

廖蜜,张鹏,刘健,等. 风云卫星的掩星干大气温度廓线精准度特征. 应用气象学报, 2023, 34(3): 270-281.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230302

# 风云卫星的掩星干大气温度廓线精准度特征

廖蜜<sup>1)2)3)</sup>\* 张鹏<sup>1)2)3)</sup> 刘健<sup>1)2)3)</sup> 柳聪亮<sup>4)</sup>

白伟华<sup>4)</sup> 徐娜<sup>1)2)3)</sup> 陈林<sup>1)2)3)</sup>

<sup>1)</sup>(国家卫星气象中心/国家空间天气监测预警中心, 北京 100081)

<sup>2)</sup>(许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

<sup>3)</sup>(中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081)

<sup>4)</sup>(中国科学院国家空间科学技术中心, 北京 100190)

## 摘 要

风云三号气象卫星 C 星/D 星/E 星的掩星接收机接收 GPS 和北斗导航卫星信号, 形成掩星事件, 进而反演得到大气温度廓线。利用 2016—2022 年 FY-3C/3D/3E GPS 和北斗掩星干大气温度廓线, 通过与 ERA5 再分析资料对比, 分析掩星干大气温度的精准度特征。结果表明: 掩星干大气温度廓线在 200 hPa 至 20 hPa 间精度最高, 标准偏差约为 1 K, 且 GPS 与北斗掩星的误差特征相近。在稳定度方面, FY-3C GPS 掩星干大气温度平均偏差线性变化趋势为  $-0.0055 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与国外同类掩星资料稳定性相当。因 2021 年初掩星天线多径效应订正, FY-3D GPS 掩星干大气温度与 ERA5 再分析资料的平均偏差出现明显跳变, 平均偏差值从  $-0.154 \text{ K}$  降为  $-0.007 \text{ K}$ , 负偏差显著减小。总体上, FY-3C GPS 掩星干大气温度廓线长序列稳定度较好, 北斗掩星干大气温度廓线精度能够达到或优于 GPS, 风云极轨卫星序列的 GPS 和北斗掩星在长序列稳定性上具有良好的应用前景。

关键词: 风云掩星; 北斗; 温度; 时间序列变化

## 引 言

地球气候在自然变化和人类活动共同作用下发生显著变化<sup>[1]</sup>, 要认识气候变化的影响, 最基础的工作是获取高质量资料<sup>[2-3]</sup>。长时间气候数据集的构建基于高稳定性和高精确性的观测, 在足够大的时空范围内监测分析全球或区域的气候变化。目前长序列观测资料主要来自卫星和站点观测, 但大部分卫星传感器设计的初衷是提供短时临近天气监测和服务于数值天气预报<sup>[4]</sup>, 而不是长期气候监测。为满足气候研究需求, 在星-星标定、多源数据融合等资料重处理方面需投入更多<sup>[5]</sup>。美国海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的微波探测仪(microwave sound-

ing unit, MSU)和先进的微波探测仪(advanced microwave sounding unit, AMSU)序列资料<sup>[6]</sup>形成长时间气候序列时需开展黑体再定标<sup>[7]</sup>、星-星标定差异<sup>[8]</sup>、轨道高度变化订正<sup>[9-10]</sup>、轨道漂移引起的日变化订正<sup>[11-12]</sup>、通道交叉影响订正<sup>[13]</sup>等。不同的订正方法导致各数据集出现不同的气候变化趋势值, 不确定性增大。站点探空资料作为垂直大气温度的直接测量, 是气候研究的标准序列, 但仪器更新换代、观测实施不统一以及有限的空间覆盖使气候序列存在较大不确定性<sup>[14-15]</sup>。

全球导航卫星掩星(Global Navigation Satellite System Radio Occultation, GNSS-RO)探测模式是在低轨卫星上搭载接收机, 接收全球导航卫星系统发射的无线电信号, 在相互运动过程中以临边方式探测地球大气。无线电信号非真空大气中传播会出现

2022-12-21 收到, 2023-03-20 收到再改稿。

资助项目: 国家重点研发计划(2022YF0801302, 2021YFC2803303), 中国科学院青年交叉团队项目(JCTD-2021-10)

\* 邮箱: liaomi@cma.gov.cn

弯曲或延迟,受不同大气物理特性的影响,信号传输过程中的弯曲程度不同,经过复杂处理,能够反演出大气温度、湿度、密度等物理参量<sup>[16-18]</sup>。每台接收机每日约观测 500 次掩星事件,几乎随机分布在地球表面,且不受云层和下垫面的影响。这些资料提供了一个长期稳定且具有高垂直分辨率的观测信息来源,可从近地表延伸至平流层上部。掩星的原始观测基于国际标准时,即秒级观测,且无需定标,在气候变化应用上具有优势<sup>[19]</sup>。

20 世纪 90 年代无线电掩星试验(Global Positioning System/Meteorology, GPS/MET)证实了 GPS 掩星探测地球大气温度的可行性,对流层中高层至平流层的温度精度约为 1 K<sup>[20-21]</sup>。随着掩星探测技术的发展和试验卫星的不断发射运行,越来越多的国家和地区陆续开展掩星地球大气探测<sup>[22-24]</sup>。掩星探测来自不同的信号源(如 GPS、北斗导航卫星系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)等),有不同的接收平台(如 FY-3C/3D/3E, MetOp A/B/C, COSMIC-1/2 等),存在观测误差和反演误差, Kursinski 等<sup>[25]</sup>基于模拟对 GPS 理论误差的分析得到各个环节反演误差的贡献和传递。随机误差和系统误差组成的观测误差在不同实施任务中相互独立,多个平台和处理中心的数据理论上仅存在结构性误差<sup>[26]</sup>,即源于算法不同。Ho 等<sup>[27]</sup>分析不同资料处理中心掩星资料的自身精度变化发现掩星资料的稳定性好、精度高,掩星温度廓线的误差变化为  $\pm 0.06 \text{ K} \cdot (5 \text{ a})^{-1}$ 。Ladstädter 等<sup>[28]</sup>利用全球高空基准气候站(Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network, GRUAN)探空资料对多年掩星资料进行气候交叉比对,发现两者温度差异小于 0.2 K,在 30 hPa 平流层附近差异较大,但仅约为 0.5 K,所以高精度的 GPS 掩星资料可以用于标定其他观测资料。无线电掩星气象卫星应用设施(Radio Occultation Meteorology Satellite Application Facility, ROM SAF)基于 CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload), GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment), COSMIC(Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate)以及欧洲系列卫星平台(Meteorological Operational Satellite Program, MetOp)的掩星观测资料,形成了 15 年长度的 5° 纬度带的月平均气候序列<sup>[29]</sup>。Gleisner 等<sup>[20]</sup>利用该数据集得到的平流层大气弯曲角趋势与气候模型的

