引文格式:张绍成,虢盛,郑沈宇,等.COSMIC-2掩星观测与大气反演廓线质量分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(3):497-506.DOI:10.13203/j.whugis20220556

Citation:ZHANG Shaocheng,GUO Sheng,ZHENG Shenyu,et al.Analysis of COSMIC-2 Radio Occultation Observations and Atmospheric Profiles[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(3):497-506.DOI:10.13203/j.whugis20220556

COSMIC-2掩星观测与大气反演廓线质量分析

张绍成[1] 虢 盛[1] 郑沈宇[1] 吴云龙[1] 余 涛[2]

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北 武汉,430078

2 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

摘 要:COSMIC-2(constellation observing system for meteorology ionosphere and climate-2)作为COSMIC掩星星座的后续计划,得益于升级了支持多模GNSS信号的接收机和高增益定向波束掩星天线,其观测数据质量和数量得到显著提升。围绕掩星观测数据和反演产品的定量评估,分析COSMIC-2定轨和掩星天线的原始观测数据质量,并以欧洲中期数值天气预报中心的再分析气象资料为基准,定量评估掩星反演大气廓线产品质量。结果显示,COSMIC-2定轨天线L1频段信噪比大多在45 dB以上,其对应伪距多路径效应中误差在0.2~0.4 m之间;掩星天线观测信噪比由第一代COSMIC的不足700 v/v大幅提升至1 200 v/v,且GLONASS掩星廓线和GPS掩星廓线均与气象再分析资料表现出了很好的一致性。研究结果认为,升级后的COSMIC-2掩星载荷不仅大幅增加掩星观测数量,其高增益的掩星天线设计还有效地提升了掩星观测数据质量,为大气科学研究提供了重要气象观测资料。

关键词:COSMIC-2;掩星反演;大气廓线;质量分析

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-04

DOI:10.13203/j.whugis20220556 **文章编号**:1671-8860(2025)03-0497-10

Analysis of COSMIC-2 Radio Occultation Observations and Atmospheric Profiles

ZHANG Shaocheng[1] *GUO Sheng*[1] *ZHENG Shenyu*[1] *WU Yunlong*[1] *YU Tao*[2]

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430078, China

2 School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

Abstract: **Objectives**: COSMIC-2 constellation, as the follow-on mission of constellation observing system for meteorology ionosphere and climate(COSMIC), has refined the radio occultation (RO) payloads with multi-GNSS signals support and high-gain beam-forming RO antennas, which will improve both the quantity and quality of the RO observations. **Methods**: We focus on the input observations and output profiles of the RO retrieval, evaluating the raw observations from both precise orbit determination (POD) and RO antennas, and accessing the atmospheric profiles using ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) reanalysis products as reference. **Results**: The results show that the L1 signal-to-noise ratio (SNR) on COSMIC-2 POD antennas are mostly above 45 dB, and the corresponding pseudo-range multipath standard deviation errors are between 0.2 m and 0.4 m. The SNR values on RO antenna are significantly improved from less than 700 v/v on COSMIC to 1 200 v/v on COSMIC-2, and both the GLONASS and GPS RO profiles show good consistency with ECMWF reanalysis products. **Conclusions**: The updated COSMIC-2 RO payloads can increase the profile number, and also the quality of RO profiles can be significantly improved with high-gain antennas, which will provide important observations for atmospheric scientific research.

基金项目:国家自然科学基金(42174043,41974096)。

第一作者:张绍成,博士,副教授,主要从事GNSS精密测量与无线电掩星反演研究。gnss.zsc@foxmail.com

通信作者:余涛,博士,教授。yutaommnn@163.com

Key words: COSMIC-2; radio occultation retrieval; atmospheric profile; quality analysis

GPS掩星是以低轨卫星(low earth orbit, LEO)为观测载体,通过测量穿过地球大气层的GPS信号振幅和相位变化实现地球大气参数的垂直廓线反演。自1995年GPS掩星在GPS/MET实验卫星上得到实测验证后[1-2],挑战性小卫星有效载荷(CHAMP)、重力恢复与气候实验(GRACE)、阿根廷科学卫星(SAC-C)等多颗对地观测LEO卫星纷纷加载GPS掩星载荷[3-4]。特别是2006年由6颗极轨LEO卫星组成的COSMIC(constellation observing system for meteorology ionosphere and climate)系统,首次以星座形式实现全球范围的掩星观测,有效地弥补了传统大气探测技术在海洋以及极地地区气象观测数据稀少的缺陷[5]。

随着第一代COSMIC卫星掩星观测能力逐渐失效,由6颗LEO卫星组成的第二代COSMIC-2星座于2019年6月发射升空。COSMIC-2卫星的掩星载荷新增了GLONASS信号支持,并升级了高增益定向波束掩星天线,其中GPS、GLONASS双模掩星观测将有效提升掩星观测数量,而高增益天线带来的信噪比增强则能有效提升低层大气掩星信号的跟踪捕获能力,实现大气超折射现象和大气边界层的探测[6]。美国大学大气研究联盟(university corporation for atmospheric research, UCAR)基于多种数值气象模型对2019年10月的COSMIC-2的GPS和GLONASS双模掩星反演的弯曲角和折射率廓线等初步成果进行全面的评估[7];文献[8]则采用同步掩星匹配验证方法对比分析了GeoOptics与COSMIC-2的GPS、GLONASS双模掩星信噪比和掩星廓线探测深度的差异[9];文献[10]研究显示COSMIC-2的GLONASS廓线较GPS廓线在30 km以上精度衰减更为明显,是因为GLONASS卫星钟差的短期稳定性较差、精密钟差改正残余项影响逐渐凸显引起。在COSMIC-2的低层大气反演中,文献[11]通过全光谱法正演折射率垂直廓线,分析了2 km以下COSMIC-2掩星偏差与纬度和信噪比高度相关;文献[12]则基于地基无线电探空仪观测资料对2019年7月至2019年10月的COSMIC-2温度廓线在下平流层区域的精度进行了系统的评估。

