日至 9 月 3 日的掩星数据与 NCEP 再分析模式对比, 评估 QX-1 掩星事件的探测穿透深度和折射率精度, 同时检验 Galileo 掩星数据的可靠性和一致性。初步分析结果表明, QX-1 GNOS M 在实现三系统兼容后, 掩星事件数量相较于仅使用 GPS 系统的情况增加了约 1.5 倍。这一结果进一步证明, 不同全球导航卫星系统 (GNSS) 所提供的掩星数据在精度上具有一致性。此外研究显示, 在多系统兼容的背景下, QX-1 GNOS M 能够提供更为丰富和精确的气象数据。

关键词 掩星, GNOS, 小型化, 数据质量

中图分类号 P356

QX-1 GNOS M Radio Occultation Data Performance Analysis

LIU Zhiyong¹ LIU Sen² WANG Xi³ ZHANG Shuiping⁴

1(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072)

2(Dongfanghong Satellite Co., Ltd., Beijing 100094)

3(School of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083)

4(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract QX-1 GNOS M is the first small commercial Global Navigation Satellite System (GNSS) occultation sounder to achieve on-orbit compatibility with BeiDou, GPS, and Galileo systems. On 14 October 2021, at 18:51 LT, the Meteorological Satellite-1 (QX-1) was launched and entered orbit. Since its launch, this satellite has collected a large amount of observational data. This paper provides a detailed

2023-07-03 收到原稿, 2023-08-23 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

introduction to the composition of QX-1 GNOS M and conducts a statistical analysis of the occultation events and their global distribution on 17 August 2022. By comparing the occultation data from 17 August to 3 September with the NCEP reanalysis model, the detection penetration depth and refractivity accuracy of QX-1 occultation events were evaluated, and the reliability and consistency of the Galileo occultation data were tested. Preliminary analysis results show that after achieving three-system compatibility, the number of occultation events detected by QX-1 GNOS M increased by approximately 1.5 times compared to using only the GPS system. This result further confirms that the occultation data provided by different GNSS systems are consistent in accuracy. Additionally, the study indicates that, in a multi-system compatibility context, QX-1 GNOS M can provide richer and more accurate meteorological and atmospheric data.

Key words Radio occultation, GNOS, Miniaturization, Data quality

0 引言

自 1960 年美国开始进行大规模深空探测活动以来,无线电掩星探测技术在这一领域发挥了重要作用.到 1980 年 GPS 星座逐渐受到广泛关注,不断被应用于深空探测及地球探测领域.通过分析 GPS L1(1575.42 MHz)和 GPS L2(1227.60 MHz)信号的延迟,可以计算地球大气的参数.全球首个利用 GNSS 掩星探测技术进行地球大气探测的任务启动后,于 1995 年 4 月 3 日成功发射了 GPS/MET 卫星^[1].GPS/MET 卫星在发射后的几年里提供了高垂直分辨率的高精度大气廓线数据,这些研究数据不仅证实了 GNSS 掩星探测技术对地球大气探测的可行性,相关技术研究还推动了 GNSS 掩星地球大气探测的发展.随着 GPS/MET 任务的成功,已有 20 多个 GNSS 掩星任务陆续实施.早期的 GNSS 掩星任务包括 Orsted 卫星(1999 年丹麦),CHAMP 卫星(Challenging Minisatellite Payload, 2000 年,德国),SAC-C 卫星(2001 年,阿根廷),GRACE 卫星(Gravity Recovery and Climate Experiment, 2002 年,美国与德国合作)卫星等^[2].

由中国台湾的 NSPO(台湾太空中心)与美国的 UCAR, JPL, NRL(全名为海军研究实验室)等合作实施的有关 GNSS 掩星地球大气探测计划——COSMIC 卫星于 2006 年 4 月 15 日在美国加利福尼亚州成功发射^[3],发射的 6 颗 COSMIC 卫星均搭载了 IGOR 型 GNSS 无线电掩星接收机.近年来, COSMIC-2 接过了 COSMIC 计划的重任.由中国台湾 NSPO 和美国 NOA(全名为国家海洋及大气总署)合作建设的 COSMIC-2 于 2019 年 6 月 25 日,在 NASA(美

国国家航空航天局)支持下成功发射. COSMIC-2 的 6 颗卫星上均搭载的是 TriG 型 GNSS 无线电掩星接收机. TriG 型 GNSS 无线电掩星接收机是由 NASA 和 JPL 联合开发的双模多频的 GNSS 无线电掩星接收机,可同时接收 GPS 和 GLONASS 掩星信号,全名为 TGRS(TriG GNSS Radio-occultation System).

