



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: COSMIC-2 掩星观测与大气反演廓线质量分析
作者: 张绍成, 魏盛, 郑沈宇, 吴云龙, 余涛
DOI: 10.13203/j.whugis20220556
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-06-27
引用格式: 张绍成, 魏盛, 郑沈宇, 吴云龙, 余涛. COSMIC-2 掩星观测与大气反演廓线质量分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220556>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220556

引用格式：

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), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220556 (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*, 2023, 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 作为 COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate)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。本文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 45dB 以上, 其对应伪距多路径效应中误差在 0.2~0.4m 之间; 掩星天线观测信噪比由第一代 COSMIC 的不足 700v/v 大幅提升至 1200v/v, 且 GLONASS 掩星廓线和 GPS 掩星廓线均与气象再分析资料体现很好的一致性。研究结果可认为, 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的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

Analysis of COSMIC-2 radio occultation observations and atmospheric profiles

ZHANG Shaocheng¹, GUO Sheng¹, ZHENG Shenyu¹, WU Yunlong¹, YU Tao^{*2}

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

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

Abstract: [Objectives] COSMIC-2 constellation, as the follow-on mission of COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate), 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] In this research, we focused 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) re-

第一作者: 张绍成, 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;

通讯作者: 余涛, 教授, 主要从事空间物理学、电离层和中高层大气应用研究。yutaomnn@163.com;

基金项目: 国家自然科学基金 (42174043, 41974096)。

收稿日期: 2023-06-04

analysis products as reference. **[Results]** The results show that the L1 signal-to-noise ratio (SNR) on COSMIC-2 POD antennas were mostly above 45dB, and the corresponding pseudo-range multipath standard deviation errors were between 0.2m and 0.4m. The SNR values on RO antenna were significantly improved from less than $700v/v$ on COSMIC to $1200v/v$ on COSMIC-2, and both the GLONASS and GPS RO profiles show good consistency with ECMWF re-analysis products. **[Conclusions]** It can be concluded that the updated COSMIC-2 RO payloads not only increasing the profile number, and also the quality of RO profiles had been significantly improved with high-gain antennas, which will provide important observations for atmospheric scientific research.

Keywords: COSMIC-2, radio occultation retrieval, atmospheric profile, quality analysis

0.引言

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 实验卫星上得到实验验证后^[1,2], CHAMP、GRACE、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 系统, 首次以星座形式实现全球范围的掩星观测, 有效的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 卫星掩星观测能力的逐渐失效, 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的提升掩星观测数量, 而高增益天线带来的信噪比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]; Chen 等则采用同步掩星匹配验证方法^[8]对比分析 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]; Anthes 等研究显示 COSMIC-2 的 GLONASS 廓线较 GPS 廓线在 30km 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^[10]。在 COSMIC-2 的低层大气反演中, Adhikari 等通过全光谱法(Full Spectrum Inversion, FSI)正演折射率垂直廓线, 分析了 2km 以下 COSMIC-2 掩星偏差与纬度和信噪比高度相关性^[11]; Ho 等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系统的评估^[12]。

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精度特征^[13-15]; 还有学者通过提取 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^[16]。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的分析评估。考虑到欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 于 2020 年 3 月 25 日开始将 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 年 1 月 1 日—3 月 24 日的 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 定轨和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和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(Tri-Band Global Navigation Satellite System Receiver System, TGRS)，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，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 2 组高增益的定向波束天线，主要用于大气层掩星观测^[21]。

