

# FY-3C的掩星探测特点和初步结果

廖蜜<sup>1, 2, 3</sup> 张鹏<sup>3</sup> 杨光林<sup>3</sup> 白伟华<sup>4</sup> 孟祥广<sup>4</sup> 杜起飞<sup>4</sup> 孙越强<sup>4</sup>

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 南京信息工程大学, 南京 210044; 3 国家卫星气象中心, 北京 100081;  
4 中国科学院空间科学应用中心, 北京 100190)

**摘要:** 全球导航卫星掩星接收机 (GNOS-Global Navigation Satellite System Occultation Sounder) 是风云卫星首次尝试掩星探测技术的仪器, 它能够同时兼容GPS (Global Positioning System) 和我国自主研发的北斗BDS (BeiDou navigation satellite) 信号。简要介绍了国际上掩星探测技术的发展情况, 以及我国的首个民用掩星接收机GNOS的仪器概况, 对其数据的主要处理过程进行了描述, 并利用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 再分析资料进行对比分析, 结果显示GNOS-GPS 掩星中性大气折射率在5~25km有最优的探测精度, 标准偏差在1%以内, 中高纬度的精度好于低纬度地区。掩星探测的精度与国外同类掩星数据类似, 体现了GNOS掩星探测的价值, 但对于30km以上的高度, 精度还有待进一步提高。

**关键词:** FY-3C, 掩星探测, GNOS, 折射率

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.012

## Status of Radio Occultation Sounding Technology of FY-3C GNOS

Liao Mi<sup>1, 2, 3</sup>, Zhang Peng<sup>3</sup>, Yang Guanglin<sup>3</sup>, Bai Weihua<sup>4</sup>, Meng Xiangguang<sup>4</sup>, Du Qifei<sup>4</sup>, Sun Yueqiang<sup>4</sup>

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 3 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081 4 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract:** This paper gives a brief introduction to the status of radio occultation technology implemented on FY-3C and describes the instrument mounted on it, GNOS (Global Navigation satellite system Occultation Sounder). The data processes are stated as well. To evaluate its performance, the refractivity profiles are compared by making use of ECMWF reanalysis in terms of global and different latitudes. The results show that the performance of GNOS-GPS is the best at the vertical range of 5-25km with the standard deviation below 1%, consistent with other occultation sounders. The expected result demonstrates that middle and high latitudes show less bias than lower areas, due to fewer multipath effects of moist atmosphere. These results illustrate that FY-3C has possessed a new sounding ability with the first trial, but still has much work to do to improve the precision at higher altitude.

**Keywords:** FY-3C, radio occultation technology, GNOS, refractivity

### 0 引言

无线电掩星探测技术, 是指在导航卫星与低轨卫星的相对运动过程中, 导航卫星发射的无线电信号切过大气层, 再被低轨卫星上的接收器接收。这样的信号不同于在真空中直线传播的信号, 由于它与大气的相互作用, 从而使其发生弯曲或延迟并包含大气层的信息<sup>[1]</sup>。早期低轨卫星 (LEO) 上的接收机主要设计为接收美国GPS导航卫星发射的信号, 因此无线电掩星探测也叫GPS-LEO掩星探测, 随着其他类似导航卫星系统的完善, 如俄罗斯的GLONASS、欧洲

的GALIEO以及我国的北斗BDS, 为增加掩星观测的数量, 接收机可以设计为兼容接收多种导航卫星的信号, 这样的掩星观测技术也被统称为GNSS-LEO掩星观测。接收机设计为双频信号接收, 如接收GPS导航卫星信号的 $f_1=1573\text{MHz}$ 和 $f_2=1234\text{MHz}$ 波段, 记录信号相位和振幅随时间的变化, 同时结合导航卫星和低轨卫星高精度的位置和速度信息, 利用复杂的反演算法得到以时间为函数的大气或电离层的附加相位, 再反演为以碰撞高度为函数的弯曲角廓线以及几何高度为函数的折射率廓线, 最后结合背景场信息, 反演得到温湿压廓线<sup>[2]</sup>。