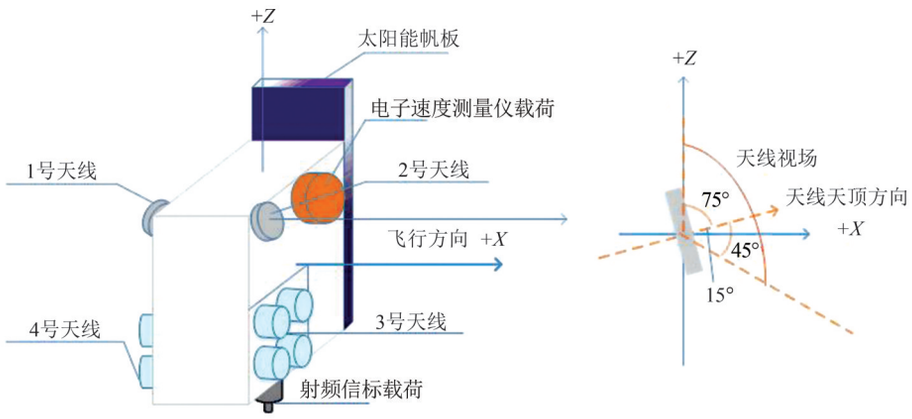
国内学者先后基于地基探空数据分别对第一代COSMIC掩星廓线进行了多项评估,分析了COSMIC掩星廓线在数据质量,季节性变化和时空分布等方面的精度特征[13-15];文献[16]通过提取COSMIC掩星观测数据中的反射信号,分析COSMIC掩星反射信号与大气层水汽含量的相关性。总体而言,国内学者的研究主要关注于掩星廓线产品的大气科学应用,如COSMIC-2掩星廓线产品用于大气边界层探测研究[17-18],但对观测数据本身的质量尚缺乏精确定量的评估分析。

本文从COSMIC-2原始数据出发,对掩星反演的各级数据产品的精度和可靠性进行客观分析评估。考虑到欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)于2020-03-25开始将COSMIC-2掩星资料并入其气象同化模式中[19],选择距该时间点最近的2020-01-01—2020-03-24的COSMIC-2大气掩星廓线产品作为评估分析对象。首先概括COSMIC-2掩星载荷及掩星产品的分级,论述掩星原始观测数据质量评估的必要性;然后通过COSMIC-2定轨、掩星天线信噪比和多路径效应评估掩星观测数据的质量;最后以ECMWF气象再分析资料为参考基准,评估COSMIC-2卫星的GPS和GLONASS双模掩星观测数据质量及大气参数廓线产品精度。

1 COSMIC-2掩星载荷及产品分级

目前在轨的COSMIC-2卫星为2019年6月发射的6颗低偏角卫星(24°),搭载的GNSS观测载荷为美国喷气推进实验室研发的兼容GPS、GLONASS和Galileo三模信号的GNSS卫星接收机系统,暂时仅开放GPS和GLONASS双模观测信号。如图1(a)所示,每颗COSMIC-2卫星都装配了4组GNSS天线,其中后置1号天线和前置2号天线为定轨天线,采用图1(b)所示的天顶方向与卫星飞行方向15°夹角方式安置,除用于COSMIC-2卫星定轨观测外,同时兼顾电离层掩星观测任务[20];前置3号和后置4号天线为两组高增益的定向波束天线,主要用于大气层掩星观测[21]。

UCAR作为COSMIC系列掩星星座的核心机构,发布了COSMIC-2卫星自2019-10-01之后的各级掩星产品,如电离层总电子含量(total electron content, TEC)、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)气象廓线,其产品分级、命名及文件内容说明如表1所示。本文基于GNSS掩星反演的原始数据(podCrx、conPhs)和反演产品(atmPrf、



(a) COSMIC-2卫星组件示意图　　(b) 定轨天线倾角示意图

图 1　COSMIC-2 卫星天线分布示意图

Fig. 1　Structure Diagram of COSMIC-2 Satellites

wetPf2)评估COSMIC-2定轨和掩星天线的原始观测数据质量、大气掩星探测深度和相应大气廓线产品精度。

表 1　COSMIC-2掩星产品说明

Table 1　Information of COSMIC-2 Radio Occultation Products

数据等级	文件名	文件内容
Level 0	trgLv0	掩星接收机原始数据
Level 1a	leoAtt	卫星姿态信息
	podCrx	定轨天线观测数据
	opnGns	掩星天线观测数据
Level 1b	conPhs	大气附加相位产品
	leoOrd	卫星精密轨道产品
	podTc2	定轨天线反演 TEC 产品
Level 2	atmPrf	大气廓线产品
	avnPrf	NCEP 气象廓线
	bfrPrf	Bufr格式气象廓线
	wetPf2	大气湿度廓线产品
	echPrf	ECMWF 背景场廓线

2　GNSS掩星探测及附加相位计算

2.1　GNSS掩星探测的基本原理

基于低轨卫星 LEO 的 GNSS 掩星观测几何关系如图 2 所示,其中 LEO 为以 COSMIC-2 卫星为代表的星基掩星载体;R_{LS}表示 GNSS 卫星(S)到 LEO 卫星(L)的直线距离;v_l、v_s分别为 LEO 卫星与 GNSS 卫星速度矢量;α为大气折射弯曲角;a为相应的碰撞参数;r_s、r_l分别表示 GNSS 卫星与 LEO 卫星的位置矢量;h为 GNSS 信号收发端连线距地表最大深度(height of straight line, HSL)。

GNSS掩星反演数据处理需要先对收发载体的轨道和钟差实现掩星链路的几何改正,精确分离大气时延效应附加相位及其相应的多普勒频移;再基于 GNSS 卫星和掩星接收载体瞬时位置、速度和多普勒频移,反演由大气时延引起的大气弯曲角;最后通过 Abel 积分变换反演大气折射率廓线,实现温度、压强等廓线产品的反演[22]。

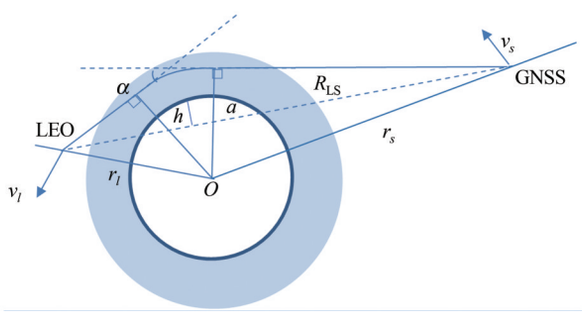


图 2　GNSS掩星观测几何示意图

Fig. 2　Geometric Diagram of GNSS Radio Occultation

2.2　掩星附加相位及多普勒频移

大气掩星观测的附加相位是指载波信号在穿过大气层时产生的相位观测值的时延,计算方法主要有双差法、单差法和非差法。双差法通过站间和星间差分来消除信号发射端和接收端的多项误差,涉及多个观测数据,积累观测噪声扩大,主要用于GPS选择可用性政策未取消时期和部分准实时掩星观测反演任务[23]。非差法则通过对掩星观测链路的各项误差进行精密改正来实现附加相位的计算,涉及观测量最少,可有效避免误差积累效应,但对掩星接收机内置时钟晶振的短期稳定性的要求较高[24-25]。