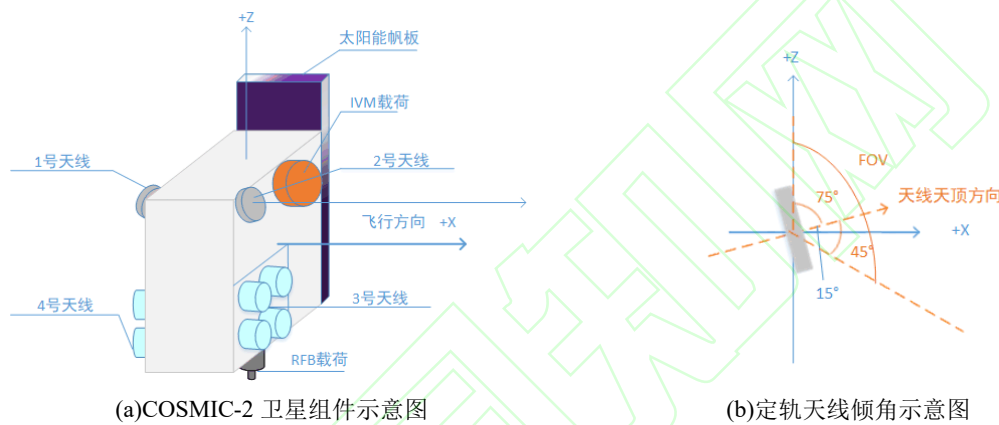


图 1. COSMIC-2 卫星天线分布示意图

Fig 1. Structure diagram of COSMIC-2 satellites

UCAR 作为 COSMIC 系列掩星星座的核心机构，发布了 COSMIC-2 卫星自 2019 年 10 月 1 日之后的各级掩星产品，其产品分级、命名及文件内容说明如表 1 所示。本研究基于 GNSS 掩星反演的原始数据(`podCrx`, `conPhs`)和反演产品 (`atmPrf`, `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 掩星产品分级方法

Table 1. Datasheet of the COSMIC-2 radio occultation products

数据等级	文件名	文件内容
Level 0	<code>trgLv0</code>	掩星接收机原始数据
	<code>leoAtt</code>	卫星姿态信息
Level 1a	<code>podCrx</code>	定轨天线观测数据
	<code>opnGns</code>	掩星天线观测数据
Level 1b	<code>conPhs</code>	大气附加相位产品
	<code>leoOrd</code>	卫星精密轨道产品
	<code>podTc2</code>	定轨天线反演 TEC 产品
Level 2	<code>atmPrf</code>	大气廓线产品
	<code>avnPrf</code>	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， 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 HSL (Height of Straight Line)。

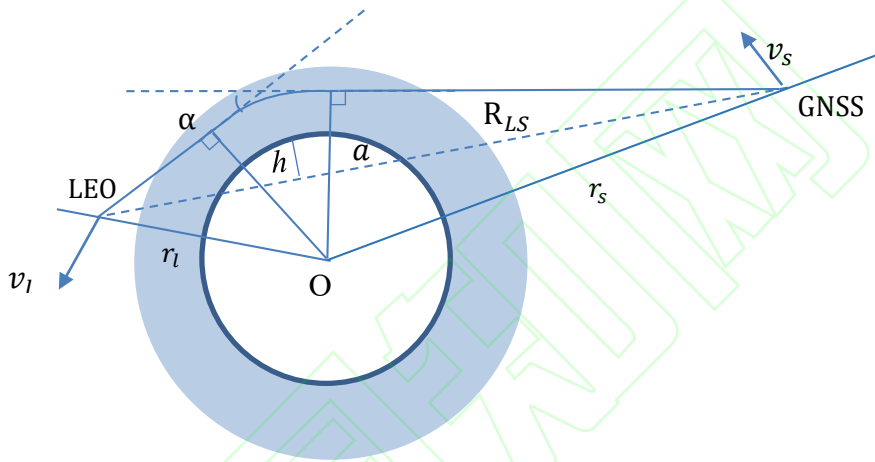


图 2. GNSS 掩星观测几何示意图

Fig 2. Geometric diagram of GNSS radio occultation

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]。

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 SA 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：

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

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：

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

式中, L 表示掩星相位观测值, ρ 表示卫星与接收机之间的距离, c 为光速, δt_{rec} 为接收机钟差, δt^{occ} 和 δt^{ref} 为掩星卫星 occ 和参考卫星 ref 卫星钟差, 下标 IF 表示无电离层组合, ΔT_{rec}^{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 λ_{IF}^{occ} 、 λ_{IF}^{ref} 表示掩星链路和参考链路的卫星信号波长, N_{IF}^{occ} 、 N_{IF}^{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), (2) 的星间差分消除接收机钟差后得到单差相位观测方程:

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

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 δt^{occ} , δt^{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 $\Delta L = \Delta T_{rec}^{occ} + \lambda_{IF}^o N_{IF}^o - \lambda_{IF}^r N_{IF}^r$, 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:

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

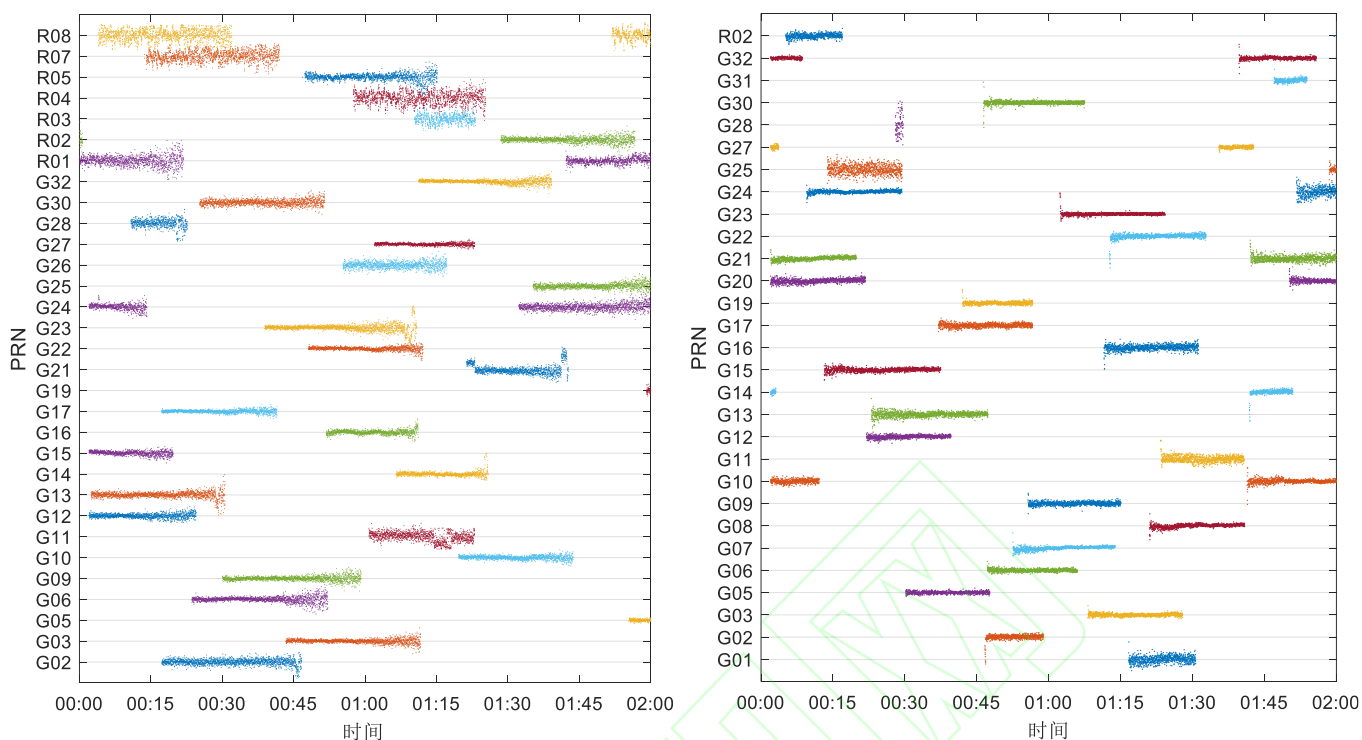
上式中 f 为载波频率, Δf 则为附加多普勒频移。

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]。本节首先以 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 年 2 月 1 日高度角 0° 以上定轨观测数据为例, 计算 GPS、GLONASS 卫星 L1 频段的伪距多路径残差散点如图 3 (a)、3 (b) 所示, 其中相邻卫星在纵轴方向采用 2m 间隔加以区分。



(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 频段伪距多路径残差

Fig 3. Multipath errors on GPS and GLONASS L1 from COSMIC-2 POD observations

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 0.27m 和 0.44m；定轨天线 2 主要为 GPS 观测数据，多路径残差中误差为 0.20m，仅有的 1 颗 GLONASS 卫星多路径残差中误差为 0.19m。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 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°至 90°之间，其中 -30°至 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 45dB。