早在20世纪60年代, 美国使用这样的技术用于行星大气的探测<sup>[3]</sup>, 后经模拟实验证实也能用于地球大

收稿日期: 2015年8月27日; 修回日期: 2015年12月29日  
第一作者: 廖蜜 (1986-), Email: liaomi@cma.gov.cn

气的探测<sup>[4]</sup>。随着星载发射机上的时钟性能逐步稳定且制造成本降低、卫星定位精度的不断提高,以及GPS全球定位系统的组建,无线电掩星探测技术用于地球大气的设想得以实现。20世纪90年代,以GPS/MET项目的开展为契机,掩星探测计划得以顺利实施<sup>[5]</sup>,并最终反演得到地球大气物理参数廓线,经验证该类廓线尽管水平分辨率较低(大约300km)、最低探测高度还不能伸展到近地面,以及像其他卫星探测一样无法得到直接的风场测量,但其具有的高垂直分辨率,高精度,全球分布,不受云、降水或气溶胶的影响,无需定标,与传统探空廓线完全独立等特征使得掩星探测资料有极大的应用价值<sup>[6]</sup>。在GPS/MET的短暂试验之后,有着更先进探测技术的掩星计划随即开展,如德国CHAMP、阿根廷SAC-C。2005年,美国和中国台湾合作的COSMIC掩星探测星座,能够近实时、高精度、多数量地提供掩星廓线,为数值天气预报、天气气候分析等多领域的应用提供保障。此外,欧洲Metop极轨卫星上的掩星接收机GRAS也开始业务运行,进一步提高了高质量掩星数据的数量。这些掩星探测数据能够有效地应用到数值天气预报、天气和气候分析、电离层研究以及辐射定标等领域<sup>[7-10]</sup>。

目前,在现有的掩星探测计划中,每天大约有3000条左右的掩星探测廓线,对于同化掩星资料用于数值天气预报而言,还未能达到同化预报的数据饱和量。我国的掩星探测计划在2000年之后即开始筹备,及至2013年9月23日风云极轨气象卫星FY-3C发射时,搭载了我国第一个民用导航卫星信号接收机,即全球导航卫星掩星接收机GNOS,它可以同时接收GPS导航信号和BDS北斗导航信号用以掩星探测。作为风云卫星在掩星探测技术上的首次尝试,GNOS仪器及产品的现状是本文讨论的主要内容。

## 1 仪器介绍

全球导航卫星掩星接收机GNOS设计为采用国际上最先进的开环跟踪(Open-loop)技术<sup>[11]</sup>,采样频率为100 Hz,与锁相环跟踪相比,这一技术可跟踪信号至地面1~2km高度处。针对电离层的应用需求,对GNOS天线结构进行专门设计,监测范围最高可至800km。与国际上已经实施和计划中的掩星探测任务不同,GNOS除接收GPS信号以外,还兼容中国自主研发构建的北斗二代导航卫星信号,这一特点一方面将使GNOS摆脱对GPS信号的信赖,另一方面,也会使GNOS接收的掩星事件加倍。单一星座状态下,GNOS每天可得到的中性大气廓线和电子浓度廓线在500次左右,兼容北斗信号可使掩星数量增至1000次

左右。在目前的业务状态下,GPS信号的掩星廓线产品能够达到业务的近实时处理,但BDS信号处理的产品还不能近实时获取。

GNOS掩星探测仪由1个数据处理单元、3个射频处理单元以及3副天线组成,3副天线分别为前向掩星接收天线、后向掩星接收天线以及定位接收天线。卫星前进方向的天线及射频单元用于接收上升的大气和电离层掩星信号,后向方向的天线及射频单元接收下降的大气和电离层掩星信号,顶部定位接收天线及射频单元接收非掩星信号,用于低轨卫星的精密定轨。天线峰值增益为10dB。对于GPS信号GNOS设计了14个通道,其中8个用于定位,6个用于掩星探测;对于BDS它有8个通道,其中4个定位,4个掩星探测。详细仪器参数见表1。