预测相吻合,认为掩星观测为气候监测和气候模式的发展和评估提供了有价值的观测资料来源。

我国第 1 个民用掩星探测仪——全球导航卫星掩星探测仪(Global Navigation Satellite System (GNSS) Occultation Sounder, GNOS)于 2013 年 9 月搭载在风云三号气象卫星 C 星(FY-3C),首次在全球范围内开启多源导航卫星系统信号探测地球大气,即同时兼容接收 GPS 和 BDS 信号<sup>[30]</sup>。掩星弯曲角和折射率的平均偏差约为 0.5%<sup>[31-32]</sup>,标准偏差约为 2%;温度平均偏差为 0.5 K,标准偏差为 2 K。BDS 掩星的精度与 GPS 相当<sup>[33]</sup>。2017 年 10 月发射的风云三号气象卫星 D 星以及 2021 年 7 月发射的风云三号气象卫星 E 星均搭载了 GNOS 仪器,已获取近 9 年的掩星大气探测观测序列。在长时间序列上,风云 GNOS 掩星,尤其是 BDS 掩星与 GPS 是否相同,风云卫星与国外同类资料的稳定性是否相同,是本文需要解答的问题。来源于 FY-3C/3D/3E 多颗卫星上 GPS/BDS 多种导航信号源的数据,在长时间序列的稳定性和精准性考验掩星观测,也考验风云卫星的长时间观测能力。由于掩星温湿廓线反演存在水汽模糊问题<sup>[34-35]</sup>,在不依靠先验资料的情况下,很难同时反演得到温度和水汽信息。不依赖先验资料,假设忽略水汽的影响,可反演得到干大气温度廓线,这在中高层大气或水汽含量稀少的区域精度较好,但大气低层或热带等水汽含量丰富的区域,干大气温度廓线存在明显偏差。分析掩星长序列精准度时,为了不引入太多先验资料信息,拟采用干大气温度廓线,关注对流层上层和平流层大气温度的误差特征。因此,本文对比掩星干大气廓线与 ERA5 再分析资料的平均偏差和标准偏差,分析 FY-3C/3D/3E 卫星平台上获取的长序列 GPS 掩星与 BDS 掩星的干大气温度精准度,为掩星资料在天气、气候监测和分析研究提供依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 风云掩星干大气温度廓线

在掩星事件中,将接收机测量 GNSS 无线电信号的时间延迟和振幅转换为折射角或弯曲角的垂直剖面。在掩星点周围局部球对称的假设条件下,使用 Abel 积分变换<sup>[36]</sup>从弯曲角计算折射指数的垂直分布公式为

$$\ln n(x) = \frac{1}{\pi} \int_x^\infty \frac{\alpha(m)}{\sqrt{m^2 - x^2}} dm \quad (1)$$

式(1)中,  $n$  为折射指数,  $x$  为某高度,  $\ln n(x)$  为折射指数的对数,  $\pi$  是圆周率,  $\alpha$  为弯曲角,  $m$  是碰撞参数。折射指数  $n$  是干大气气压  $P$ 、温度  $T$  和水汽压  $e$  的函数<sup>[37]</sup>, 公式为

$$N = (n - 1) \times 10^6, \quad (2)$$

$$N = \kappa_1 \frac{P}{T} + \kappa_2 \frac{e}{T} + \kappa_3 \frac{e}{T^2} + \kappa_4 \frac{N_e}{f^2} + \kappa_5 \omega. \quad (3)$$

其中,  $N$  为折射率, 式(3)等号右边第1项为干大气贡献, 第2项和第3项为湿大气贡献, 第4项为电离层贡献, 第5项为散射项, 主要来自强降雨大雨滴的影响,  $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \kappa_4, \kappa_5$  为各项系数,  $N_e$  为电离层数密度,  $f$  为导航信号频率。掩星探测经双频信号组合, 能够去除电离层的影响, 在忽略水汽和散射影响后, 得到中性干大气折射率, 干大气折射率与温度的关系为

$$N = \kappa_1 \frac{P}{T}. \quad (4)$$

同时, 结合理想气体状态下的状态方程, 利用式(5)可反演得到干大气温度廓线。以上所谓的干近似是对对流层上部和整个平流层的有效假设<sup>[38]</sup>。

$$P = \rho RT. \quad (5)$$

式(5)中,  $\rho$  为密度,  $R$  为气体常数。本文使用的资料来自中国气象局国家卫星气象中心, 包括 FY-3C GPS 干大气温度廓线、FY-3D GPS/BDS 干大气温度廓线和 FY-3E GPS/BDS 干大气温度廓线。

FY-3C GPS 掩星干大气温度廓线资料为 2016 年 1 月 1 日—2022 年 6 月 30 日, FY-3D GPS 掩星干大气温度廓线为 2018 年 5 月 6 日—2022 年 6 月 30 日, 由于文件种类划分的变化, 干大气温度廓线包含在大气温度廓线文件中, FY-3D BDS 掩星干大气温度为 2021 年 5 月 1 日—2022 年 6 月 30 日, FY-3E GPS 掩星干大气温度为 2021 年 8 月 1 日—2022 年 6 月 30 日。以上资料的时间序列及日平均数量见图 1。掩星在全球范围内呈散点式分布, 在某些时日轨道资料存在缺失, 造成掩星样本量较少。整体上, FY-3C 日平均 GPS 掩星干大气温度廓线约为 480 条, FY-3D 由于通道数量增加, 日平均 GPS 掩星数量约为 530, 而此时 FY-3D 上接收的北斗导航卫星信号为北斗 2 号, 卫星数量较少, 因此日平均 BDS 掩星数量较少, 约为 150, FY-3E 升级接收北斗 3 号导航卫星信号, BDS 掩星和 GPS 掩星数量日平均分别为 560 条和 530 条。