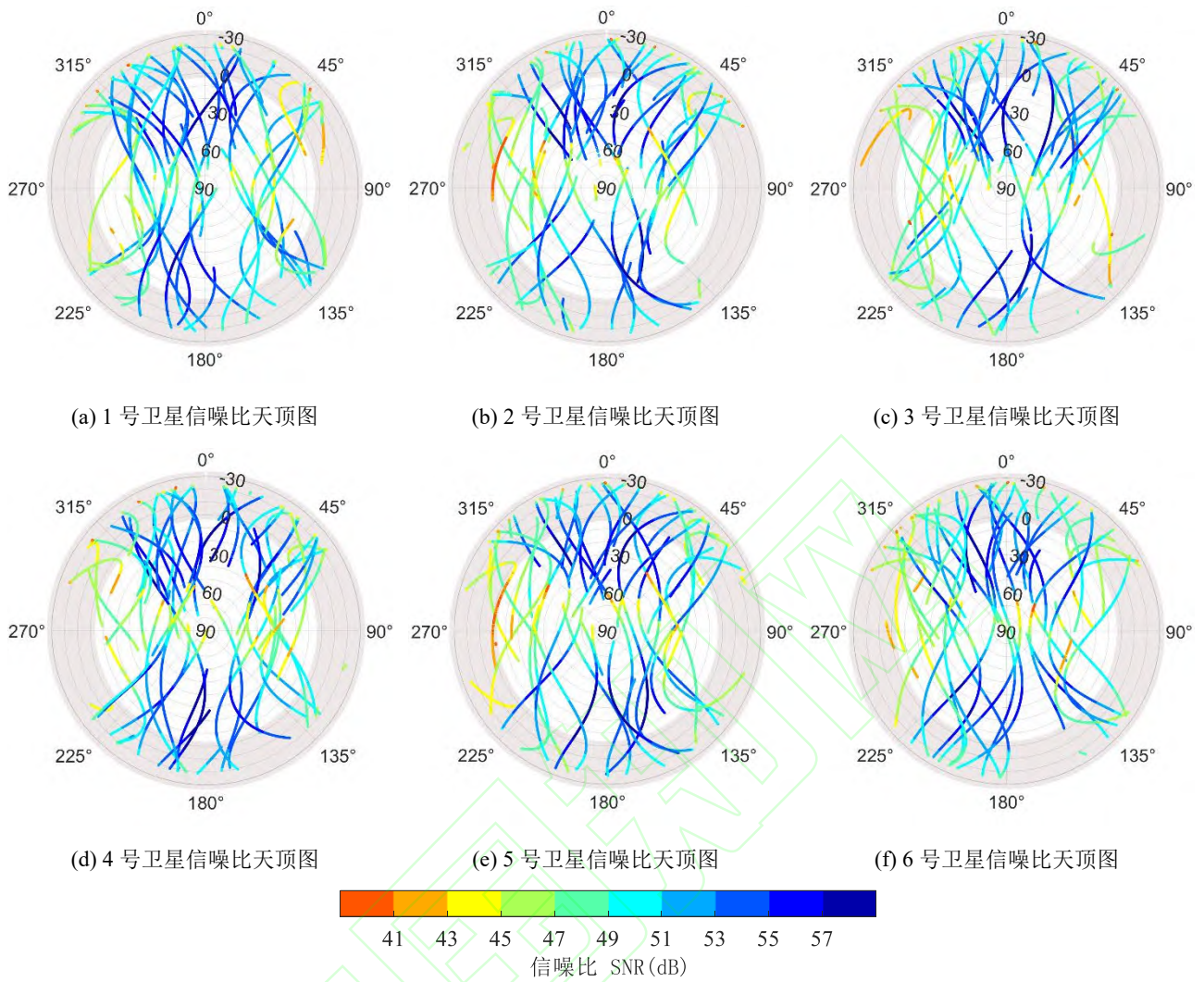
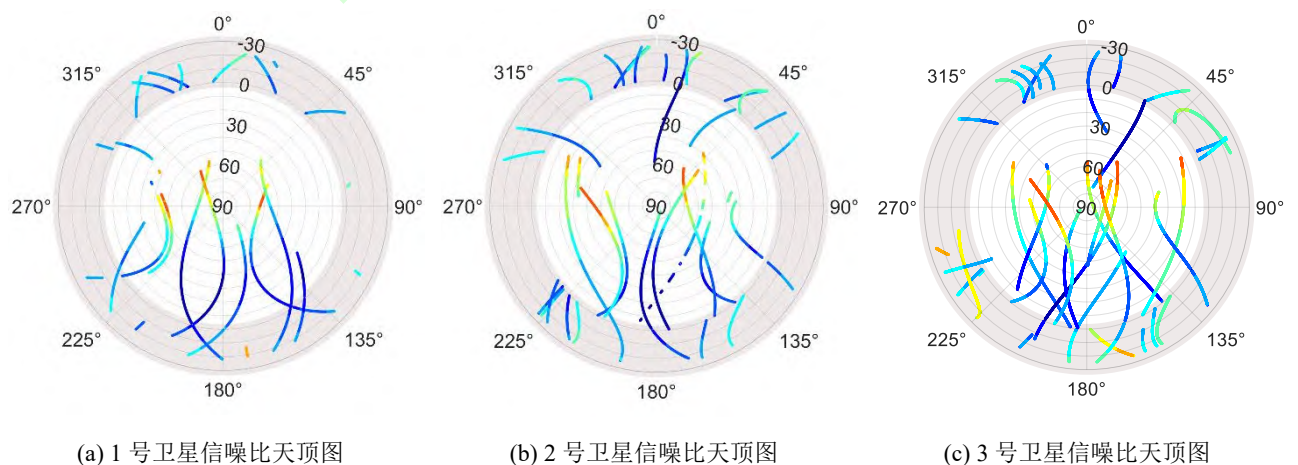