表1 GNOS 仪器的主要参数  
Table 1 GNOS instrument parameters

|          |                                 |   |
|----------|---------------------------------|---|
| 接收频率     | GPS                             | $f_1=1575.42$ MHz<br>$f_2=1227.60$ MHz  |
|          | BDS                             | $f_1=1561.098$ MHz<br>$f_2=1207.14$ MHz |
| 码型       | GPS                             | L1C/A、L2C、L2P                           |
|          | BDS                             | B1I、B2I                                 |
| 通道数      | GPS                             | 14 (8个定位观测, 6个掩星观测)                     |
|          | BDS                             | 8 (4个定位观测, 4个掩星观测)                      |
| 采样率      | 定位                              | 1Hz                                     |
|          | 电离层掩星                           | 1Hz                                     |
|          | 大气层掩星                           | 闭环 50Hz<br>开环 100Hz                     |
| 载波相位精度   | 2mm                             |   |
| 伪距测量精度   | ≤30cm                           |   |
| 实时定位精度   | ≤10m                            |   |
| 晶振短稳     | 10E-12                          |   |
| 掩星天线峰值增益 | 10dBi (方位角±35°, 水平角±7.5°)       |   |
| 等效噪声温度   | 250K                            |   |
| 动态范围     | -145~-100dBm                    |   |
| 信号带宽     | GPS P码 20.46MHz<br>BDS 4.092MHz |   |

## 2 数据处理流程介绍

图1是GNOS中性大气数据处理流程的概略图,显示了从原始观测数据到大气参数的主要处理过程。

### 2.1 精密定轨

精密定轨(POD)的作用即是精确确定卫星位置和速度以及GNSS接收机钟差,用于后续计算附加相位,它是后端反演产品精度的重要保证。在进行精密定轨时,需要输入的数据包括定位天线测量得到的L1和L2波段的伪距和载波相位、IGS(International GNSS Service)网站提供的GPS轨道和发射机偏离GPS时间的钟差信息、低轨卫星的姿态信息以及地球倾向性参数。GNOS的数据处理包括近实时和后处

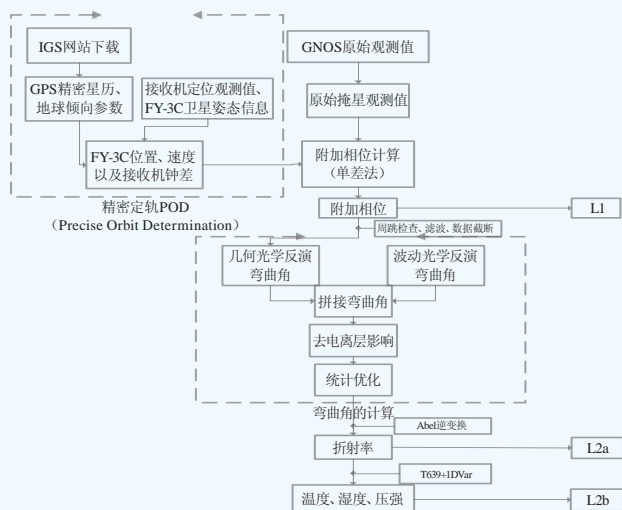


图1 GNOS 大气掩星数据处理流程  
Fig. 1 Flow chart of GNOS atmospheric processing

理两条业务主线，在近实时过程中精密定轨用到的GPS轨道是IGS提供的超快速精密轨道信息，时效在3h内，而后处理则选用精度更高的轨道信息，时间滞后15d。经在轨测试，GNOS精密定轨的精度能够达到设计目标，即实时定位精度小于10m，速度精度小于0.1m/s，后处理定位精度小于20cm，速度精度小于0.2mm/s。

## 2.2 Level1 附加相位的计算

GNOS附加相位的计算目前采用的是通用算法—单差法<sup>[12]</sup>，它在掩星探测的同时接收一个参考星的信息，通过掩星和参考星之间的差值，来进一步消减低轨卫星的钟差。