干大气温度廓线是在忽略水汽影响条件下反演

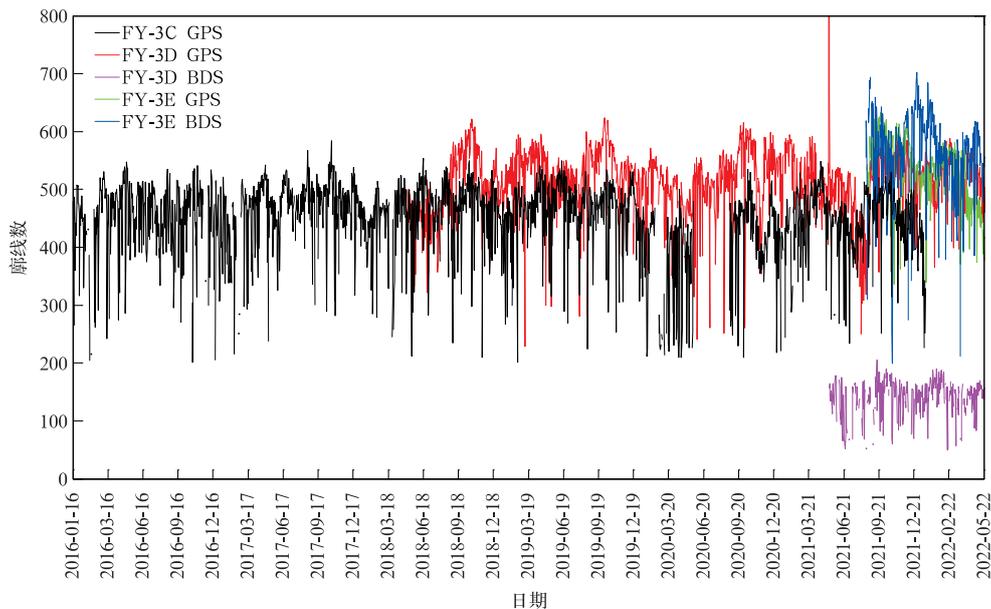


图 1 FY-3C/3D/3E GPS 和 BDS 掩星的日平均廓线数

Fig. 1 Daily profile number of FY-3C/3D/3E GPS and DBS radio occultation

得到(图 2)。由图 2 对数气压坐标可见, 干大气廓线的有效高度更高, 可以延伸到平流层大气, 用于对

流层上层和平流层大气温度变化的监测分析。从 10 hPa 高度开始, 干大气温度和湿大气温度开始出

现差异,虽然两者温度均随高度增高而降低,但降低的幅度存在差异,可以看到干大气温度分辨率更高,温度变化细节更多。由图 2 普通气压坐标可见,干

大气温度与湿大气温度在 500 hPa 以上吻合得较好,500 hPa 以下差异明显。因此,本文选用干大气温度廓线的垂直范围为 500 hPa 以上。

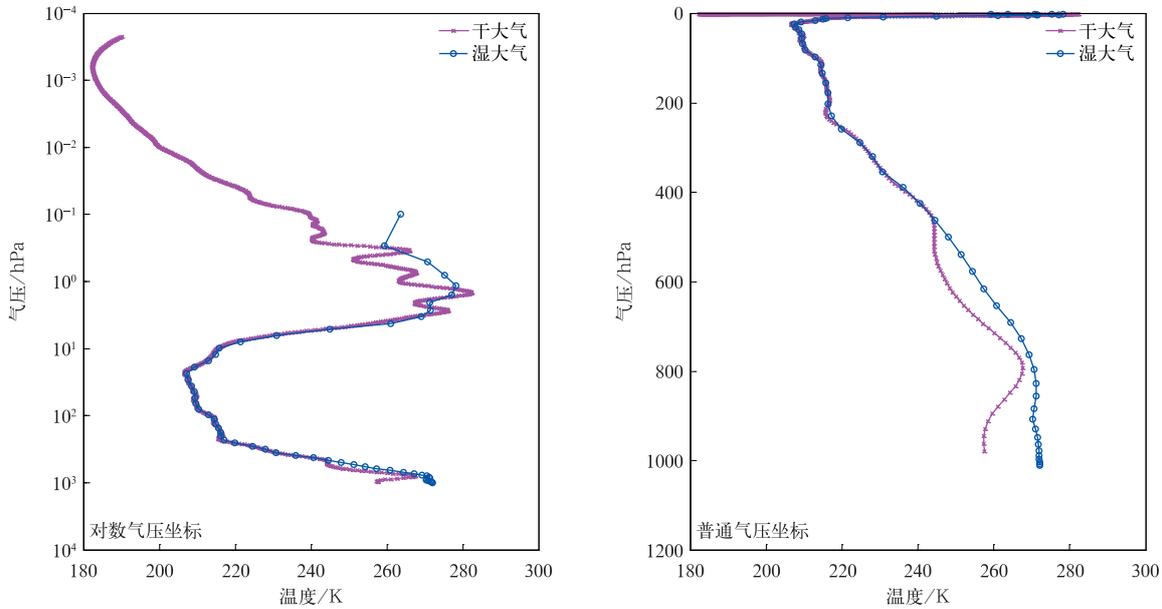


图 2 2022 年 1 月 1 日掩星干大气温度廓线与湿大气温度廓线对比

Fig. 2 Comparison of radio occultation dry and wet temperature profiles on 1 Jan 2022

### 1.2 ERA5 再分析资料

ERA5 再分析资料是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的全球气候系统的第 5 代大气再分析资料,可提供高时空分辨率的大气、陆地和海洋资料。ERA5 再分析资料时空分布连续,可有效降低时空匹配的样本代表性误差。本文选用的温度廓线空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ,时间分辨率为 1 h,垂直方向为 37 个标准气压层,时间范围是 2016 年 1 月 1 日—2022 年 6 月 30 日,用于进行风云卫星掩星干大气温度廓线偏差分析。

### 1.3 时空匹配

掩星温度廓线和 ERA5 温度廓线的时间间隔不超过 30 min,ERA5 温度资料以双线性插值方法插值到掩星点的经纬度位置上,再将掩星资料插值到 ERA5 再分析资料的垂直气压高度上,使掩星观测与 ERA5 再分析资料在水平和垂直方向保持一致。

### 1.4 分析方法

观测温度廓线与背景温度廓线相减的形式计算平均偏差和标准偏差,计算公式为

$$\Delta T_{i,z} = T_{o(i,z)} - T_{b(i,z)}, \quad (6)$$

$$\overline{B}_z = \overline{\Delta T_{i,z}}, \quad (7)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^C (B_{i,z} - \overline{B}_z)^2}{C}}. \quad (8)$$

其中,  $\Delta T_{i,z}$  为某掩星温度廓线  $i$  在某垂直高度  $z$  上观测与背景间的差值,  $o$  表示掩星温度廓线,  $b$  表示背景温度廓线,即 ERA5 温度廓线,  $T_{o(i,z)}$  为掩星温度廓线在某垂直层上的干大气温度,  $T_{b(i,z)}$  为背景温度廓线在对应垂直层上的干大气温度,  $\overline{B}_z$  为掩星廓线在某高度的平均偏差,  $\sigma_z$  为其标准偏差,  $C$  为样本对数量。

采用线性拟合方法分析误差序列的变化趋势。由于序列为观测与背景之差,在假设背景误差稳定的条件下,变化率越接近 0,序列的稳定度越高,掩星温度的稳定性越好。

## 2 掩星干大气温度廓线的精度度

### 2.1 掩星干大气温度廓线的精度特征

利用 2022 年 3—5 月 FY-3E GPS, FY-3E BDS, FY-3D GPS, FY-3D BDS 和 FY-3C GPS 的掩星干大气温度廓线,计算与 ERA5 温度廓线的平均偏差和标准偏差(图 3)。由图 3 可见,各产品的误差模

态特征基本一致,平均偏差在 500 hPa 至 200 hPa 间为逐渐减小的负偏差,随着湿度影响的减小,逐渐进入掩星探测性能最优高度,干大气温度平均偏差在 200 hPa 至 20 hPa 间最小,在 2 hPa 以上又转为正偏差;标准偏差在 500 hPa 至 225 hPa 间逐渐减小,200 hPa 至 100 hPa 间约为 1 K,2 hPa 之上又逐渐增大。综合看,各掩星温度产品的平均偏差在 50 hPa 高度附近出现发散,FY-3E GPS 的负偏差随高度升高逐渐加大,其他产品的正偏差随高度升高逐渐加大。