图 4. COSMIC-2 定轨天线 GPS L1 数据信噪比天顶图

Fig 4. Sky plot of GPS L1 SNR(dB) on COSMIC-2 POD antennas

由图 4 中 GPS 卫星轨迹的分布象限可见，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、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。



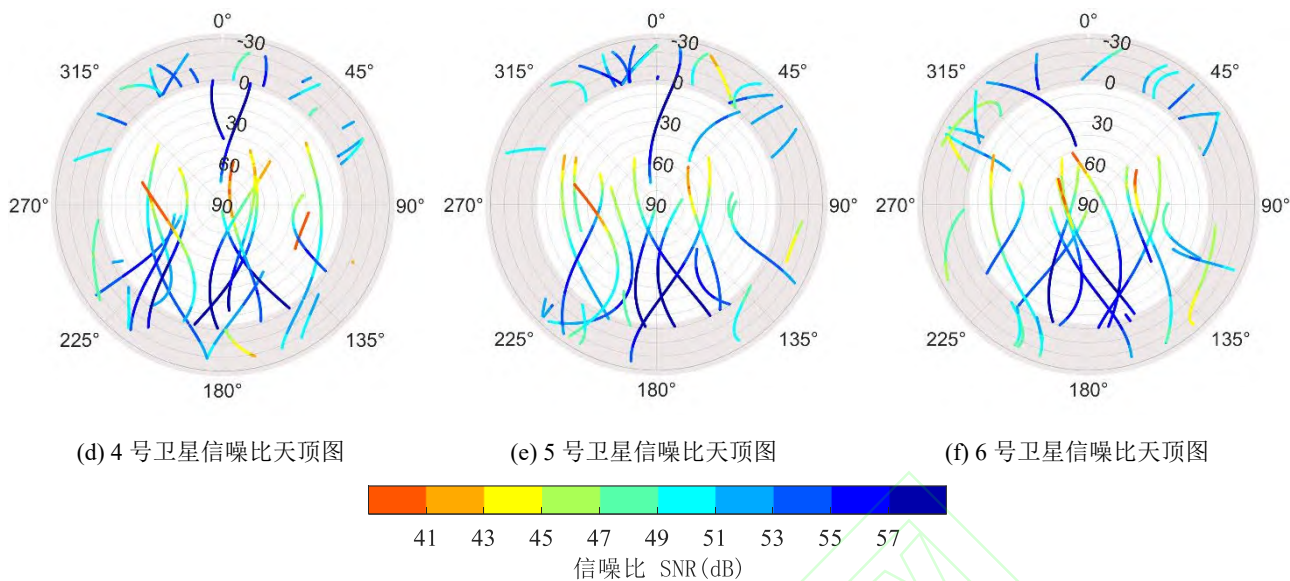


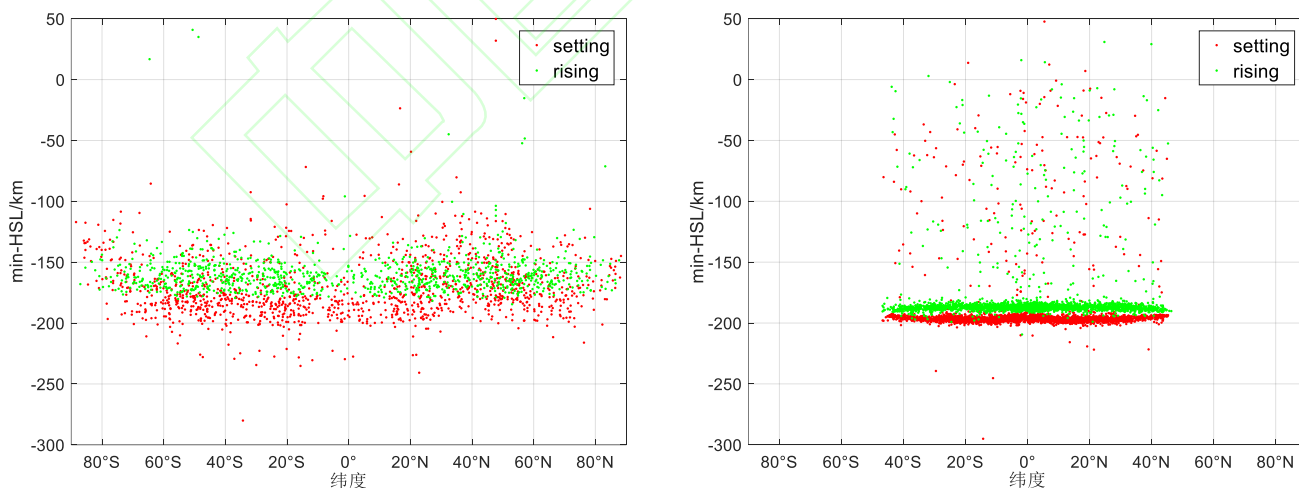
图 5. COSMIC-2 定轨天线 GLONASS L1 数据信噪比天顶图

Fig 5. Sky plot of GLONASS L1 SNR(dB) on COSMIC-2 POD antennas

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 年 2 月 1 日 COSMIC-1 和 2020 年 2 月 1 日 COSMIC-2 掩星附加相位,统计沿纬度分布的掩星探测深度,如图 6 (a)、6 (b) 所示。



(a)COSMIC-1 探测深度与纬度关系示意图

(b)COSMIC-2 探测深度与纬度关系示意图

图 6 COSMIC-1/COSMIC-2 掩星廓线探测深度对比图

Fig 6. Comparison of the probe depths of RO profiles from COSMIC-1/COSMIC-2

图 6 (a)、6 (b) 中红色点为降星事件,绿色点为升星事件。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 1014 次,多集中在 -150km 至 -170km 之间;降星事件共计 1322 次,多集中

在-170km至-190km之间。而图6(b)所示的COSMIC-2的HSL最低点相对集中,升星事件2799次,多集中在-180km至-190km之间;降星事件2997次,多集中于-190km至-210km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第一代COSMIC-1卫星已有大幅提升。

对比2010年1月1日—2月28日的COSMIC-1和2020年1月1日—3月24日的COSMIC-2掩星观测数据,统计每次掩星事件在HSL高度60~80km范围的观测值信噪比均值,结果如图7(a)、7(b)所示。