## 2.3 Level 2 产品反演

### 2.3.1 弯曲角

在反演之前，以时间为函数的附加相位将会被进行周跳检查和平滑处理，再利用导航卫星和低轨卫星之间的几何关系，依据几何光学反演方法，假设单一路径传播以及球对称的情况下，反演以碰撞参数为函数的弯曲角<sup>[13]</sup>。几何光学方法在25km以上有较高的反演精度，但25km以下，由于垂直折射率梯度较大，射线会出现多路径效应，如继续采用几何光学反演则会带来较大的误差，因此在25km以下，采用波动光学(CT2)反演方法，将时间坐标转换到频率坐标系统下进行处理。

要得到中性大气的弯曲角、折射率及后续产品，还需考虑电离层对中性大气的影响。由于电离层粒子对不同无线电频率有不同的响应，而中性大气的弯曲角不随频率的变化而变化，因此采用一个简单的线性

组合，即可消掉绝大部分电离层的影响。但这种线性组合方法仍会带来一些残余影响，因此还必须采用最优估计的方法，结合气候背景场信息(MSIS)，得到最优的无电离层影响的中性大气弯曲角廓线。

### 2.3.2 温湿廓线

掩星反演温湿廓线存在一个水汽模糊的问题，即不能同时反演得到温度和水汽廓线。如在干大气状态下，不考虑水汽的影响，那么就能直接得到干大气的温度产品，这样的假设在水汽含量较少的环境下适用，但在热带地区尤其是对流层低层，水汽含量丰富不能忽略的时候，这样的反演就存在较大的误差。考虑到这样的情况，GNOS反演温湿廓线采用的是一维变分的方法，即利用T639模式预报场作为背景先验信息，结合观测场和背景场，拟定观测误差协方差和背景误差协方差，反复多次迭代，最后同时反演出温度和湿度廓线。

## 3 产品精度

GNOS有多级产品，可以满足不同的应用需求，最直接的应用即是弯曲角或折射率廓线经资料同化系统用于数值天气预报。弯曲角或折射率的精度可以最直接地反映GNOS仪器的探测性能和反演方法的有效性，而最后端的温湿廓线，由于已包含了预报模式的信息，它的精度已不再完全是掩星资料的精度。因此，直接简单而有效的衡量手段之一则是对折射率廓线进行精度验证。由于BDS产品尚未进入业务化，因此以下的验证结果只针对GNOS接收GPS信号的反演产品。

本文对2013年11—12月的近实时GNOS-GPS折射率产品，利用ECMWF的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点、最高可达1hPa的37层标准气压层高度的再分析资料进行对比分析。尽管目前最理想的检验数据是传统的无线电探空资料，但是探空站点也存在一定的局限性，如分布不均匀，观测频次较低，站点数量较少，尤其是海洋、山地和极区等地，可能会带来较大的系统性误差。选择再分析资料作为检验数据的原因是格点均匀分布，与掩星观测的时空匹配样本较多，且有效值的高度较高，可以从不同角度反映掩星观测廓线的探测情况。

ECMWF再分析资料与GNOS掩星观测资料的时间差设定为 $\pm 1h$ ，将再分析资料插值到时间匹配后的掩星廓线的空间位置上，利用温湿压数据计算折射率变量，再将再分析资料的折射率和掩星观测的折射率廓线统一垂直插值到以200m为间隔的0~50km高度范围内，最后计算两者之间随高度变化的折射率相对差值。