表 1 是以 FY-3E GPS 为代表列出各高度范围干大气温度廓线的平均偏差和标准偏差,与国外研究 GPS 掩星干大气温度廓线精度相当。Ho 等<sup>[27]</sup>指出 2002—2008 年的 CHAMP 掩星干大气温度在 8~30 km 高度内的平均偏差为  $-0.27\sim 0.15$  K,Ladstädter 等<sup>[28]</sup>利用探空资料对 2002—2013 年 GPS 掩星(包括 CHAMP,GRACE-A 和 COSMIC)在平流层低层的精度评估结果约为 0.2 K。Schwartz 等<sup>[39]</sup>估计 8~25 km 高度干大气温度平均偏差约为 0.3 K。

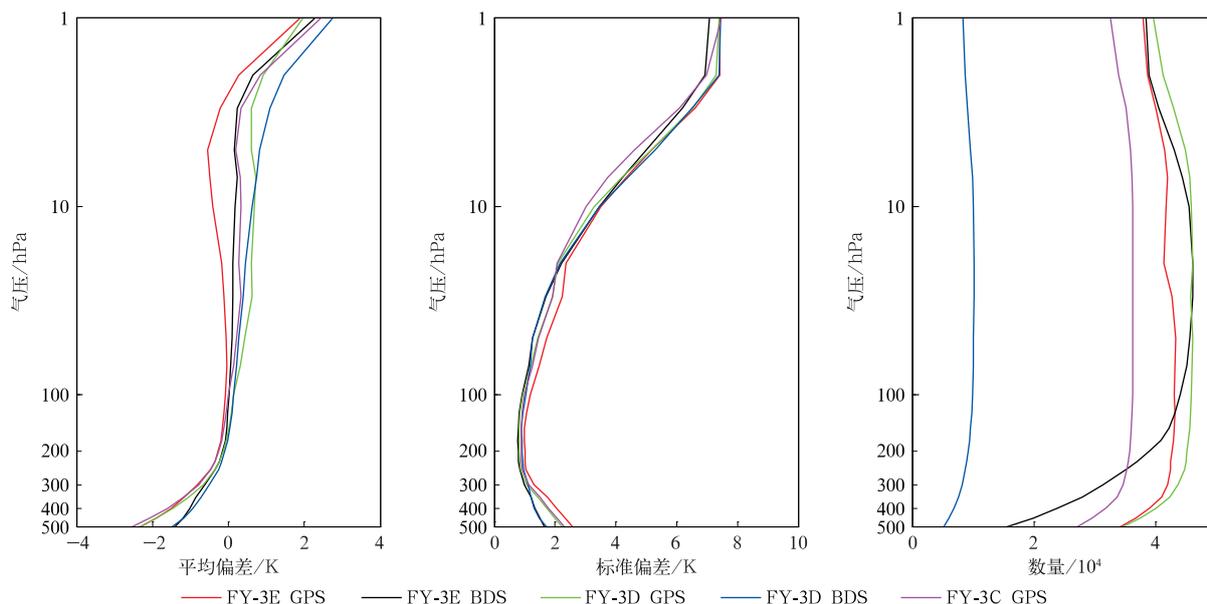


图 3 风云卫星掩星干大气温度廓线与 ERA5 的平均偏差、标准偏差以及垂直样本量

Fig. 3 Deviation, standard deviation and sample number of Fengyun radio occultation dry temperature profiles to ERA5

表 1 FY-3E GPS 与 BDS 掩星干大气温度廓线在不同高度的平均偏差和标准偏差

Table 1 Mean deviation and mean standard deviation of FY-3E GPS and BDS radio occultation dry temperature profile at different altitudes

高度	GPS		BDS	
	平均偏差/K	标准偏差/K	平均偏差/K	标准偏差/K
500 hPa 至 225 hPa	-1.22	2.13	-0.81	1.45
200 hPa 至 100 hPa	-0.17	1.07	-0.05	0.83
70 hPa 至 1 hPa	0.01	4.26	0.41	3.96
500 hPa 至 1 hPa	-0.46	2.49	-0.15	2.08

## 2.2 掩星长序列干大气温度廓线的稳定度特征

为了解掩星干大气温度长时间序列的稳定性,利用不同风云卫星平台及不同导航信号源产生的掩星温度观测,并考虑掩星干大气温度廓线的垂直误差特征,基于每日 300 hPa 至 30 hPa 垂直高度范围内的平均偏差和平均标准偏差,分析掩星干大气温

度长序列的稳定度特征。

### 2.2.1 GPS 掩星干大气温度长序列误差特征

图 4 是不同卫星平台的 GPS 掩星干大气温度序列的平均偏差。由图 4 可见,FY-3C GPS 掩星干大气温度序列持续时间最长,与 ERA5 的偏差无明显差异,2016 年 1 月 1 日—2022 年 6 月 1 日的平均偏

差值约为  $-0.101 \text{ K}$ , 线性变化趋势为  $-0.0055 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ , 平稳性较好。尽管 FY-3C GPS 在 2021 年已退出业务运行模式, 但掩星观测序列仍然维持与前期一致的稳定性。FY-3D GPS 的掩星干大气温度序列呈现明显的两段, 2018 年 4 月—2020 年 12 月的平均偏差约为  $-0.154 \text{ K}$ , 线性变化趋势约为  $-0.0428 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ 。FY-3D GPS 与 FY-3C GPS 的差异约为  $0.05 \text{ K}$ , 一致性较好, 但变化趋势较 FY-3C GPS 偏大, 表现为负偏差逐渐加大, 但 2021 年 1 月 FY-3D GPS 的平均偏差出现跳跃, 其后时段平均偏差约为  $-0.007 \text{ K}$ , 较前期显著减小, 线性变化趋势为  $-0.0033 \text{ K} \cdot$

$\text{a}^{-1}$ , 平稳性有所加强。这与 FY-3D GPS 算法更改的时间一致, 中国气象局国家卫星气象中心对无线电掩星探测仪的掩星天线局地多径效应, 修改了算法中的参数, 降低了干大气温度廓线的平均偏差。FY-3E GPS 的掩星干大气温度序列平均偏差为  $-0.217 \text{ K}$ , 线性变化趋势为  $0.024 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与 FY-3C GPS 的差异为  $0.116 \text{ K}$ , 变化趋势较 FY-3C GPS 偏大, 表现为负偏差逐渐减小。FY-3E GPS 所用数据为在轨测试期, 且统计时间较短, 因此其稳定性较其他卫星平台的参考性略低。

图 5 是不同卫星平台的 GPS 掩星干大气温度

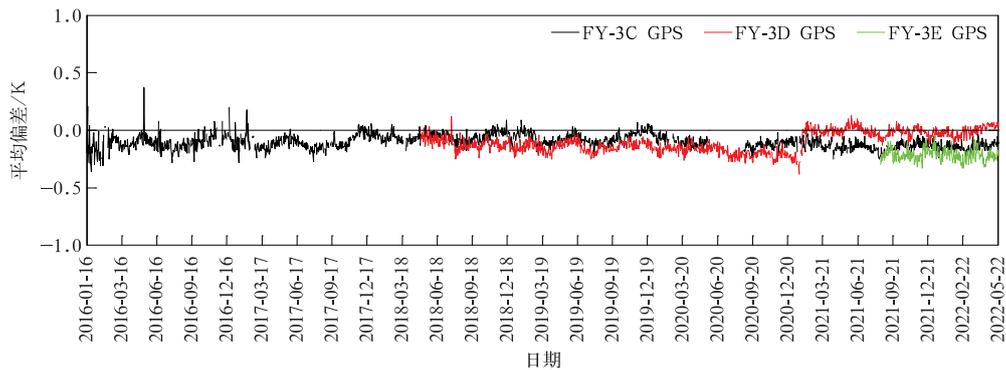


图 4 GPS 掩星干大气温度在 300 hPa 至 30 hPa 高度平均偏差的时间序列  
Fig. 4 Time series of mean deviation of GPS radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