中国科学院国家空间科学中心、中国空间技术研究院航天恒星科技有限公司、中国航天电子技术研究院七零四所和部分商业航天公司等 GNSS 无线电掩星探测方面的研究也在逐步走向国际,为全球 GNSS 无线电掩星探测做出了积极贡献.中国科学院国家空间科学中心不断推进 GNSS 掩星大气探测和 GNSS 反射信号遥感探测的仪器研制、算法和应用研究^[3-9],成功完成风云三号气象卫星 FY-3C/D/E 的 GNSS 掩星遥感等 GNSS 掩星载荷的研制、数据处理和应用任务,推动了中国在 GNSS 遥感技术及应用研究领域的发展^[9-19].风云三号气象卫星 FY-3C 在国际上首次实现对 GPS 和北斗双系统兼容的大气层掩星探测、电离层掩星探测及各自的数据反演,验证了星载北斗掩星探测的可行性^[10].风云三号气象卫星 FY-3C/D/E 的载荷 GNOS GNSS 无线电掩星接收机的各项技术性能在国际上处于优势位置, FY-3C GNOS 目前已连续稳定运行超过 9 年,每天持续提供全球掩星廓线数据.

世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)指出,在掩星事件接收在全球范围并且分布均匀的情况下,满足全球数值天气预报的每日最低掩星数量为 25000.而且每日掩星数量越多,数值天气预报的精度就越高.为了降低成本并尽早实现 WMO 对每日掩星事件数量的要求,首台在轨实现北

斗、GPS 和 Galileo 三系统兼容的小型商业化全球导航卫星掩星探测仪 QX-1 GNOS M 于 2021 年 10 月 14 日成功发射入轨^[20]. 本文将对 QX-1 GNOS M 的掩星产品质量进行分析.

1 QX-1 掩星数据与评估方法

QX-1 GNOS M 大气掩星的数据处理过程主要包括: 进行低轨卫星 LEO 精密定轨, 计算每条掩星事件的大气层附加相位 (需要利用精密定轨数据), 计算每条掩星事件的弯曲角 (需要利用大气层附加相位), 反演掩星事件发生位置的大气折射率 (需要利用弯曲角), 计算大气温度、湿度和气压等大气参量. 其中, 大气折射指数可采用大气局部球对称假设的 Abel 积分变换公式得到.

本文采用 NCEP 再分析模式评估 QX-1 GNOS M 掩星数据质量. 折射率廓线是 GNSS 掩星反演过程中的重要参量, 也是数值天气预报系统同化的主要输入参数, 能够体现 GNSS 掩星的数据质量, 因此本文主要通过分析折射率误差廓线验证 QX-1 GNOS M 掩星数据质量.

评估方法为: 记录每条掩星事件的背景大气模式的温度、湿度和压强廓线, 这些数据是根据 GNSS 掩星事件的发生时间、位置经度和位置纬度判断的; 通过 co-located 参考数据正演, 计算背景场折射率廓线; 计算折射率误差廓线, 进而对其进行质量验证评估.

采用大气背景场温度、湿度和压强廓线数据计算折射率廓线, 有

$$N = 77.6 \times \frac{p_d}{T} + 64.8 \times \frac{P_w}{T} + 3.776 \times 10^5 \times \frac{P_w}{T^2}. \quad (1)$$

其中, T 为温度, p_d 为大气干压, P_w 为水汽压.