图2为GNOS折射率和COSMIC折射率与ECMWF再分析资料的平均偏差(实线)和标准偏差(正负一个标准偏差,能更形象地展示掩星数据的误差范围,虚线所示)。图中右部为样本数量在每层的分布情况。平均偏差可以反映与ECMWF再分析资料的系统误差,标准偏差可以反映掩星探测折射率的随机误差及其稳定度。图中所示,掩星折射率与ECMWF再分析资料之间总体平均偏差很小,约-0.1%,反映了掩星资料几乎无偏的特性。在2km以下两者有相对明显的负偏差,在那样的垂直范围内,掩星信号的信噪比有所降低,并且由于对流层低层湿度较大、垂直密度梯度变化明显更容易出现掩星信号多路径效应,造成掩星折射率在对流层低层的负偏差和略大的标准偏差,这与国际上的同类掩星数据在低层的精度情况类似<sup>[14]</sup>;而在35km以上,则除了掩星本身的观测误差外(信噪比低、热噪声、电离层残余影响等)<sup>[15]</sup>,还与ECMWF再分析资料在高空的误差有关。对比COSMIC与ECMWF的比较结果,在30km以下,GNOS与COSMIC在平均偏差和标准偏差方面,曲线起伏特征吻合得较好,变化值差异较小;而在30km以上,标准偏差的差异逐渐加大,这可能与GNOS在高层信号微弱处的信噪比较低有关。此外,ECMWF再分析资料中已同化了COSMIC数据<sup>[16]</sup>,两者有一定的相关性,高层大气折射率呈较小的绝对值,在相对差异的比较中相关就更加明显。

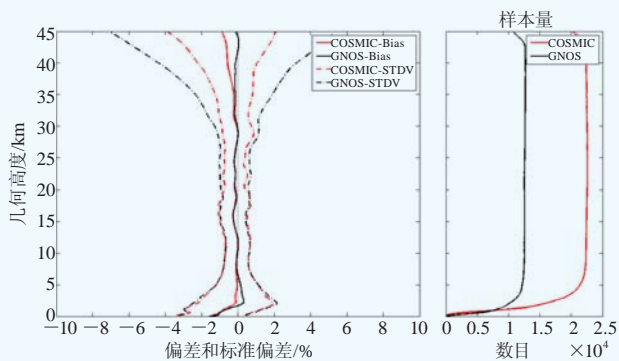


图2 GNOS和COSMIC折射率与ECMWF再分析资料比较的平均偏差、标准偏差以及参与计算的样本量

Fig. 2 The bias and standard deviation of the refractivity between GNOS and ECMWF reanalysis, and between COSMIC and ECMWF reanalysis, together with their collocated samples

总体来看,GNOS掩星探测精度最好的范围为5~25km,其标准偏差值在1%以内,这与利用再分析资料<sup>[14]</sup>或探空资料<sup>[17-18]</sup>分析CHAMP<sup>[19]</sup>或其他同类掩星数据<sup>[20]</sup>时得到的结论相同。GNOS折射率廓线与无线电探空的比较<sup>[21]</sup>,由于受空间样本的限制,平均标准

偏差略大于1%,但也在设计指标2%以内。在2km以下的垂直范围内标准偏差稍大,约2.5%,这受制于低层湿气的多路径效应,而在30km以上的垂直范围,标准偏差逐渐增大,这除了受掩星探测的误差影响外,还由于在高层折射率绝对值较小,微小的变化会被相对差异放大。总的来说,这样的垂直误差特征与同类掩星资料的验证结果类似。

除了总体的掩星精度,分纬度带的精度结果如图3所示。由于掩星事件的全球均匀分布,可以将掩星廓线按高纬度(60°—90°N, 60°—90°S)、中纬度(30°—60°N, 30°—60°S)以及低纬度(30°N—30°S)进行分析。可以看出,中高纬度的平均偏差和标准偏差差异不大,与全球平均的误差特征类似,且在5~25km的“黄金范围”标准偏差更小,约0.5%,这是由于除了在中高纬度样本量相对更多以外(受极轨卫星倾角的影响),水汽含量较少,信号受其干扰产生多路径效应的影响较小。但在低纬度则有一样的误差特点,平均偏差和标准偏差都更大,尤其是热带地区的对流层低层。此外在15~30km的垂直范围内,标准偏差和平均偏差都出现明显的“波动”特征,并在大约17km处有一个显著的右折。由上面的讨论可知,掩星探测在5~25km是探测性能最好的范围,这样的波动极有可能是ECMWF再分析资料引入的。再分析资料垂直层数有限,垂直分辨率较折射率数据来说低很多,对于对流层顶较大的垂直温度梯度,不能很细致地反映,因此在这样的垂直范围内,GNOS折射率数据与ECMWF再分析数据的对比出现较大的“波动”特征。