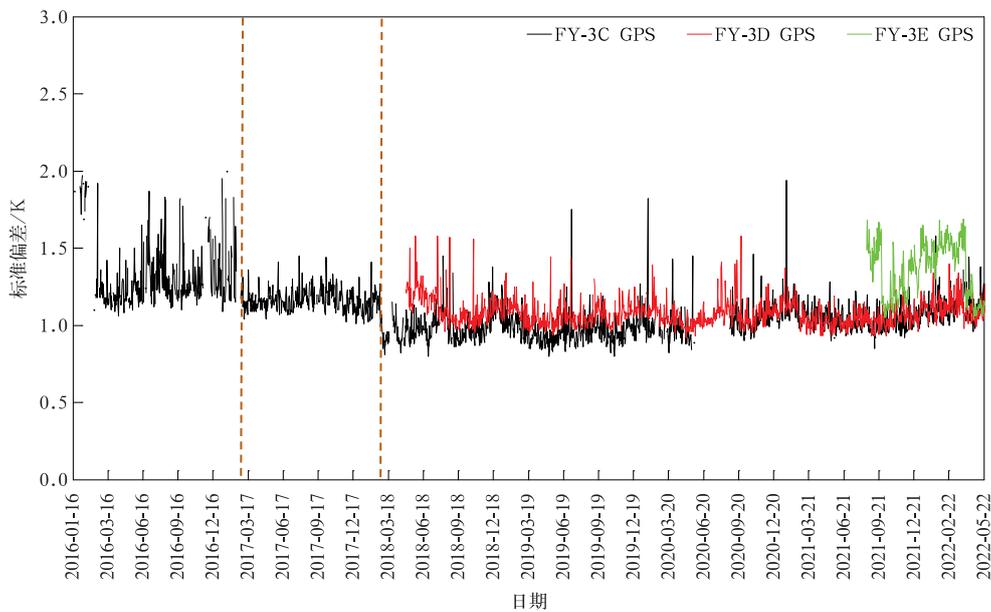


图 5 GPS 掩星干大气温度在 300 hPa 至 30 hPa 高度平均标准偏差的时间序列  
Fig. 5 Time series of mean standard deviation of GPS radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

的标准偏差序列。由图5可见, FY-3C GPS的标准偏差序列呈明显的3段变化, 标准偏差值逐渐减小, 对应FY-3C GPS各阶段算法的改进: 2016年底中国气象局国家卫星气象中心使用更高时效和精度的实时GPS精密定轨文件, 降低了后续掩星反演产品如温度的标准偏差; 2017年底解决掩星钟差误差带来的标准偏差影响, 2018年初开始, 标准偏差值稳定在1.0 K附近, 自2018年3月ECMWF正式开始业务同化FY-3C GPS的掩星廓线。FY-3D GPS虽然经历了偏差的跳动, 但标准偏差未受影响, 平均值约为1.08 K, 与FY-3C GPS最后阶段的标准偏差相当。在轨测试阶段, FY-3E GPS的标准偏差较其他掩星偏大, 平均值约为1.34 K, 且呈波动变化, 2022年3月后标准偏差有所减小。

### 2.2.2 BDS掩星干大气温度长序列误差特征

中国气象局国家卫星气象中心与中国科学院空

间科学技术中心联合实施自主BDS掩星精密星历, 风云卫星FY-3D以及FY-3E BDS掩星产品具备业务化生产能力。FY-3D BDS掩星产品于2021年4月开始近实时业务生产, 2021年7月FY-3E卫星发射后, BDS掩星产品开始近实时业务生产。由平均偏差的时间序列(图6)可见, FY-3D BDS的300 hPa至30 hPa干大气温度平均偏差约为 $-0.048$  K, 线性变化为 $0.058$   $\text{K} \cdot \text{a}^{-1}$ 。经与FY-3D GPS同样的掩星天线局地多径效应算法改进后, 系统性偏差较小。FY-3E BDS的300 hPa至30 hPa干大气温度平均偏差约为 $-0.154$  K, 线性变化为 $0.114$   $\text{K} \cdot \text{a}^{-1}$ , 比FY-3D的负偏差大, 且有明显的逐渐增加趋势, 说明随着FY-3E在轨测试的开展, BDS掩星干大气温度的平均偏差在逐渐减小。

由掩星干大气温度标准偏差的时间序列(图7)可见, FY-3D BDS干大气温度的平均标准偏差为

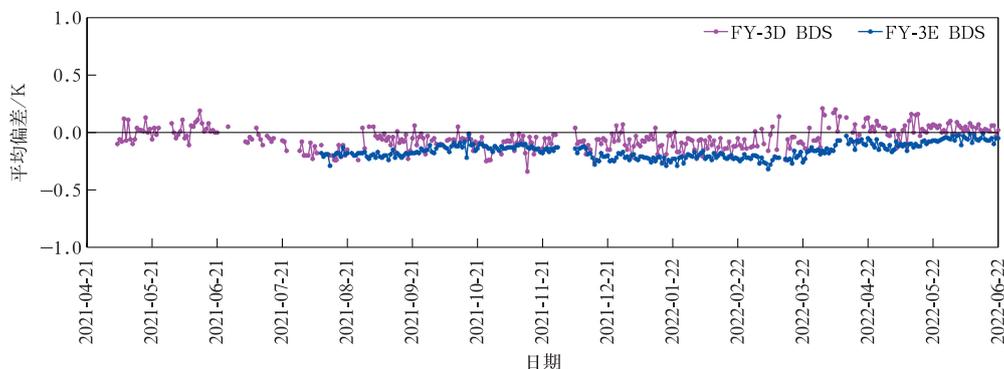


图6 BDS掩星干大气温度在300 hPa至30 hPa高度平均偏差的时间序列

Fig. 6 Time series of mean deviation of BDS radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

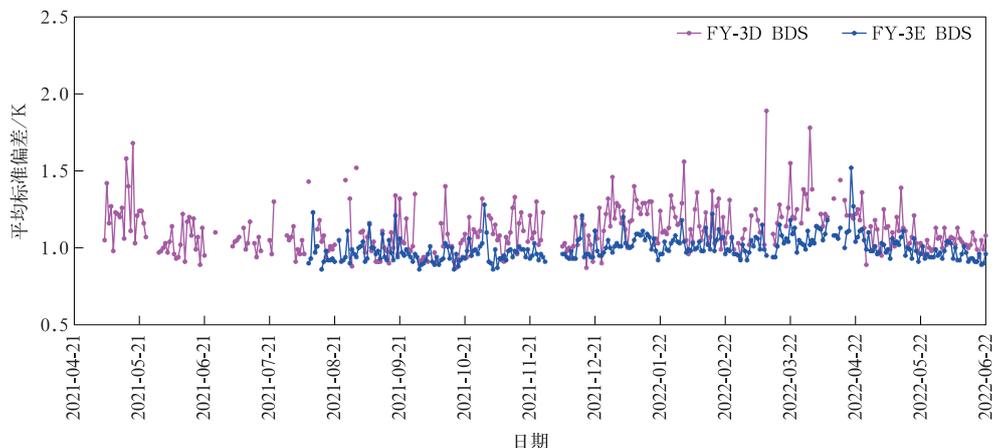


图7 BDS掩星干大气温度在300 hPa至30 hPa高度平均标准偏差的时间序列

Fig. 7 Time series of mean standard deviation of BDS radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