COSMIC 官方数据处理中心(COSMIC Data Analysis and Archive Center, CDAAC)采用星间单差的方式实现掩星附加相位的计算[26],并引入双频无电离层组合消除电离层时延效应的影

响,其相位观测方程为:

$$L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}=\rho^{\mathrm{occ}}+c\delta_{\mathrm{rec}}-c\delta^{\mathrm{occ}}+\Delta T_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{occ}}+\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}} \quad (1)$$

由于COSMIC-2轨道高度上定轨天线接收的GNSS信号不受大气层延迟影响,选择参考卫星的无电离层组合相位观测方程可表示为:

$$L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}=\rho^{\mathrm{ref}}+c\delta_{\mathrm{rec}}-c\delta^{\mathrm{ref}}+\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}} \quad (2)$$

式(1)和(2)中,$L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}$和$L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}$分别表示掩星卫星occ和参考卫星ref的相位观测值,下标IF(ionospheric free, IF)表示无电离层组合;ρ^{occ}和ρ^{ref}分别表示occ和ref卫星与接收机之间的距离;c为光速;δ_{rec}为接收机钟差;δ^{occ}和δ^{ref}分别为occ和ref的卫星钟差;$\Delta T_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{occ}}$为掩星观测链路上因地球大气导致的附加相位延迟;GLONASS因不同卫星信号频率不相同,分别用$\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}$、$\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}$表示掩星链路和参考链路的卫星信号波长;$N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}$、$N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}$则分别对应掩星链路和参考链路的无电离层组合整周模糊度。

采用式(1)、式(2)的星间差分消除接收机钟差后得到单差相位观测方程:

$$\Delta L_{\mathrm{IF}}=L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}-L_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}=\Delta\rho-c\left(\delta^{\mathrm{occ}}-\delta^{\mathrm{ref}}\right)+\Delta T_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{occ}}+\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}-\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}} \quad (3)$$

GNSS卫星端钟差的稳定性和IGS(international GNSS service)提供的精密轨道及钟差产品精度,能保证几十秒掩星观测时长内的高频相位观测值的稳定性和精度,因此式(3)中的几何相关项$\Delta\rho$和GNSS卫星钟差项δ^{occ}、δ^{ref}均可由IGS精密轨道钟差产品精确建模消减至可忽略量级[27]。

最后得到单差掩星附加相位方程为$\Delta L=\Delta T_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{occ}}+\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{occ}}-\lambda_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}N_{\mathrm{IF}}^{\mathrm{ref}}$,进一步通过时域差分得到大气时延引起的附加多普勒频移:

$$\frac{\Delta f}{f}=\frac{1}{c}\frac{\mathrm{d}\Delta L}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{c}\frac{\mathrm{d}\Delta T_{\mathrm{rec}}^{\mathrm{occ}}}{\mathrm{d}t} \quad (4)$$

式中,f为载波频率;Δf为附加多普勒频移;t为时间。

3 COSMIC-2观测数据质量评估

在CDAAC的单差掩星数据处理中,附加相位数据是基于定轨和掩星天线的原始数据计算得到,掩星反演精度与定轨和掩星天线的原始观测数据质量紧密相关[28]。首先以GPS、GLONASS的L1频段的伪距多路径误差和信噪比信息为例,评估COSMIC-2定轨天线所提供的参考链路信号质量;然后分析掩星观测链路的信噪比特征,并通过多天的统计结果对比分析GPS、GLONASS掩星观测信号的信噪比差异。

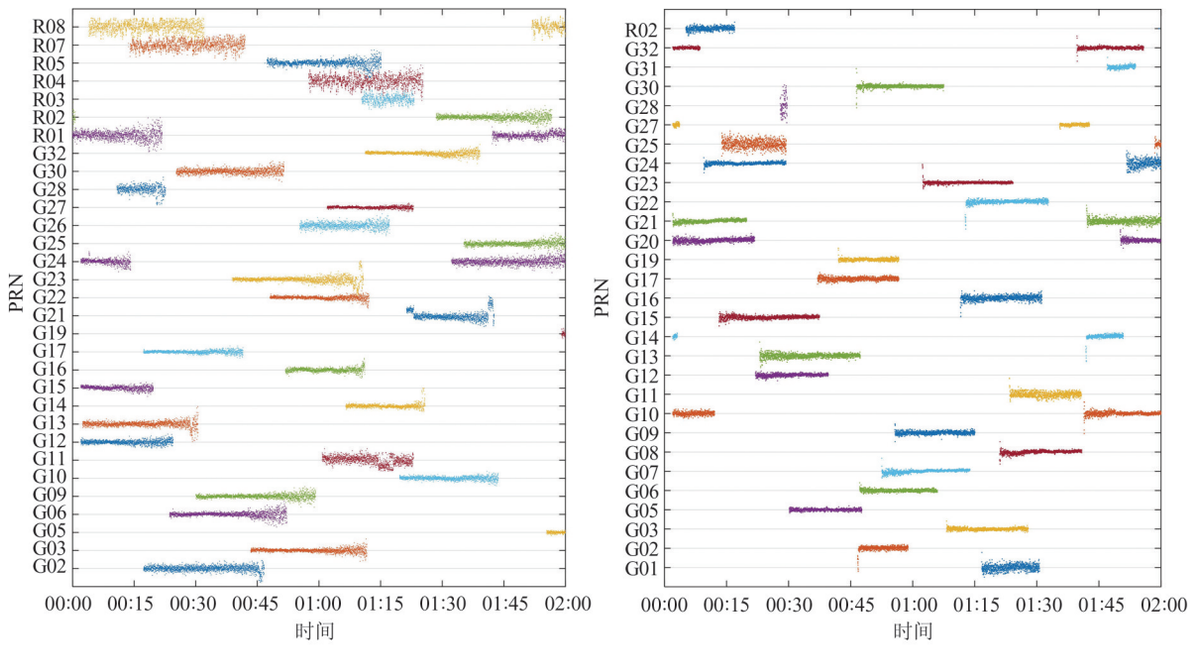
3.1 定轨天线观测数据质量分析

采用经典GNSS数据处理软件TEQC(translation, editing and quality checking)的伪距多路径计算方法分析COSMIC-2卫星的GPS和GLONASS卫星定轨观测数据的多路径效应[29]。以COSMIC-2星座1号卫星2个定轨天线2020-02-01高度角0°以上定轨观测数据为例,计算GPS、GLONASS卫星L1频段的伪距多路径误差散点如图3(a)、3(b)所示,其中纵轴为不同GPS和GLONASS卫星伪随机噪声码(pseudo-random noise, PRN)编号,相邻卫星在纵轴方向采用2 m间隔加以区分。