采用式 (1) 计算的 NCEP 背景场垂直折射率廓线各采样点与气压层一一对应, 为得到平均海拔高度廓线, 需要用读出来的每条掩星事件背景大气模式的温度、湿度和压强廓线作为辅助. 可以利用下式估算各气压层对应的海拔高度 H_i . 大气虚温计算公式为

$$T_v = (1 + 0.608\bar{q})\bar{T}. \quad (2)$$

根据大气虚温计算各气压层的位势高度为

$$Hg_i = Hg_0 + \frac{R_d \times T_v}{g_0} \ln \left(\frac{P_0}{P_i} \right). \quad (3)$$

根据各气压层的位势高度估算各气压层对应的海拔高度为

$$H_i = \frac{g_0}{g} Hg_i. \quad (4)$$

式 (2) 中, T_v 为大气虚温, $\bar{q}$ 为各层平均湿度, $\bar{T}$ 为各层平均温度. 在式 (3) 和 (4) 中, Hg_i 为各气压层的位势高度; Hg_0 为像素点的位势高度; R_d 为干大气比气体常数, 是一个常值 287.05; g_0 为地球重力常数, 取值为 9.80665; P_0 为 Hg_0 对应的气压, P_i 为数据层气压.

将 QX-1 GNOS M 掩星观测折射率廓线与 NCEP 背景场折射率廓线进行对比, 计算相对折射率偏差廓线, 有

$$\Delta N = \frac{N_o - N_B}{N_B} \times 100\%. \quad (5)$$

折射率平均偏差廓线为

$$\Delta \bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta N_i. \quad (6)$$

其中, n 为掩星个数, i 为掩星索引号. 折射率标准差廓线为

$$\sigma \Delta N = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta \bar{N}^2}. \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 掩星事件全球分布与数量统计

QX-1 GNOS M 是一台用于无线电掩星探测的设备, 通过综合利用北斗、GPS 和 Galileo 这三种全球导航系统的信号, QX-1 GNOS M 显著提升了掩星观测的能力. 统计数据显示, QX-1 GNOS M 每天平均在轨分别接收北斗和 GPS 掩星事件约 400 次, 同时也接收 Galileo 掩星事件约 260 次.

根据初步的统计数据, 目前 QX-1 GNOS M 在掩星观测中的反演成功率约为 90%. 这一结果表明该设备在捕捉和解析大气掩星事件方面具备相当高的准确性和可靠性. 为更直观分析 QX-1 GNOS M 的情况, 图 1 给出了 2022 年 8 月 17 日全天的大气掩星事件切点位置全球分布, 共有 1118 次反演成功的事件. 在图 1 中可以看到标记的切点位置以及分布情况. 图中数据揭示了 QX-1 GNOS M 在全球范围内的分布情况. 这些成功的大气掩星事件反演有助于开展大气结构和动态变化等方面研究. 同时, 通过不同卫星导航系统的掩星事件分布, 可以深入了解各个系统在不同地理位置的覆盖范围和效果.

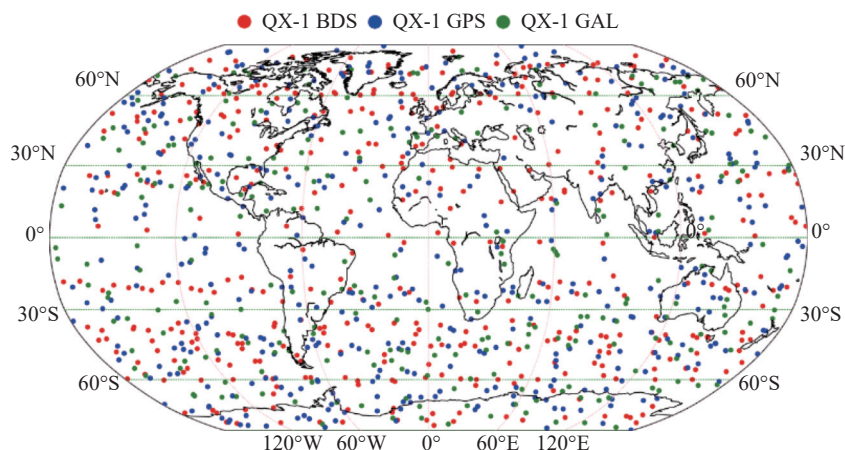


图1 2022年8月17日 QX-1 GNOS M/北斗/GPS/Galileo 掩星事件全球分布情况

Fig. 1 Distribution of the QX-1 GNSS M RO events for BDS, GPS and Galileo systems on 17 August 2022