1.341 K, FY-3E BDS 的平均标准偏差为 0.996 K。对于同导航信号源的不同平台, FY-3D BDS 比 FY-3E BDS 平均标准偏差大的原因主要是由于 FY-3D 掩星探测仪接收的是北斗 2 号卫星信号, 卫星数量较少, 产生掩星观测数量较少, 而 FY-3E 能够同时接收北斗 2 号和北斗 3 号卫星信号, 每日观测样本大幅度提升, 可以显著减小统计样本误差。

### 2.2.3 GPS 与 BDS 掩星干大气温度差异

为了方便显示各掩星偏差序列的稳定性, 除 FY-3C GPS 外, 将其余掩星偏差序列加上固定的系统值 (FY-3D GPS 加  $-1.5\text{ K}$ , FY-3D BDS 加  $-1.0\text{ K}$ , FY-3E GPS 加  $0.5\text{ K}$ , FY-3E BDS 加  $1.0\text{ K}$ ), 并计算各序列的变化趋势, 结果见图 8。FY-3D GPS 由于出现明显的变化节点, 将其划分为两段分别进行线性拟合。通过线性拟合可知, FY-

3C GPS 每日线性变化率为  $-0.000015\text{ K}$ , FY-3D GPS 前段日变化率为  $-0.000117\text{ K}$ , FY-3D GPS 后段日变化率为  $-0.000009\text{ K}$ , FY-3D BDS 日变化率为  $0.000159\text{ K}$ , FY-3E GPS 日变化率为  $-0.000066\text{ K}$ , FY-3E BDS 日变化率为  $0.000311\text{ K}$ , 换算后, 上述变化率依次为  $-0.0055\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $-0.0428\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $-0.0033\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $0.0580\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ ,  $0.0241\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$  和  $0.1135\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

Ho 等<sup>[27]</sup>分析 2002—2008 年 CHAMP 掩星资料的气候特性, 得到  $8\sim 30\text{ km}$  高度平均范围内的干大气温度变化趋势约为  $\pm 0.06\text{ K}\cdot(5\text{ a})^{-1}$ , 即为  $\pm 0.012\text{ K}\cdot\text{a}^{-1}$ 。与 Ho 等<sup>[27]</sup>的结果相比, FY-3C GPS 和 2021 年之后的 FY-3D GPS 稳定性很好。由于 FY-3E GPS 和 FY-3E BDS 时间序列仅有半年, 且处于在轨测试阶段, 直接换算后变率值较大。

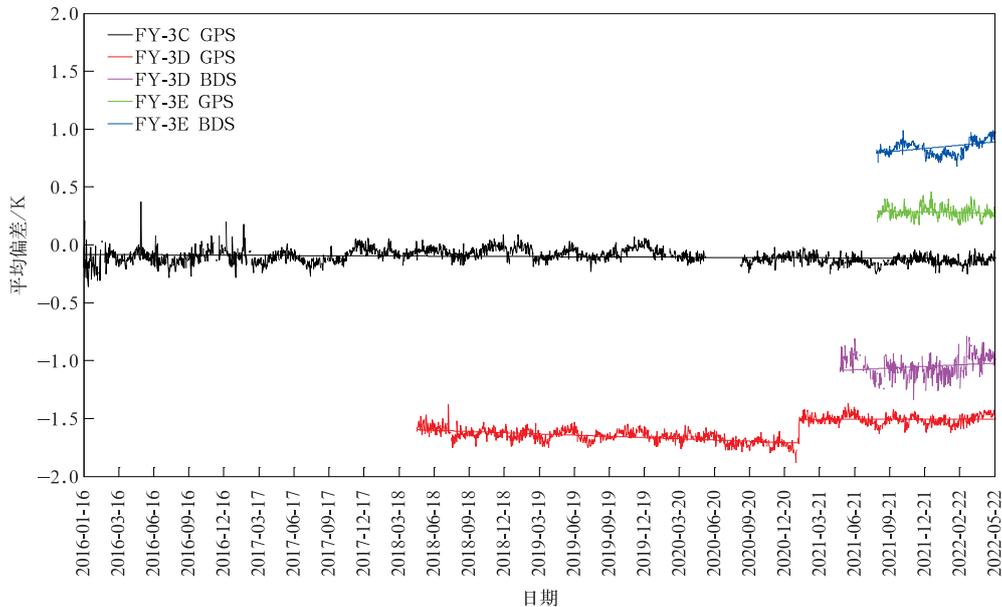


图 8 掩星干大气温度在 300 hPa 至 30 hPa 高度平均偏差的时间序列

Fig. 8 Time series of mean deviation of radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

为了对比 GPS 与 BDS 干大气温度的差异, 表 2 列出两者的平均偏差和标准偏差。由表 2 可见, FY-3D BDS 和 FY-3E BDS 掩星平均偏差小于 FY-3C, FY-3E GPS 以及天线多径效应订正前 FY-3D GPS 大于天线多径效应订正后 FY-3D GPS, 其中一定程度受到 BDS 掩星样本量较小的影响。在标准偏差的对比上, FY-3D BDS 掩星因样本量较 GPS 掩星偏少, 其标准偏差值略大于 FY-3C GPS 和 FY-3D GPS。但在 BDS 掩星数量提升后的 FY-3E 平

表 2 掩星干大气温度在 300 hPa 至 30 hPa 高度的平均偏差和标准偏差

Table 2 Mean bias and deviation of radio occultation dry temperature from 300 hPa to 30 hPa

卫星产品	平均偏差/K	标准偏差/K
FY-3C GPS	-0.10	1.09
FY-3D GPS	-0.15	1.08
FY-3D BDS	-0.01	1.13
FY-3E GPS	-0.22	1.34
FY-3E BDS	-0.15	0.99

台, BDS掩星的标准偏差小于GPS, 说明自主星历下的BDS掩星能够达到或优于GPS掩星的精度水平。

### 3 结论与讨论

本文利用ERA5再分析资料, 对FY-3C/3D/3E的GPS和BDS掩星长序列温度廓线进行精度特征分析, 得到以下结论:

1) 掩星干大气温度廓线在200 hPa至20 hPa间精度最高, GPS与BDS掩星的误差特征模态相近, FY-3C/3E之间以及GPS与BDS掩星之间差异性较小, BDS掩星能够达到或优于GPS掩星的精度水平。