由图3可见,除GNSS卫星观测刚开始(对应各卫星时序图起始处)和即将结束(对应各卫星时序图尾部)对应的低高度角少数时段外,两组天线所接收到的观测数据多路径残差无明显趋势项。图3所示统计结果显示,定轨天线1的GPS和GLONASS卫星多路径残差统计中误差分别为0.27 m和0.44 m;定轨天线2主要为GPS观测数据,多路径残差中误差为0.20 m,仅有的1颗GLONASS卫星多路径残差中误差为0.19 m。结合图1所示COSMIC-2的2个定轨天线的前后安置方式可见,图3(a)所示每颗卫星散点图右端对应后置定轨天线1上GNSS卫星观测即将结束时段,而图3(b)所示每颗卫星散点图左端对应前置定轨天线2上GNSS卫星刚升起的初始观测时段,两个时段均有少量卫星在低高度角时出现多路径偏移现象,主要与观测信号提前切换至电离层掩星观测模式有关。

将COSMIC-2精密定轨(precise orbit determination, POD)的6颗卫星在上述同时段前后置定轨天线的GPS、GLONASS卫星观测轨迹及L1频段信噪比分别绘制如图4、图5所示,其中内侧数字为极坐标系极径值,对应观测信号高度角,中心极点对应天顶90°方向,而外围数字为极角值,对应观测信号方位角,初始0°方向设置为卫星运行轨道切线方向。图4、图5中,定轨天线的卫星观测高度角范围在−30°~90°之间,其中−30°~0°的负高度角区域主要为电离层掩星观测信号。图4、图5均显示,定轨天线的安装倾角决定卫星信噪比与信号高度角的变化趋势不完全一致,除卫星天顶和两侧的少数观测弧段外,GPS、GLONASS信噪比大多优于45 dB。