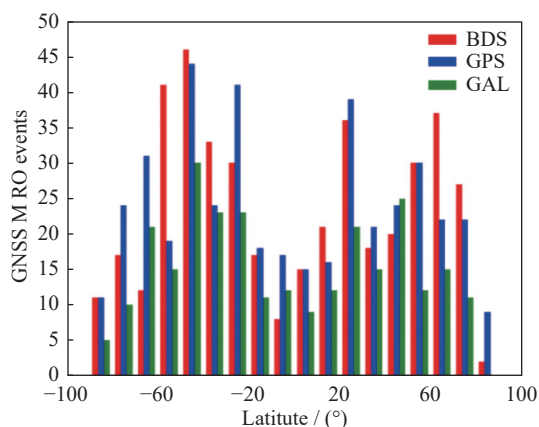


图2 2022年8月17日 QX-1 GNOS M/北斗/GPS/Galileo 掩星事件统计分析

Fig. 2 Histogram of the QX-1 GNSS M RO events for BDS, GPS and Galileo systems on 17 August 2022

图2给出了2022年8月17日全天 QX-1 GNOS M 掩星事件数量随纬度变化的统计直方图. 统计结果显示, 北斗掩星事件数量为 421 次, GPS 掩星事件数量为 427 次, Galileo 掩星事件数量为 270 次. 总体而言, 各 GNSS 系统掩星事件主要分布在南北半球的中纬度地区; 三系统兼容可使 GNOS M 掩星探测数量较 GPS 单系统提高 1.5 倍. QX-1 GNOS M 掩星探测数据的增加丰富了 GNOS 掩星大气探测数据集.

2.2 QX-1 GNOS M 掩星数据质量分析

为了统计分析 QX-1 GNOS M 掩星数据质量, 采用 2022 年 8 月 17 日到 9 月 3 日共 18 天的掩星数据及其对应的 NCEP 背景场数据评估掩星事件穿透深度和折射率误差. 图3给出了这 18 天掩星事件的

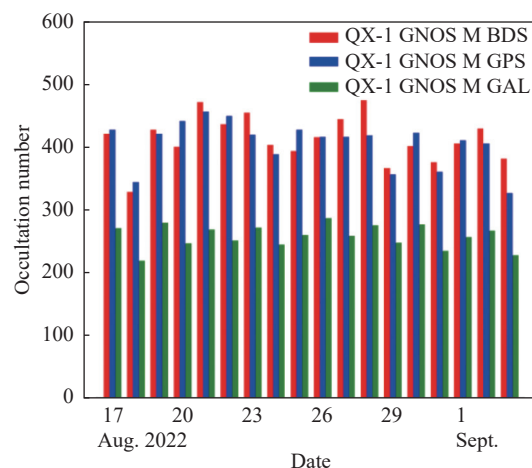


图3 2022年8月17日至9月3日期间 QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo 日掩星事件

Fig. 3 RO events per day of QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo from 17 August to 3 September 2022

统计直方图. 结果表明这 18 天反演成功的掩星事件数量较为稳定.

图4给出了 18 个测试日北斗、GPS 和 Galileo 掩星事件全球分布, 并用 Color-bar 的形式给出掩星廓线垂直穿透大气的深度, 即掩星廓线的最低点距离海平面的海拔高度. 结果表明大部分掩星事件的探测深度可以达到 2 km 以下.

掩星折射率是大气层特性的重要参数之一, 对于气象和大气科学研究至关重要, 促进了大气层结构、变化和动态特性的研究. 图5给出了在 18 个测试日中, 北斗、GPS 和 Galileo 三个系统的掩星折射率误