## 4 总结

GNOS-GPS各级反演产品已于2014年6月在卫星遥感数据服务网上向公众开放,而GNOS-BDS的业务化处理也将在后续BDS系统精密星历近实时部署完成后实现。本文在简单介绍了国际上掩星探测技术的发展情况后,对我国的首个民用掩星接收机GNOS的仪器属性以及其主要的产品反演过程进行了简要的描述。为量化地说明GNOS仪器的探测性能,以其折射率产品为检验对象,利用ECMWF再分析资料完成时空匹配后进行统计分析,结果显示,GNOS-GPS掩星折射率在5~25km有最优的探测精度,标准偏差可达1%以内,中高纬度的精度好于低纬度地区。此外,掩星探测资料由于有较高的垂直分辨率,较再分析资料更能反映对流层顶以上的垂直特征。以上掩星精度的特点与国外同类掩星数据类似,体现了GNOS掩星探测的价值,但对于风云气象卫星的首次尝试,掩星探测技术和反演方法还有待继续发展,尤其是对于

30km以上的高层，精度还有待进一步提高。

致谢：感谢ECMWF提供再分析资料和CDAAC提供COSMIC掩星数据。

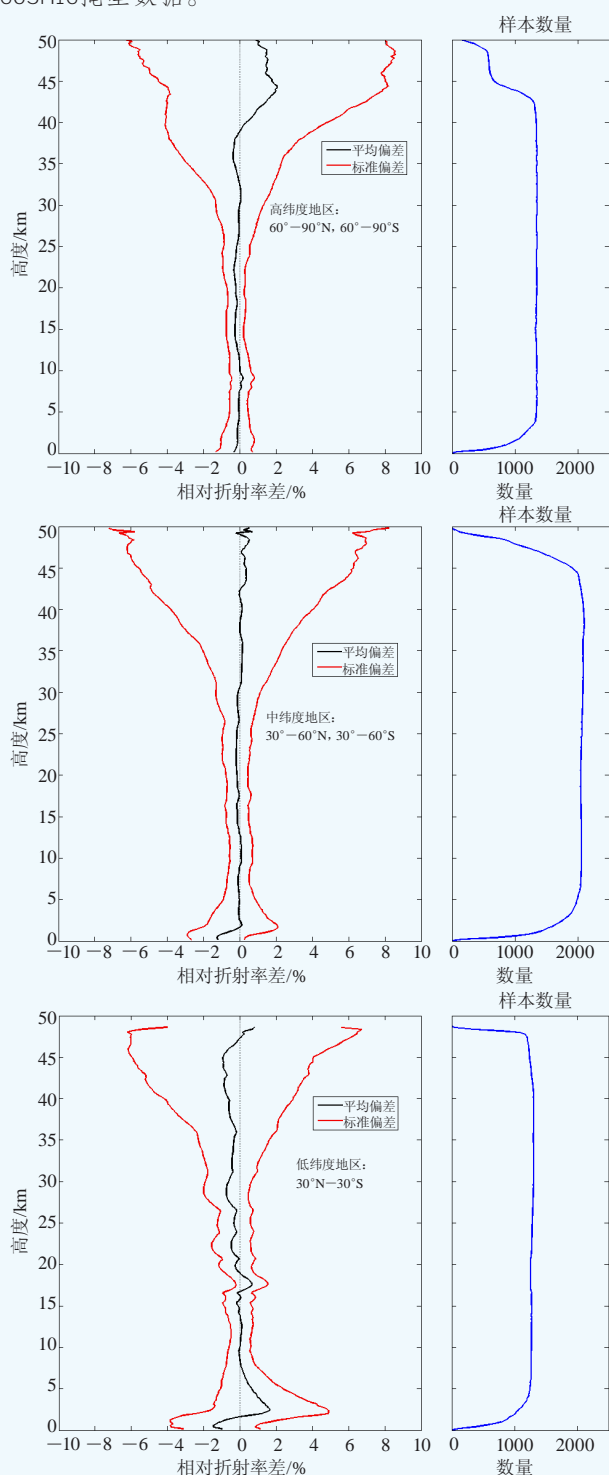


图3 GNOS折射率与ECMWF再分析资料在高、中、低纬度的平均偏差和标准偏差以及参与计算的样本量

Fig. 3 The bias and standard deviation of the refractivity between GNOS and ECMWF reanalysis in terms of high latitudes, middle latitudes and low latitudes, and together with their collocated samples