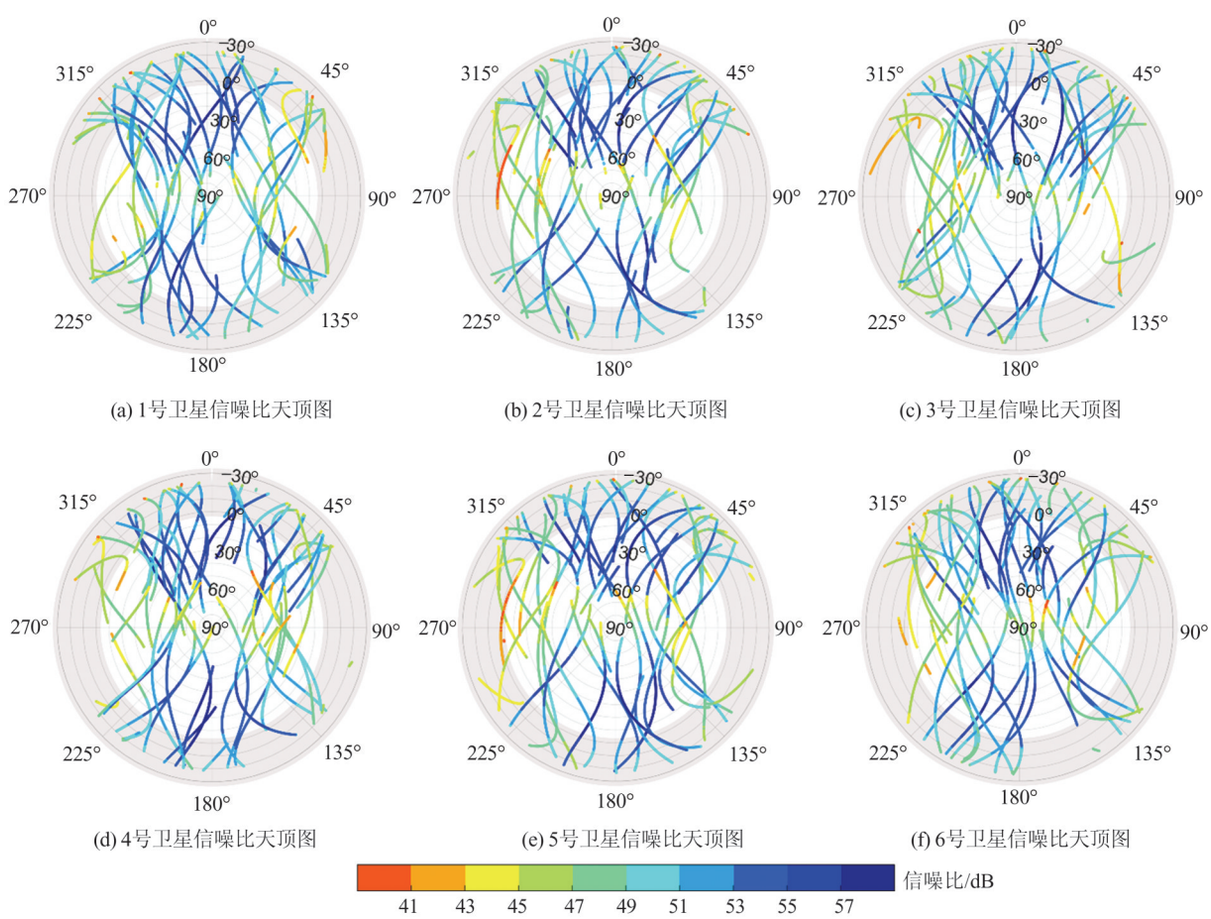
由图4中GPS卫星轨迹的分布象限可见,



(a) 定轨天线1多路径误差示意图　　(b) 定轨天线2多路径误差示意图

图 3　COSMIC-2 卫星定轨天线 GPS、GLONASS L1 频段伪距多路径误差

Fig. 3　Multipath Errors on GPS and GLONASS L1 from COSMIC-2 POD Observations



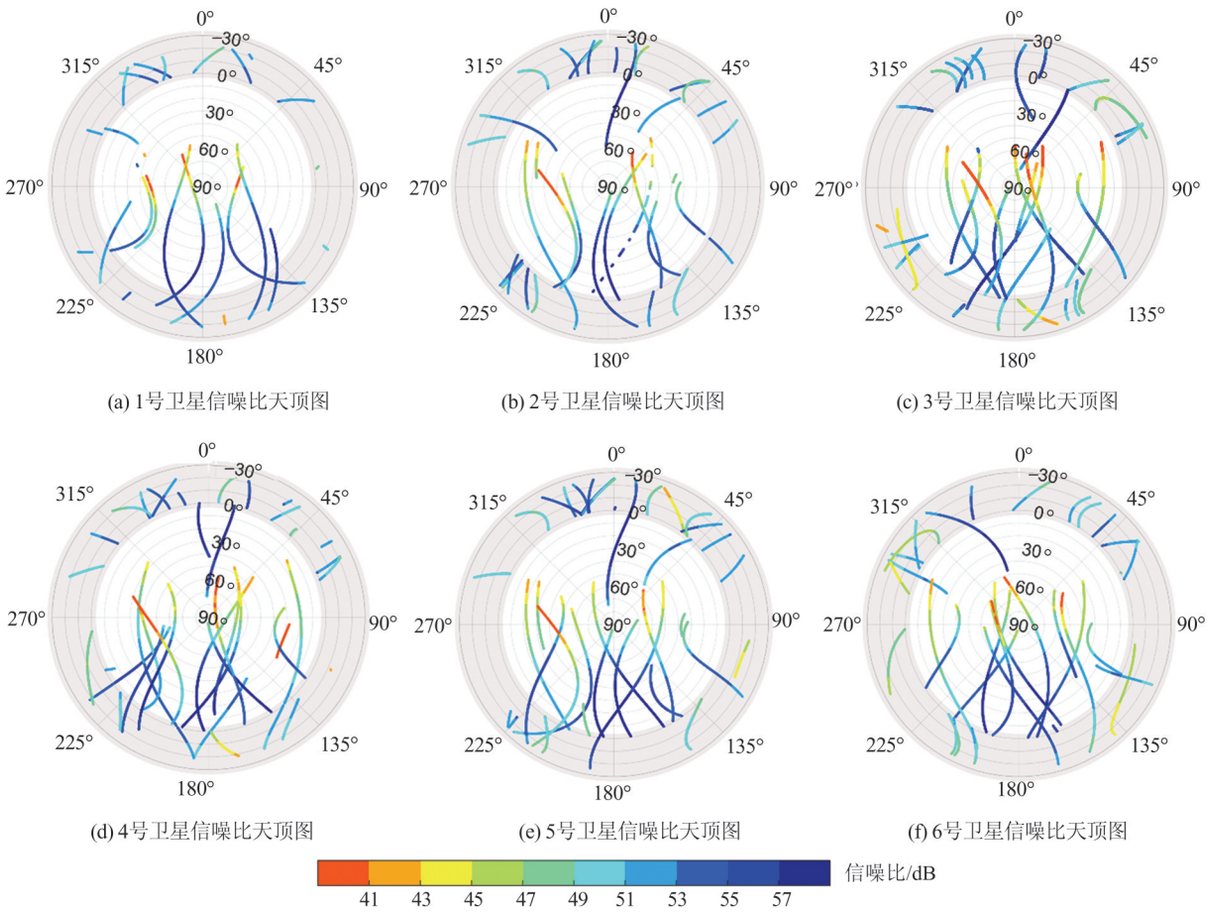
(a) 1号卫星信噪比天顶图　(b) 2号卫星信噪比天顶图　(c) 3号卫星信噪比天顶图

(d) 4号卫星信噪比天顶图　(e) 5号卫星信噪比天顶图　(f) 6号卫星信噪比天顶图

图 4　COSMIC-2 定轨天线 GPS L1 数据信噪比天顶图

Fig. 4　Sky Plot of GPS L1 Signal-to-Noise Ratio on COSMIC-2 POD Antennas

COSMIC-2 卫星前置和后置定轨天线组合观测的 GPS 数据基本满足方位角在 0°和 180°附近的前后方向上均匀分布，而方位角 90°和 270°附近的侧向低高度角观测信号略少，与太阳能帆板遮挡、



(a) 1号卫星信噪比天顶图 (b) 2号卫星信噪比天顶图 (c) 3号卫星信噪比天顶图

(d) 4号卫星信噪比天顶图 (e) 5号卫星信噪比天顶图 (f) 6号卫星信噪比天顶图

图5 COSMIC-2定轨天线GLONASS L1数据信噪比天顶图

Fig. 5 Sky Plot of GLONASS L1 Signal-to-Noise Ratio on COSMIC-2 POD Antennas

卫星轨道设计及其电离层掩星信号捕获机制等诸多影响因素有关。

图5所示的GLONASS天顶图上半部分(定轨天线2)范围内数据量较少,且多为高度角0°以下的电离层掩星观测信号,因为COSMIC-2卫星的前置定轨天线2暂未将GLONASS信号纳入定轨观测中[17]。

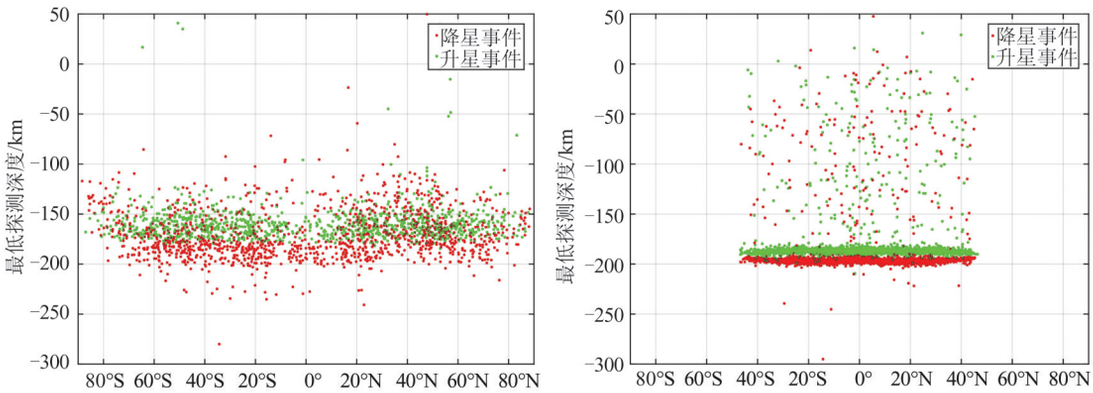
3.2 掩星天线观测数据质量分析

在图2所示的掩星观测几何关系图中,LEO与GNSS卫星连线距地表最低高度HSL是评估掩星低层大气探测能力的重要指标[30]。掩星信号HSL最低探测高度越低,其低层大气信号的捕获能力越强。对比2010-02-01 COSMIC和2020-02-01 COSMIC-2掩星附加相位,统计沿纬度分布的掩星探测深度,结果如图6所示。