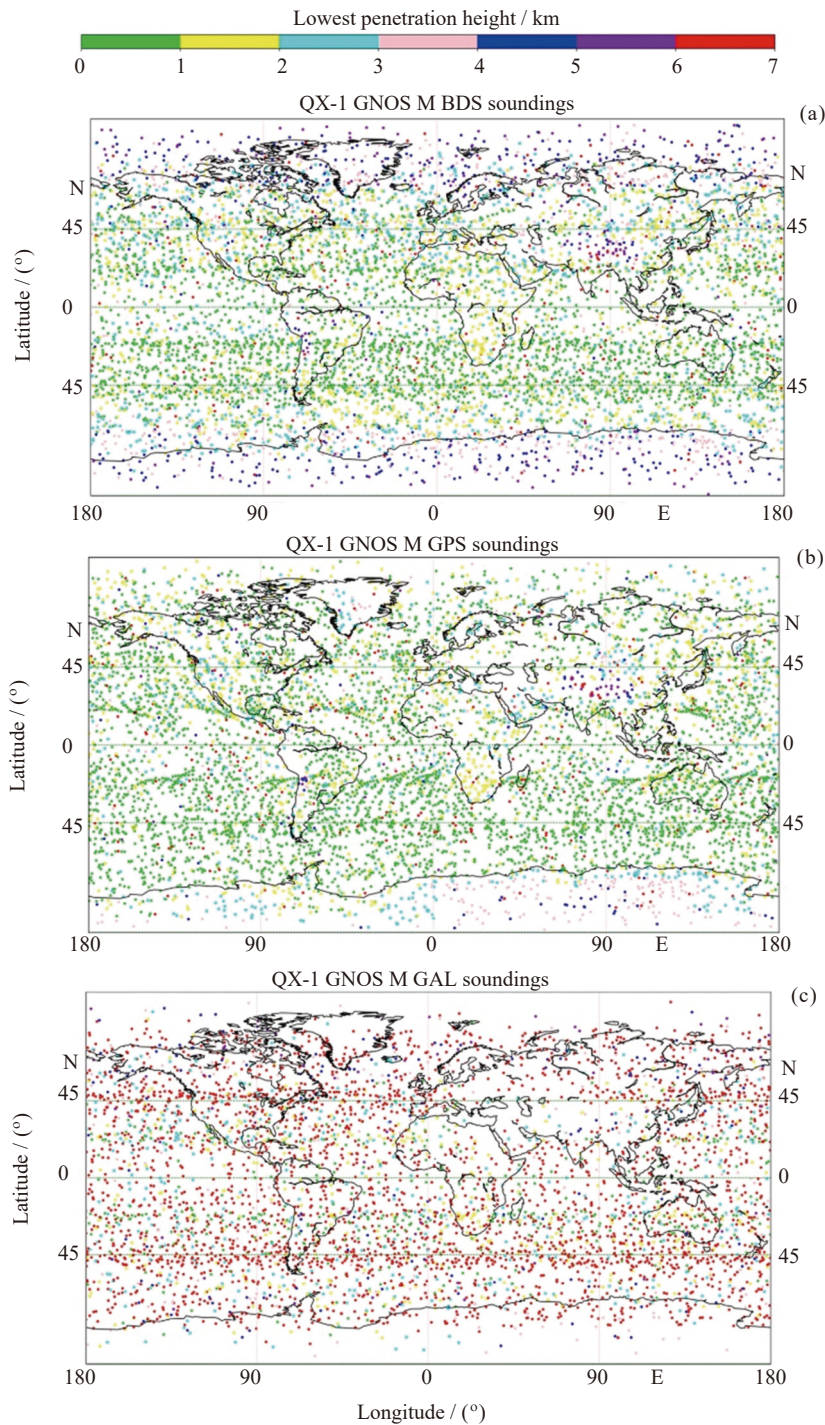


图 4 2022 年 8 月 17 至 9 月 3 日 QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo 掩星事件全球分布及穿透深度
Fig. 4 Distribution of RO events and their lowest penetration height of QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo occultation events from 17 August to 3 September on 2022

差廓线对比. 这些结果揭示了这三种导航系统在 5~30 km 高度范围内的掩星折射率平均偏差和标准差情况. 研究结果表明这些系统的性能表现优异, 其掩星折射率平均偏差均优于 0.2%, 标准差也优于 1%.

这些结果显示 QX-1 GNOS M 接收并反演得到的北斗、GPS 和 Galileo 系统的掩星折射率测量精度已达到国际同类掩星探测的水平^[21].