2) 2016年1月1日—2022年6月1日FY-3C GPS掩星干大气温度平均偏差的稳定性很好, 线性变化趋势为 $-0.0055 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与国外掩星干大气温度的稳定性量级相当, FY-3C GPS的温度标准偏差自2018年稳定在1 K左右。

3) 受掩星天线局地多径效应订正的影响, 2021年初FY-3D掩星干大气温度与ERA5的平均偏差出现明显跳变, 负偏差显著减小。

由图2对数气压坐标下干大气温度与湿大气温度的对比可见, 在10 hPa至1 hPa高度两者出现明显差异, 但在上述高度高精度可靠的观测资料有限, 真实的大气物理状态很难获知<sup>[40]</sup>。如以ERA5再分析资料为相对准确的参考资料, 风云及国外同类掩星资料的湿大气温度和干大气温度的对比(图略)可知, 国外掩星资料的干大气温度系统偏差略小于湿大气温度, 标准偏差略大于湿大气温度。整体上, 10 hPa以上干大气温度与湿大气温度相当, 这也说明在较高的高度湿度对折射率的贡献可以忽略不计。但FY-3C掩星干大气温度明显优于湿大气温度, 这是因为受业务处理中采用的预报场资料高度所限, 经一维变分后湿大气温度在10 hPa高度的系统性偏差较大, 在具体研究中需知晓该情况。

总体上, 不同平台不同导航信号源间多源掩星干大气温度序列的稳定性较好, 但算法变更会影响更长时间序列以及更精细化的研究应用。在此基础上开展均一性再处理非常必要, 随着风云掩星资料的积累, 形成均一的长时间掩星气候数据集, 可用于

天气和气候变化监测和研究<sup>[41-42]</sup>。

### 参考文献

- [1] 林爱兰, 谷德军, 彭冬冬, 等. 近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征. 应用气象学报, 2021, 32(3): 302-314.  
Lin A L, Gu D J, Peng D D, et al. Climatic characteristics of regional persistent heat event in the eastern China during recent 60 years. *J Appl Meteor Sci*, 2021, 32(3): 302-314.
- [2] 张人禾. 气候观测系统及其相关的关键问题. 应用气象学报, 2006, 17(6): 705-710.  
Zhang R H. Climate observing system and related crucial issues. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(6): 705-710.
- [3] 赵平, 南素兰. 气候和气候变化领域的研究进展. 应用气象学报, 2006, 17(6): 725-735.  
Zhao P, Nan S L. Some advances in climate and climate change research. *J Appl Meteor Sci*, 2006, 17(6): 725-735.
- [4] 任素玲, 牛宁, 覃丹宇, 等. 2021年2月北美极端低温暴雪的卫星遥感监测. 应用气象学报, 2022, 33(6): 696-710.  
Ren S L, Niu N, Qin D Y, et al. Extreme cold and snowstorm event in North America in February 2021 based on satellite data. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(6): 696-710.
- [5] Hurrell J W, Trenberth K E. Spurious trends in satellite MSU temperatures from merging different satelliterecords. *Nature*, 1997, 386: 164-167.
- [6] 谷松岩, 王振占, 李靖, 等. 风云三号A星微波湿度计主探测通道辐射特性. 应用气象学报, 2010, 21(3): 335-342.  
Gu S Y, Wang Z Z, Li J, et al. The radiometric characteristics of sounding channels for FY-3A/MWHS. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(3): 335-342.
- [7] Nash J, Forrester G F. Long-term monitoring of stratospheric temperature trends using radiance measurements obtained by the TIROS-N series of NOAA spacecraft. *Adv Space Res*, 1986, 6(10): 37-44.
- [8] Ohring G, Wielicki B, Spencer R, et al. Satellite instrument calibration for measuring global climate change: Report of a workshop. *Bull Amer Meteor Soc*, 2005, 86(9): 1303-1313.
- [9] Christy J R, Spencer R W, Lobl E S. Analysis of the merging procedure for the MSU daily temperature time series. *J Climate*, 1998, 11: 2016-2041.
- [10] Mears C A, Wentz F J. Construction of the remote sensing systems V3. 2 atmospheric temperature records from the MSU and AMSU microwave sounders. *J Atmos Oceanic Technol*, 2008, 26: 1040-1056.
- [11] Po-Chedley S, Thorsen T J, Fu Q. Removing diurnal cycle contamination in satellite-derived tropospheric temperatures: Understanding tropical tropospheric trend discrepancies. *J Climate*, 2015, 28: 2274-2290.
- [12] Spencer R W, Christy J R. Precise monitoring of global tem-