图6(a)中COSMIC-1的HSL最低点高度较为分散,其中升星事件共计1 014次,多集中在−150~−170 km之间;降星事件共计1 322次,多集中在−170~−190 km之间。而图6(b)所示的COSMIC-2的HSL最低点相对集中,升星事件2 799次,多集中在−180~−190 km之间;降星事件2 997次,多集中在−190~−210 km之间。图6(a)、6(b)均显示升星事件HSL最低点整体比降星事件略高,源于GNSS升星掩星信号没有前期观测信号辅助,信号捕获需要一定的初始化时长。对比升、降掩星事件数量差异和HSL最低点的分布特性可见,COSMIC-2掩星接收机低层大气区域的掩星观测能力相对于COSMIC-1卫星已有大幅提升。

对比2010-01-01—2010-02-28的COSMIC-1和2010-01-01—2010-03-24的COSMIC-2掩星观测数据,统计每次掩星事件在HSL高度60~80 km范围的观测值信噪比均值,结果如图7所示。

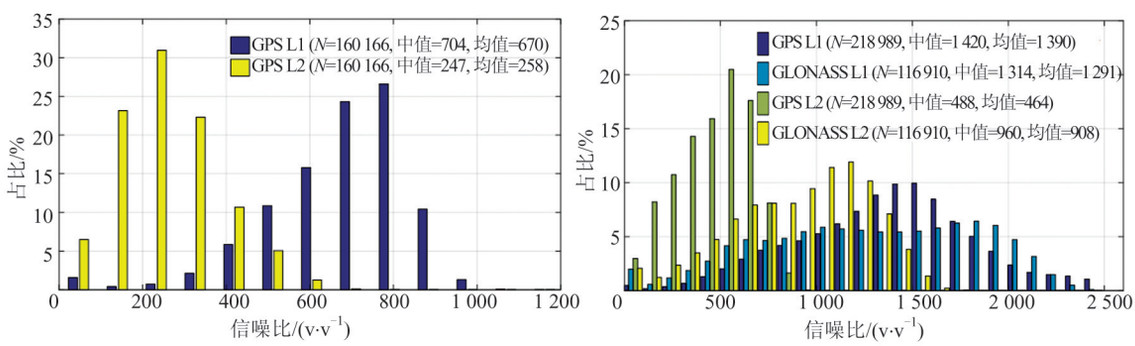
由图7可以看出,COSMIC的掩星观测数据在GPS L1频段信噪比均值不足700 v/v,L2频段信噪比均值不足300 v/v;而COSMIC-2在GPS和GLONASS L1频段的信噪比中位数和均值都在1 200 v/v以上,GLONASS L2频段信噪比中位数和均值仍在900 v/v以上,而GPS L2频段信噪比中位数和均值则略低于500 v/v。对比结果证实COSMIC-2卫星经过掩星硬件升级和信号捕获算法的改进,其掩星探测能力大幅提升。



(a) COSMIC-1最低探测深度与纬度关系示意图　　(b) COSMIC-2最低探测深度与纬度关系示意图

图 6　COSMIC-1 和 COSMIC-2 掩星廓线最低探测深度对比图

Fig 6　Comparison of the Probe Deeps of RO Profiles from COSMIC-1 and COSMIC-2



(a) COSMIC-1掩星观测数据信噪比　　(b) COSMIC-2掩星观测数据信噪比

图 7　COSMIC-1 和 COSMIC-2 掩星观测数据信噪比对比图

Fig 7　Comparison of Signal-to-Noise Ratio from COSMIC-1 and COSMIC-2 RO Observations

4　COSMIC-2掩星反演质量评估

ECMWF 提供的第五代全球大气再分析资料(ECMWF reanalysis v5, ERA5)作为目前认为最为权威的气象再分析资料之一，提供了全球范围内时间分辨率为 1 h、空间分辨率为 0.25°×0.25°的格网文件。以 ERA5 为参考基准，对 COSMIC-2 掩星反演的大气折射率、温度、压强及水汽压等参数廓线进行对比评估。因 ERA5 不直接提供水汽压及折射率信息，需要基于相对湿度及温度格网资料逐步求解，故采用 Goff-Gratch 方程计算水汽压[13,31]：

$$\lg e_s = 10.795\,74\left(1-\frac{T_0}{T}\right)-5.028\lg\left(\frac{T}{T_0}\right)+1.504\,75\times10^{-4}\times\left[1-10^{-8.296\,90\left(\frac{T}{T_0}-1\right)}\right]+0.428\,73\times10^{-3}\times\left[10^{4.769\,55\left(1-\frac{T_0}{T}\right)}-1\right]+0.786\,14 \tag{5}$$

$$P_w = Re_s \tag{6}$$

式中，e_s、P_w 分别表示绝对温度下相对于水面的饱和水汽压和大气水汽压(单位：hPa)；T_0 表示水的三相点温度(273.16 K)；T 表示绝对温度(单位：K)；R 表示相对湿度。