QX-1 GNOS M 掩星数据已成功应用于中国气

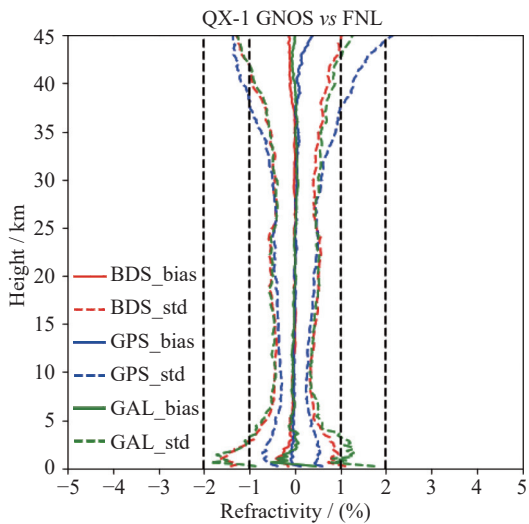


图 5 2022 年 8 月 17 至 9 月 3 日 QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo 掩星折射率误差廓线
Fig. 5 Statistical comparison among QX-1 GNOS M/BDS/GPS/Galileo RO refractivity profiles taking NCEP FNL reanalysis model as reference atmospheric data from 17 August to 3 September in 2022

象局的数值天气预报系统. 图 6 显示出这一数据对提高天气预报精度所起的积极作用. 通过比较使用和不使用 QX-1 GNOS M 掩星数据的数值天气预报结果, 可以明显观察到前者的精度有所提高. 利用这些数据, 天气预报系统能够更准确地分析和预测大气层的变化, 进而提供更精确的天气预报信息. 这对于减少天气相关风险、提高灾害预警能力以及提供更可靠的气象服务具有重要意义.

3 结论

GNSS 无线电掩星技术利用全球导航卫星信号在地球大气层中传播时受到遮挡来研究大气层的温度、湿度和压强等变化, 从而获得大气层的垂直剖面和其他相关信息. 利用该技术成功获取了大量大气层和电离层数据, 能够为气象学、气候变化研究、导航系统优化和科学研究做出重要贡献. QX-1 GNOS M 首次在轨实现了 GNSS 掩星探测仪的小型化以及北斗、GPS 和 Galileo 三系统兼容. 本文对 QX-1 GNOS M 对三个系统掩星事件接收的全球分布和反演成功率进行统计分析, 并进行了掩星廓线探测深度的解析和掩星折射率精度研究. 在 GNSS 掩星事件数量方面, 三系统兼容模式较 GPS 单系统接收的掩星

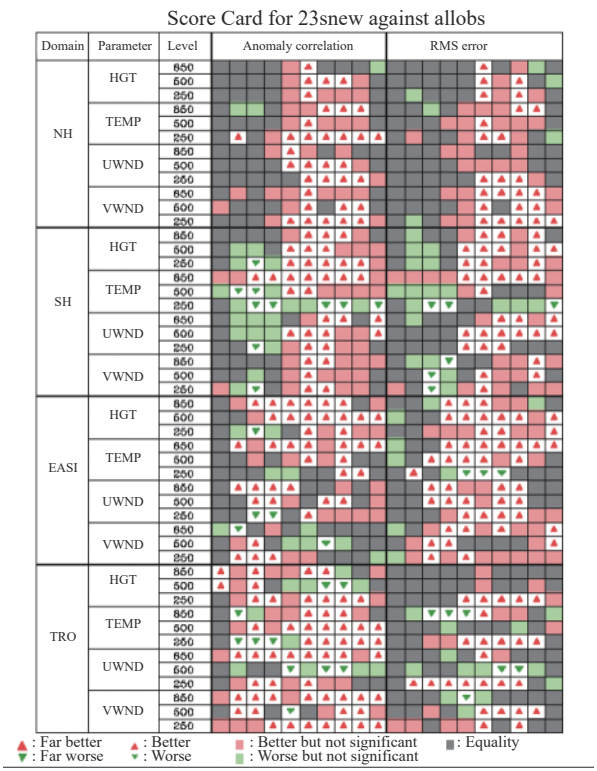


图 6 QX-1 GNOS M GNSS 掩星折射率同化结果
Fig. 6 Evaluation score card of the effects of the QX-1 GNOS M data on the GRAPES forecast results

事件数提高约 1.5 倍. 随着技术的不断进步和 QX-1 GNOS M 的进一步优化以及更多多频、多系统支持的卫星项目出现, 可以期待在未来更多的掩星事件反演中取得更为精确和详尽的结果, 推动 GNSS 无线电掩星的应用范围扩大和性能提升.