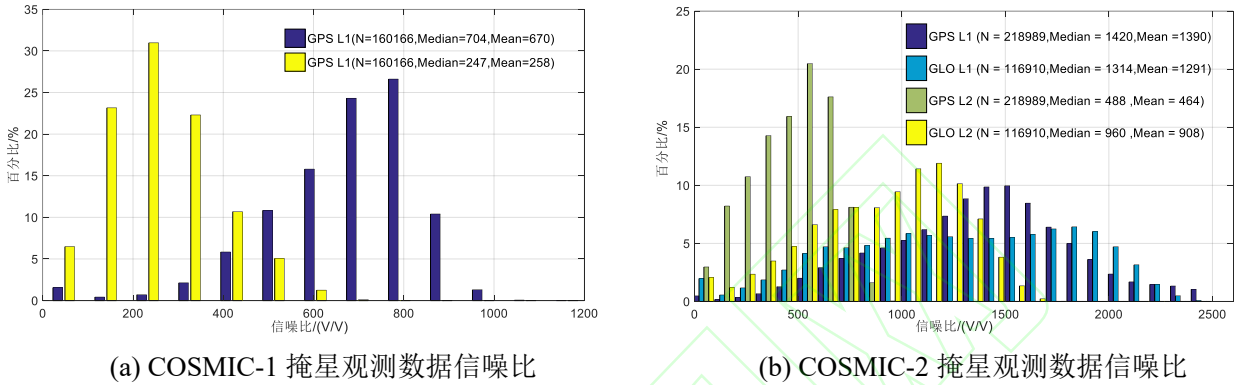


图 7. COSMIC-1/ COSMIC-2 掩星观测数据信噪比对比图

Fig 7. Comparison of the SNR from COSMIC-1/ COSMIC-2 RO observations

对比图7(a)和7(b)可见,第一代COSMIC-1的掩星观测数据在GPS L1频段信噪比均值不足700v/v, L2频段信噪比均值不足300v/v;而COSMIC-2在GPS和GLONASS L1频段的信噪比中位数和均值都在1200v/v以上, GLONASS L2频段信噪比中位数和均值仍在900v/v以上,而GPS L2频段信噪比中位数和均值则略低于500v/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,其掩星探测能力得到大幅提升。

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(ERA5)作为目前认为最为权威的气象在分析资料之一,提供了全球范围内时间分辨率为1小时,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]:

$$\lg e_s = 10.79574 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - 5.02800 * \lg \left(\frac{T}{T_0}\right) + 1.50475 \times 10^{-4} \times \left[1 - 10^{-8.2969 \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)}\right] \quad (5)$$