基于大气压强 P(单位：hPa)计算折射率 N，计算式为：

$$N = 77.60\frac{P}{T}+3.73\times10^5\frac{P_w}{T^2} \tag{7}$$

ERA5 气象格网资料的高度和平面上分别采用三次样条和双线性插值计算 COSMIC-2 掩星廓线对应的大气廓线资料，再通过式(8)～式(11)计算 wetPrf、ECMWF 折射率相对偏差 RE(N)、大气压强偏差 ΔP、大气温度偏差 ΔT、大气水汽压偏差 ΔP_w 等信息，评估掩星廓线产品的精度，计算式分别为：

$$\mathrm{RE}(N)=\frac{N_{\mathrm{wetPrf}}-N_{\mathrm{ECMWF}}}{N_{\mathrm{ECMWF}}}\times100\% \tag{8}$$

$$\Delta P = P_{\mathrm{wetPrf}}-P_{\mathrm{ECMWF}} \tag{9}$$

$$\Delta T = T_{\mathrm{wetPrf}}-T_{\mathrm{ECMWF}} \tag{10}$$

$$\Delta P_w = P_{w,\mathrm{wetPrf}}-P_{w,\mathrm{ECMWF}} \tag{11}$$

以2020-01-01—2020-03-24 COSMIC-2卫星的掩星大气廓线产品为例,统计GPS、GLONASS掩星反演结果如图8所示。其中图8(a)为GPS/GLONASS掩星廓线在不同高度的观测数据量,图8(b)为大气折射率在不同高度的相对偏差和中误差,图8(c)、8(d)、8(e)则分别为大气温度、压强、水汽压在不同高度的平均偏差和中误差。

图8(a)中GPS、GLONASS掩星廓线数量统计结果表明,COSMIC-2卫星观测到的GLONASS掩星廓线数量约为GPS掩星廓线数量的50%。图8(b)显示大气折射率相对偏差在5~30 km范围小于0.3%,中误差小于0.5%;在5 km以下,折射率平均相对偏差幅值随高度的降低而变大,最大达到-2.4%,中误差最大值为2.3%,主要为低层大气湿度的非对称分布引起的反演误差。图8(c)所示的大气温度平均偏差在30 km以下小于0.5 K,中误差小于1.5 K。图8(d)所示的大气压强平均偏差幅值在10 km以上小于0.06 hPa,中误差小于0.72 hPa,而10 km以下平均偏差幅值随高度降低而变大,最大平均偏差和中误差分别达到-0.51 hPa和0.98 hPa。图8(e)所示的水汽压偏差平均值以及中误差在10 km以上最大值分别为0.03 hPa和0.06 hPa,当高度低于10 km时,平均偏差幅值随高度的降低而变大,偏差最大幅值和中误差分别达到-1.82 hPa和1.70 hPa。

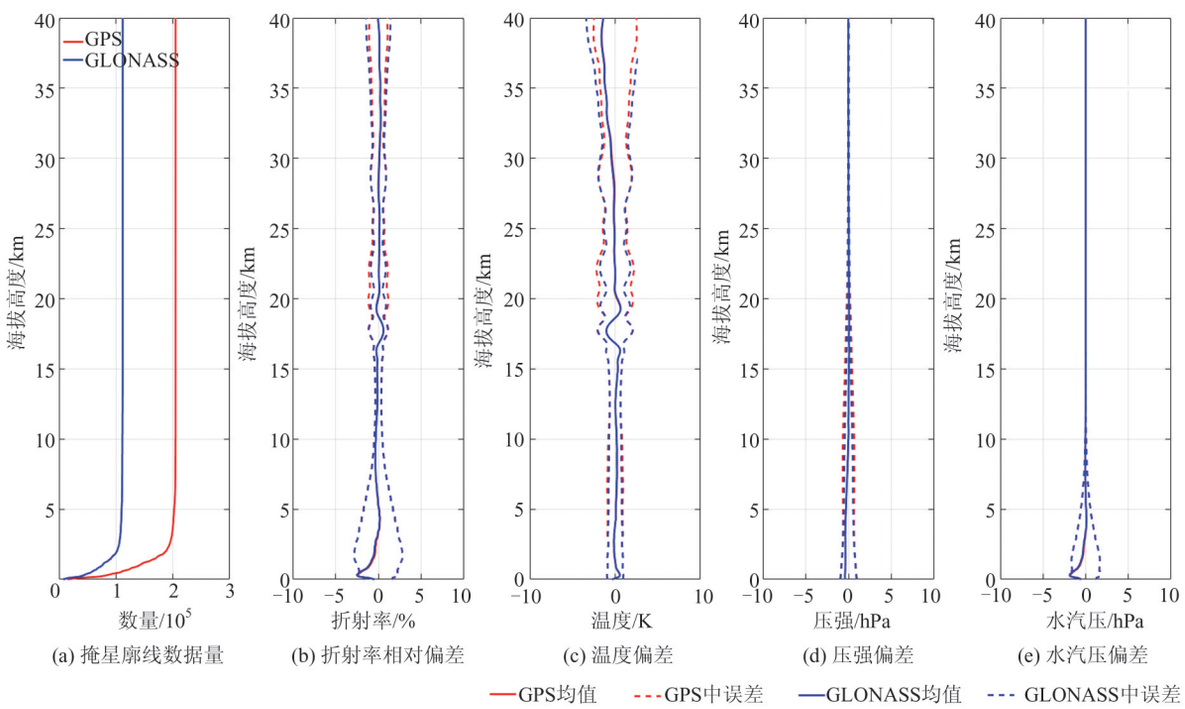


图8 COSMIC-2反演产品与ERA5数据对比

Fig 8 Comparison of COSMIC-2 Profiles and ERA5 Model

在图8(b)、8(c)的折射率和温度廓线中,15~20 km高度出现的精度部分发散,由掩星信号开、闭环跟踪方式切换引起,同时也与开、闭环跟踪信号对应的波动光学和几何光学反演算法差异有关;而19~25 km处GPS廓线中误差略大于GLONASS廓线,UCAR的研究认为是由GPS升星掩星观测时L2P信号捕获机制不完善引起[7];当高度达到30 km以上后,平均温度偏差逐渐变大,最大幅值达到1.5 K,由电离层高阶残余项的影响逐渐凸显引起,此高度范围上GLONASS相对GPS廓线精度衰减更为明显,与GLONASS卫星钟较GPS卫星钟的短期稳定性略差有关[10,27]。

总体而言,图8(b)~8(e)中COSMIC-2的GPS、GLONASS掩星反演廓线在30 km以下平均偏差和统计中误差基本一致,因此可以认为GPS、GLONASS掩星反演精度在此高度范围内无明显差异。

5 结 语

基于本文COSMIC-2卫星GPS、GLONASS掩星不同级别数据产品质量和精度的分析评估,得到主要结论如下:(1) COSMIC-2卫星定

轨天线的GPS、GLONASS双模观测信噪比大多优于45 dB，且GPS伪距多路径误差略小于GLONASS伪距多路径误差；(2) GPS和GLONASS在L1频段掩星信号强度一致，而L2频段上GLONASS甚至明显优于GPS信号，均可在低层大气观测时通过开环跟踪模式实现较为稳定的掩星观测；(3)GLONASS掩星反演廓线数据量约为GPS掩星数据量的一半，反演精度在30 km以下与GPS掩星廓线基本一致，能在保证掩星产品精度的基础上，有效地提升掩星观测资料的数量。

综上，COSMIC-2卫星已具备较好的GPS、GLONASS双模掩星探测能力，后续增加Galileo观测信号支持后有望进一步增加掩星廓线的数据量，为GNSS掩星技术在气象学应用提供更多稳定可靠的数据资料，同时也为中国未来基于北斗卫星开展掩星探测计划提供重要的科学参考。

参 考 文 献

[1] WARE R, ROCKEN C, SOLHEIM F, 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.