参考文献

[1] 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

[2] WICERT J, BEYERLE G, KONIG R, *et al.* GPS radio occultation with CHAMP and GRACE: A first look at a new and promising satellite configuration for global atmospheric sounding[J]. *Annales Geophysicae: Atmospheres, Hydrospheres and Space Sciences*, 2005, **23**(3): 653-658

[3] QIU Tongsheng. Study on Key Technique of Signal Processing for BDS-3 Based Radio Occultation Receiver[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. DOI: [10.27562/d.cnki.gkyyz.2021.000015](https://doi.org/10.27562/d.cnki.gkyyz.2021.000015) (仇通胜. 基于北斗三号的无线电掩星接收机信号处理关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. DOI: [10.27562/d.cnki.gkyyz.2021.000015](https://doi.org/10.27562/d.cnki.gkyyz.2021.000015))

- [4] 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
- [5] KUO Y H, SCHREINER W S, WANG J, *et al.* Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(5): DOI:10.1029/2004GL021443
- [6] 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
- [7] IURII C, IRINA Z, JOHN B, *et al.* Accuracy assessment of the quiet-time ionospheric F2 peak parameters as derived from COSMIC-2 multi-GNSS radio occultation measurements[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, 11
- [8] LI Y, KIRCHENGAST G, SCHERLLIN-PIRSCHER B, *et al.* Dynamic statistical optimization of GNSS radio occultation bending angles: Advanced algorithm and performance analysis[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(8): 3447-3465
- [9] 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
- [10] SUN Y Q, BAI W H, LIU C L, *et al.* The FengYun-3C 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
- [11] WEI J D, LI Y, ZHANG K F, *et al.* An evaluation of Fengyun-3C radio occultation atmospheric profiles over 2015-2018[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(13): 2116
- [12] LIU Z Y, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* Validation of preliminary results of thermal tropopause derived from FY-3C GNOS data[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(9): 1139
- [13] WANG Shuzhi, ZHU Guangwu, BAI Weihua, *et al.* For the first time Fengyun-3C satellite-global navigation satellite system occultation sounder achieved spaceborne BeiDou 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)
- [14] LIAO M, ZHANG P, YANG G L, *et al.* Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(2): 781-792
- [15] LIAO Mi, ZHANG Peng, LIU Jian, *et al.* Accuracy and stability of radio occultation dry temperature profiles from Fengyun satellite[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2023, **34**(3): 270-281 (廖蜜, 张鹏, 刘健, 等. 风云卫星的掩星干大气温度廓线精度特征 [J]. *应用气象学报*, 2023, **34**(3): 270-281)
- [16] 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)
- [17] HUANG F X, XIA J M, YIN C, *et al.* Assessment of FY-3E GNOS II GNSS-R global wind product[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, **15**: 7899-7912.
- [18] YANG Guanglin, SUN Yueqiang, BAI Weihua, *et al.* Beidou navigation satellite system sounding of the ionosphere from FY-3C 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)
- [19] DU Q F, SUN Y Q, BAI W H, *et al.* The on-orbit performance of FY-3D GNOS[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE, 2019: 7669-7671
- [20] ZHANG H, HUANGFU J, WANG X, *et al.* Comparative analysis of Binhua and Cosmic-2 radio occultation data[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(19): 4958
- [21] 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

作者简介



刘智勇 男, 1982 年出生于黑龙江省哈尔滨市, 现为武汉大学遥感信息工程学院在读博士研究生, 工程师, 主要从事资源与环境、遥感卫星图像智能处理等领域工作。
E-mail: bear2001321@163.com



刘 森 (通信作者) 1983 年出生于河南省郑州市, 航天东方红卫星有限公司项目副经理, 高级工程师, 主要从事电子与微波类卫星总体设计、产品保证等领域工作。
E-mail: HITUFO@foxmail.COM