### 参考文献

- [1] Kursinski E R, 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.
- [2] Rocken C, Anthes R, Mxner M, et al. Analysis and validation of GPS/MET data in the neutral atmosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102: 29849-29866.
- [3] Kliore A J, Hamilton T W, Cain D L. Determination of some physical properties of the atmosphere of Mars from changes in the Doppler signal of a spacecraft on an earth occultation trajectory. JPL, Technical Report, 1964, 32-674.
- [4] Phinney R A, Anderson D L. On the radio occultation method for studying planetary atmospheres. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1819-1827.
- [5] Yunck T P, Liu C H, Ware R. A history of GPS sounding. *TAO*, 2000, 11: 1-20.
- [6] Anthes R A, Rocken C, Kuo Y H. Applications of COSMIC to meteorology and climate. *Terr Atmos Oceanic Sci*, 2000, 11(1): 115-156.
- [7] Kuo Y H, Sokolovskiy S V, Anthes R A, et al. Assimilation of GPS radio occultation data for numerical weather prediction. *TAO*, 2000, 11: 157-186.
- [8] Schreiner W, Sokolovskiy S, Hunt D, et al. Analysis of GPS radio occultation data from the FORMOSAT-3/COSMIC and Metop/GRAS missions at CDAAC. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 2255-2272.
- [9] Anthes R A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather. *Atmos Meas Tech*, 2011, 4: 1077-1103.
- [10] Chen X, Zou X. Postlaunch calibration and bias characterization of AMSU-A upper air sounding channels using GPS RO Data. *J Geophys Res*, 2014, 119: 3924-3941.
- [11] Bai W H, Sun Y Q, Du Q F, et al. An introduction to the FY3 GNOS instrument and mountain-top tests. *Atmos Meas Tech*, 2014, 7: 1817-1823.
- [12] Schreiner W, Rocken C. Quality assessment of COSMIC/FORMOSAT-3 GPS radio occultation data derived from single- and double-difference atmospheric excess phase processing. *GPS Solut*, 2010, 14:13-22.
- [13] 胡雄, 曾杭, 张训斌, 等. 大气GPS掩星观测反演方法. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 768-774.
- [14] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, et al. Inversion and error estimation of GPS radio occultation data. *J Meteor Soc Japan*, 2004, 82: 507-531.
- [15] Li Y, Kirchengast G, Scherllin-Pirscher B, et al. A new dynamic approach for statistical optimization of GNSS radio occultation bending angles for optimal climate monitoring utility. *J Geophys Res*, 2013, 118, doi:10.1002/2013JD020763.
- [16] Poli P, Healy S B, Dee D P. Assimilation of Global Positioning System radio occultation data in the ECMWF ERA-Interim reanalysis. *Q J R Meteor Soc*, 2010, 136: 1972-1990.
- [17] Kuo Y H, Schreiner W S, Wang J, et al. Comparison of GPS radio occultation soundings with radiosondes. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05817, doi:10.1029/2004GL021443.
- [18] Poli P, Ao C O, de la Torre Juárez M, et al. Evaluation of CHAMP radio occultation refractivity using data assimilation office analyses and radiosondes. *Geophys Res Lett*, 2003, 30 (15), 1800, doi:10.1029/2003GL017637.
- [19] Hajj G A, Ao C O, Iijima B A, et al. CHAMP and SAC-C atmospheric occultation results and intercomparisons. *J Geophys Res*, 2004, 109: D06109, doi:10.1029/2003JD003909.
- [20] 杜明斌, 杨引明, 丁金才, 等. COSMIC反演精度和相关特性的检验. *应用气象学报*, 2009, 20(5): 586-593.
- [21] 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.