[2] 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.

[3] SCHMIDT T, HEISE S, WICKERT J, et al. GPS Radio Occultation with CHAMP and SAC-C: Global Monitoring of Thermal Tropopause Parameters[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(6): 1473-1488.

[4] WICKERT J, BEYERLE G, KÖNIG 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*, 2005, 23: 653-658.

[5] HO S P, ANTHES R A, AO C O, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 Radio Occultation Mission After 12 Years: Accomplishments, Remaining Challenges, and Potential Impacts of COSMIC-2[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2020, 101(7): E1107-E1136.

[6] GORBUNOV M, IRISOV V, ROCKEN C. The Influence of the Signal-to-Noise Ratio Upon Radio Occultation Retrievals[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(12): 2742.

[7] 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.

[8] CAO C Y, WANG W H, LYNCH E, et al. Simultaneous Radio Occultation for Intersatellite Comparison of Bending Angles Toward more Accurate Atmospheric Sounding[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2020, 37(12): 2307-2320.

[9] CHEN Y, SHAO X, CAO C Y, et al. Simultaneous Radio Occultation Predictions for Inter-Satellite Comparison of Bending Angle Profiles from COSMIC-2 and GeoOptics[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18): 3644.

[10] ANTHES R, SJOBERG J, FENG X L, et al. Comparison of COSMIC and COSMIC-2 Radio Occultation Refractivity and Bending Angle Uncertainties in August 2006 and 2021[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 790.

[11] ADHIKARI L, HO S P, ZHOU X J. Inverting COSMIC-2 Phase Data to Bending Angle and Refractivity Profiles Using the Full Spectrum Inversion Method[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(9): 1793.

[12] HO S P, ZHOU X J, SHAO X, et al. Initial Assessment of the COSMIC-2/FORMOSAT-7 Neutral Atmosphere Data Quality in NESDIS/STAR Using in Situ and Satellite Data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4099.

[13] 王伯睿，刘晓阳，王久珂. COSMIC掩星反演数据质量分析[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2013，49(2)：241-251.
WANG Borui, LIU Xiaoyang, WANG Jiuke. Assessment of COSMIC Radio Occultation Retrieval Product[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(2): 241-251.

[14] 徐晓华，汪海洪. 不同季节GPS掩星廓线精度的比较研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2010，35(6)：639-643.
XU Xiaohua, WANG Haihong. Comparison of Precision of GPS Radio Occultation Profiles in Different Seasons[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 639-643.

[15] 王耀兴，张秋昭，沈震. COSMIC掩星反演湿温廓线质量的时空分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2021，46(6)：887-894.
WANG Yaoxing, ZHANG Qiuzhao, SHEN Zhen. Temporal and Spatial Analysis of COSMIC Occultation Inversion of Wet Temperature Profile Quality[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 887-894.

[16] 陈伟伟,熊永良,徐韶光,等. 中国区域COSMIC数据掩星反射信号特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(2):189-196.
CHEN Weiwei, XIONG Yongliang, XU Shaoguang, et al. Analysis of Reflected Signals During GPS Radio Occultation Observations of COSMIC Products in China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2): 189-196.

[17] LONG H C, CHEN Q Y, GONG X, et al. Evaluation of the Planetary Boundary Layer Height in China Predicted by the CMA-GFS Global Model[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 845.

[18] XU X, ZOU X L. COSMIC-2 RO Profile Ending at PBL Top with Strong Vertical Gradient of Refractivity[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(9): 2189.

[19] Healy S. ECMWF Starts Assimilating COSMIC-2 Data[N]. Newsletter ECMWF, 2020, 163: 5-6.

[20] Weiss J, Hunt D, Schreiner W, et al. COSMIC-2 Precise Orbit Determination Results [C]//EGU General Assembly Conference, Vienna, Austria, 2020.

[21] FONG C J, CHU C H, LIN C L, et al. Toward the most Accurate Thermometer in Space: FORMOSAT-7/COSMIC-2 Constellation [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2019, 34(8): 12-20.

[22] 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.

[23] WICKERT J, GALAS R, BEYERLE G, et al. GPS Ground Station Data for CHAMP Radio Occultation Measurements[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(6/7/8): 503-511.

[24] 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.

[25] XIA P F, YE S R, JIANG K C, et al. Estimation and Evaluation of COSMIC Radio Occultation Excess Phase Using Undifferenced Measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(5): 1813-1821.

[26] SCHREINER W, ROCKEN C, SOKOLOVSKIY S, et al. Quality Assessment of COSMIC/FORMOSAT-3 GPS Radio Occultation Data Derived from Single- and Double-Difference Atmospheric Excess Phase Processing[J]. *GPS Solutions*, 2010, 14(1): 13-22.

[27] 李明哲,张绍成,胡友健,等. 基于高频观测值的不同GNSS卫星钟稳定性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(10):1490-1495.
LI Mingzhe, ZHANG Shaocheng, HU Youjian, et al. Comparison of GNSS Satellite Clock Stability Based on High Frequency Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(10): 1490-1495.

[28] SCHWARZ J, KIRCHENGAST G, SCHWAERZ M. Integrating Uncertainty Propagation in GNSS Radio Occultation Retrieval: From Excess Phase to Atmospheric Bending Angle Profiles[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(5): 2601-2631.

[29] ESTEY L H, MEERTENS C M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data[J]. *GPS Solutions*, 1999, 3(1): 42-49.

[30] SOKOLOVSKIY S V. Tracking Tropospheric Radio Occultation Signals from Low Earth Orbit[J]. *Radio Science*, 2001, 36(3): 483-498.

[31] Goff J A. Saturation Pressure of Water on the New Kelvin Temperature Scale[J]. *Transactions of the American Society of Heating and Ventilating Engineers*, 1957: 347-354.