- perature trends from satellite. *Science*, 1990, 247: 1558-1562.
- [13] Fu Q, Johanson C M. Stratospheric influences on MSU-derived tropospheric temperature trends: A direct error analysis. *J Climate*, 2004, 17: 4636-4640.
- [14] 邹成治, 高梅. 交叉定标产生的 NOAA 卫星长期大气温观测资料. *应用气象学报*, 2008, 19(5): 582-587.
- Zou C Z, Gao M. A long-term atmospheric temperature dataset derived from NOAA microwave sounding unit with cross-calibration. *J Appl Meteor Sci*, 2008, 19(5): 582-587.
- [15] Thorne P W, Lanzante J R, Peterson T C, et al. Tropospheric temperature trends: History of an ongoing controversy. *WIREs Clim Change*, 2011, 2(1): 66-88.
- [16] Melbourne W G, Davis E S, Duncan C B, et al. The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring. Pasadena, Calif: Jet Propulsion Laboratory, 1994.
- [17] Ware R, Rocken C, Solheim F, et al. GPS sounding of the atmosphere from lower earth orbit: Preliminary results. *Bull Amer Meteor Soc*, 1996, 77: 19-40.
- [18] Sokolovskiy S V. Tracking tropospheric radio occultation signals from low earth orbit. *Radio Sci*, 2001, 36(3): 483-498.
- [19] Steiner A K, Ladstädter F, Randel W J, et al. Observed temperature changes in the troposphere and stratosphere from 1979 to 2018. *J Climate*, 2020, 33: 8165-8194.
- [20] Gleisner H, Ringer M A, Healy S B. Monitoring global climate change using GNSS radio occultation. *npj Climate Atmos Sci*, 2022, 5: 6.
- [21] Kursinski E, Hajj G A, Bertiger W I, et al. Initial results of radio occultation observations of earth's atmosphere using the Global Positioning System. *Science*, 1996, 271: 1107-1110.
- [22] Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102: 29849-29866.
- [23] Schreiner W S, Weiss J P, Anthes R A, et al. COSMIC-2 radio occultation constellation: First results. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL086841.
- [24] Anthes R, Sjöberg J, Feng X L, et al. Comparison of COSMIC and COSMIC-2 radio occultation refractivity and bending angle uncertainties in August 2006 and 2021. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 790.
- [25] 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 Geophys Res*, 1997, 102(D19): 23429-23465.
- [26] Steiner A K, Ladstädter F, Ao C O, et al. Consistency and structural uncertainty of multi-mission GPS radio occultation records. *Atmos Meas Tech*, 2020, 13(5): 2547-2575.
- [27] Ho S P, Hunt D C, Steiner A K, et al. Reproducibility of GPS radio occultation data for climate monitoring: Profile-to-profile intercomparison of CHAMP climate records 2002 to 2008 from six data centers. *J Geophys Res*, 2012, 117: D18111.
- [28] Ladstädter F, Steiner A K, Schwärz M, et al. Climate intercomparison of GPS radio occultation, RS90/92 radiosondes and GRUAN from 2002 to 2013. *Atmos Meas Tech*, 2015, 8: 1819-1834.
- [29] Gleisner H, Lauritsen K B, Nielsen J K, et al. Evaluation of the 15-year ROM SAF monthly mean GPS radio occultation climate data record. *Atmos Meas Tech*, 2020, 13: 3081-3098.
- [30] 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. *气象学报*, 2015, 73(6): 1131-1140.
- Liao M, Zhang P, Bi Y M, et al. A preliminary estimation of the radio occultation products accuracy from the Fengyun-3C meteorological satellite. *Acta Meteor Sinica*, 2015, 73(6): 1131-1140.
- [31] Liao M, Healy S B, Zhang P. Processing and quality control of FY-3C GNOS data used in numerical weather prediction applications. *Atmos Meas Tech*, 2019, 12(5): 2679-2692.
- [32] Liao M, Zhang P, Yang G L, et al. Preliminary validation of the refractivity from the new radio occultation sounder GNOS/FY-3C. *Atmos Meas Tech*, 2016, 9: 781-792.
- [33] 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. *物理学报*, 2015, 64(8): 089301.
- Wang S Z, Zhu G W, Bai W H, et al. For the first time Fengyun3 C satellite-global navigation satellite system occultation sounder achieved spaceborne Bei Dou system radio occultation. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 089301.
- [34] Healy S, Eyre J. Retrieving temperature water vapour and surface pressure information from a refractive-index profiles derived by radio occultation: A simulation study. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 1661-1683.
- [35] Poli P, Joiner J, Kursinski E R. 1DVAR analysis of temperature and humidity using GPS radio occultation refractivity data. *J Geophys Res*, 2002, 107(D20): 4448.
- [36] Phinney R A, Anderson D L. On the radio occultation method for studying planetary atmospheres. *J Geophys Res*, 1968, 73(5): 1819-1827.
- [37] Smith E K, Weintraub S. The constants in the equation for atmosphere index at radio frequencies. *Proc IRE*, 1953, 41(8): 1035-1037.
- [38] Danzer J, Foelsche U, Scherllin-Pirscher B, et al. Influence of changes in humidity on dry temperature in GPS RO climatologies. *Atmos Meas Tech*, 2014, 7: 2883-2896.
- [39] Schwärz M, Scherllin-Pirscher B, Kirchengast G, et al. Multi-mission Validation by Satellite Radio Occultation. Final Report for ESA/ESRIN No. 01/2013, WEGC, University of Graz, Austria, 2013.
- [40] 周雪松, 郭启云, 夏元彩, 等. 基于往返式平漂探空的 FY-3D

- 卫星反演温度检验. 应用气象学报, 2023, 34(1): 52-64.
- Zhou X S, Guo Q Y, Xia Y C, et al. Inspection of FY-3D satellite temperature data based on horizontal drift round-trip sounding data. *J Appl Meteor Sci*, 2023, 34(1): 52-64.
- [41] 刘健, 王锡津. 主要卫星云气候数据集评述. 应用气象学报, 2017, 28(6): 654-665.
- Liu J, Wang X J. Assessment on main kinds of satellite cloud climate datasets. *J Appl Meteor Sci*, 2017, 28(6): 654-665.
- [42] 郭启云, 杨荣康, 程凯琪, 等. 基于探空观测的多源掩星折射率质量控制及对比. 应用气象学报, 2020, 31(1): 13-26.
- Guo Q Y, Yang R K, Cheng K Q, et al. Refractive index quality control and comparative analysis of multi-source occultation based on sounding observation. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(1): 13-26.

## Accuracy and Stability of Radio Occultation Dry Temperature Profiles from Fengyun Satellites

Liao Mi<sup>1)2)3)</sup> Zhang Peng<sup>1)2)3)</sup> Liu Jian<sup>1)2)3)</sup> Liu Congliang<sup>4)</sup>  
Bai Weihua<sup>4)</sup> Xu Na<sup>1)2)3)</sup> Chen Lin<sup>1)2)3)</sup>

<sup>1)</sup> (National Satellite Meteorological Center/National Center for Space Weather, Beijing 100081)

<sup>2)</sup> (Innovation Center for Fengyun Meteorological Satellite, Beijing 100081)

<sup>3)</sup> (Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, CMA, Beijing 100081)

<sup>4)</sup> (National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

### Abstract

The earth's climate has undergone significant changes due to the combined effects of natural changes and human activities. To understand the impact of climate change, the most fundamental work is to establish high-quality data required for climate purposes. Currently, the long series observations mainly come from satellites and sites. However, most satellite sensors are designed for short-term and imminent weather monitoring and numerical prediction, rather than long-term climate monitoring. To meet future research needs, more efforts are needed in data reprocessing such as satellite calibration and multi-source data fusion.

Global Navigation Satellite System Radio Occultation (GNSS-RO) is a system that carries a receiver on low orbit satellite to receive radio signals transmitted by the global navigation satellite system. GNSS-RO detects the earth's atmosphere in a borderline manner during relative motion. When propagating in non-vacuum atmosphere, radio signals may appear bent or delay due to different atmospheric physical characteristics. After complex processing, physical parameters such as atmospheric temperature, humidity, and density can be inverted. Each receiver observes approximately 500 occultation events per day, which are almost randomly distributed on the earth and not affected by clouds and underlying surfaces. These data provide a source of observational information with high vertical resolution and long-term stability, extending from near surface to upper stratosphere. The original occultation observation is based on time and position measurements, needing no calibration, which has advantages in climate change study.

The occultation receiver on FY-3C/3D/3E meteorological satellite can receive GPS and Beidou Navigation Satellite System (BDS) signals, and the records are almost nine years long. To analyze the accuracy and stability of temperature records from multiple radio occultation, the mean and standard deviation of the dry temperature of FY-3C/3D/3E GPS and BDS radio occultation are studied using ERA5 data. It demonstrates that the accuracy of the dry temperature profile is the highest between 200 hPa and 20 hPa and the

error characteristics of GPS and BDS radio occultation are similar. The stability of the average temperature deviation of FY-3C GPS for 5-year time series is very good, which is  $-0.0055 \text{ K} \cdot \text{a}^{-1}$ . After several algorithm improvements, the standard deviation of FY-3C GPS dry temperature decreased to about 1 K at the beginning of 2018. BDS radio occultation products are operationally provided since April 2021, and there is a good consistency between FY-3C/3E and between GPS and BDS radio occultation. Due to the algorithm adjustment at the beginning of 2021, the average deviation between FY-3D radio occultation and ERA5 data shows a significant jump. In general, the stability of multiple radio occultation dry temperature records is good and promising for climate change monitoring and research. It is necessary to carry out homogeneity reprocessing.

**Key words:** Fengyun radio occultation; Beidou; temperature; time series change