$$+ 0.42873 \times 10^{-3} \times \left[10^{4.76955 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)} - 1\right] + 0.78614$$

$$P_w = RH \cdot e_s \quad (6)$$

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(hPa), T_0 表示水的三相点温度(273.16K), T 表示绝对温度(K), RH 表示相对湿度。

基于大气压强 P (单位: hPa)计算折射率 N 如下:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (7)$$

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) ~ (11) 计算折射率相对偏差 $RE(N)$ ，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。

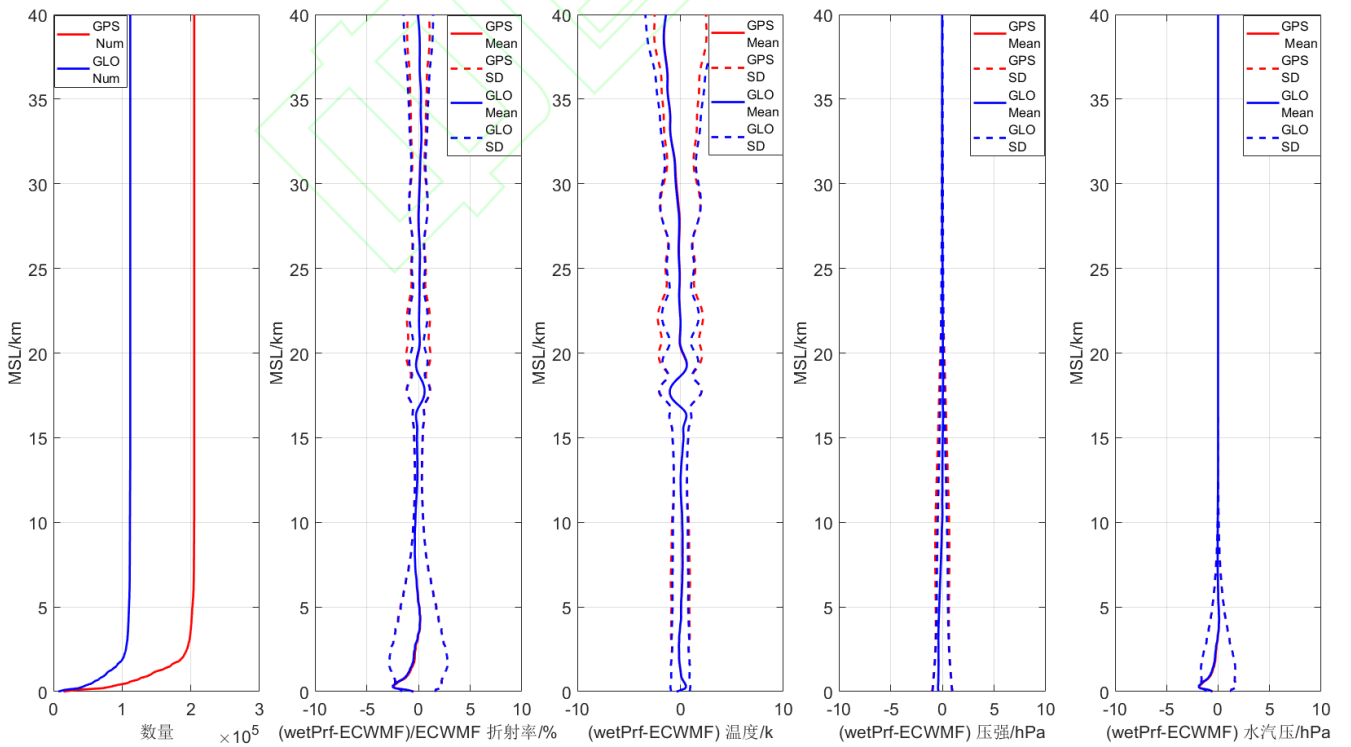
$$RE(N) = \frac{N_{wetPrf} - N_{ECMWF}}{N_{ECMWF}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta P = P_{wetPrf} - P_{ECMWF} \quad (9)$$

$$\Delta T = T_{wetPrf} - T_{ECMWF} \quad (10)$$

$$\Delta P_w = P_{w,wetPrf} - P_{w,ECMWF} \quad (11)$$

以 2020 年 1 月 1 日~3 月 24 日 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) 的 GPS、GLONASS 掩星廓线数量统计结果可见，COSMIC-2 卫星所观测到的 GLONASS 掩星廓线数量约为 GPS 掩星廓线数量的 50%。图 8 (b) 所显示的大气折射率相对偏差在 5~30km 范围小于 0.3%，中误差小于 0.5%；在 5km 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 30km 以下小于 0.5K，中误差小于 1.5K。图 8 (d) 所示的大气压强平均偏差幅值在 10km 以上小于 0.06hPa，中误差小于 0.72hPa，而 10km 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达到-0.51hPa 和 0.98hPa。图 8 (e) 所示的水汽压偏差平均值以及中误差在 10km 以上最大值为 0.03hPa 和 0.06hPa，当高度低于 10km 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-1.82hPa 和 1.70hPa。



(a)掩星廓线数据量 (b)折射率相对偏差 (c)温度偏差 (d)压强偏差 (e)水汽压偏差

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, 15~20km 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 19~25km 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 30km 以上后, 平均温度偏差逐渐变大, 最大幅值达到 1.5K, 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 卫星钟的短期稳定性较 GPS 卫星钟略差有关^[10,27]。

总体而言, 图 8 (b) ~8 (e) 中 COSMIC-2 的 GPS、GLONASS 掩星反演廓线在 30km 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. 结论

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 45dB, 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 30km 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, 有效的提升掩星观测资料的数量。

综上 COSMIC-2 卫星已具备较好 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, 同时也为我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 & Physics, 2005, 5(6):1473-1488.
- [4]. Wickert J, Beyerle G, Koenig 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(3):653-658.
- [5]. Ho S, Anthes R, Ao C, 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, Weiss J, Anthes R, et al. COSMIC-2 Radio Occultation Constellation: First Results[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(4), e2019GL086841.

- [8]. Cao C, Wang W, 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, 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, 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, Zhou X. 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, Zhou X, 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]. Wang Borui, Liu Xiaoyang, Wang Jiuke. Assessment of COSMIC Radio Occultation Retrieval Product[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, 49(2): 241-251 (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)
- [14]. Xu Xiaohua, Wang Haihong. Comparative Study on the Accuracy of GPS Occultation Profiles in Different Seasons[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(6): 639-643 (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)
- [15]. Wang Yaoping, 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 (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)
- [16]. 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 (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)
- [17]. Long H, Chen Q, 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. 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]. *ECMWF newsletter*, No. 163, Spring 2020, 5-6.
- [20]. Weiss J, Hunt D, Schreiner W, et al. COSMIC-2 Precise Orbit Determination Results[C]. *EGU General Assembly 2020*, Online, 4-8 May 2020, EGU2020-20170, 2020.
- [21]. Fong C, Chu C, Lin C, 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 R, Hajj G, Schofield J, 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): 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, Ye S, Jiang K, 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]. 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+1503 (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+1503)
- [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, Meertens C. TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data[J]. *GPS Solutions*, 1999, 3(1): 42-49.
- [30]. Sokolovskiy S. 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[C]. The semi-annual meeting of the American society of heating and ventilating engineers, Murray Bay, Que. Canada, 1957.

网络首发:

标题: COSMIC-2掩星观测与大气反演廓线质量分析

作者: 张绍成, 虢盛, 郑沈宇, 吴云龙, 余涛

DOI: 10.13203/j.whugis20220556

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

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)*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220556 (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*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220556)