

DOI: 10.13203/j.whugis20150228

文章编号: 1671-8860(2015)11-1440-06

掩星大气反演中的电离层二阶项效应的分析

安家春¹ 杜玉军¹ 屈小川² 杨 剑³

1 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉, 430079

2 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥, 230009

3 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉, 430070

摘要: 以 MSIS90 大气模型、3D NeUoG 电离层模型和 IGRF11 地磁场模型为基础, 用三维射线追踪法模拟了无线电掩星中电离层二阶项残差的变化, 研究了其在不同太阳活动强度、不同地方时、不同方位角下的变化, 以及在全球的分布特征。结果表明, 二阶项残余误差通常在亚 cm 级水平, 但在较高太阳活动水平下, 或当掩星发生地位于中低纬度地区, 掩星方位角约为 0° 或 180° 时, 二阶项残余误差可达到 cm 级, 而且在全球分布呈现出“三峰”结构。

关键词: 掩星; 电离层二阶项; 三维射线; 仿真

中图法分类号:P228.41 文献标志码:A

利用无线电掩星反演大气参数的精度受到诸多因素的影响, 主要包括卫星星历误差、钟差、地球扁率、多路径、超折射、大气水平梯度、热噪声、电离层残差等^[1], 在上述各种误差源中, 电离层误差是最主要的误差源之一^[2]。但是用于改正电离层误差的双频线性组合方法效果仍然有限。一方面是由于双频组合只能消除电离层一阶延迟项的影响, 而高阶项仍然存在; 另一方面, 电离层的“色散”特性导致不同频率射线的传播路径并不相同, 使得双频组合仍不能完全消除电离层一阶延迟项的影响。这两方面原因导致经双频改正后仍然存在电离层残余误差。在 45 km 以上, 中性大气会完全被电离层残余误差所淹没^[3]。而在太阳活动极大年, 电离层残余误差的影响更加严重, 43 km 上的温度偏差可达 1.5 K, 甚至也会影响到 25 km 上的参数反演精度^[2], 限制了掩星反演结果在大气科学应用中的应用。为监测十年尺度以上的全球气候变化趋势, 温度平均偏差甚至要优于 0.1 K^[4,5]。因此, 在无线电掩星中, 为获得高精度的大气参数剖面, 应尽可能地消除电离层误差的影响。文献[6]详细讨论了不同太阳活动下、不同纬度下的高阶电离层残差对掩星反演结果的影响, 文献[7,8]讨论了电离层残差对掩星变曲角和温度精度的影响。本文以三维射线追踪法为手

段, 重点讨论了电离层残差中的二阶项残差对反演精度的影响, 以期为无线电掩星反演中的电离层误差改正方法的研究提供参考和借鉴。

1 二阶项误差定义

基于掩星的大气反演中, 常用的电离层改正方法是附加相应的观测值形成的无电离层组合, 但仍有部分误差不能有效剔除, 如式(1)所示:

$$\Delta L_C = \rho^{\text{neu}} + \Delta s^{\text{neu}} + \Delta s^{\text{len}} + \Delta s_1 + \Delta s_2 \quad (1)$$

式中, Δs^{neu} 为双频组合的中性大气延迟误差项; Δs^{len} 为双频组合的附加射线长度; Δs_1 是不同射线路径上的 TEC 差异所导致的双频组合残余误差; $\Delta s_2 = -(q_1/f_1 - q_2/f_2)/(f_1^2 - f_2^2)$ 为电离层二阶项残余误差, 主要是由于电离层折射指数中的地磁场项所引起的双频组合的残余误差, 其中 $q_i = 1.128 \times 1.012 \times \int_{S_i} B_0 \cos\theta N_e ds$, S_i 是 L_i 的射线传播路径, B_0 是地磁场强度, N_e 是电子密度, θ 是射线传播方向与地磁场方向的夹角。 $\Delta s^{\text{neu}}, \Delta s^{\text{len}}, \Delta s_1, \Delta s_2$ 都是与电离层延迟有关的误差项。其中, $\Delta s^{\text{neu}}, \Delta s^{\text{len}}, \Delta s_1$ 主要是由电离层一阶项延迟所引起的, 故它们的和也称为电离层一阶项残余误差^[9]。本文重点关注的是 Δs_2 , 即电离

收稿日期: 2015-04-20

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41231064, 41204028); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2042014kf0266, JZ2014HGBZ0345)。

第一作者: 安家春, 博士, 讲师, 主要从事卫星导航定位及应用研究。E-mail: jean@whu.edu.cn

层二阶项残余误差。

在无线电掩星中,来自 GNSS(globwl navi-gations satellite system) 卫星的信号到达(Low Earth Orbit, LEO)卫星时要两次穿越电离层区域,如图 1 所示,第一次为从 A 点至 B 点,称为 First Ionospheric Block(FIB),第二次为从 C 点至 LEO 卫星处,称为 Second Ionospheric Block(SIB)。因此,可以将式(1)中的二阶项残余误差 Δs_2 可写为:

$$\Delta s_2 = \Delta s_2^{\text{FIB}} + \Delta s_2^{\text{SIB}} \quad (2)$$

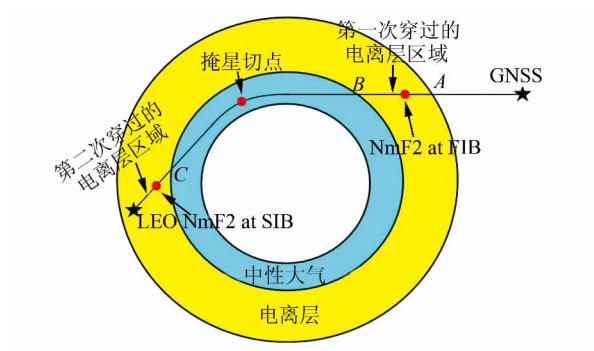


图 1 无线电掩星几何关系示意图

Fig. 1 A Schematic of the GNSS/RO Geometry

式中, $\Delta s_2^{\text{FIB}} = -(q_1^{\text{FIB}}/f_1 - q_2^{\text{FIB}}/f_2)/(f_1^2 - f_2^2)$, $\Delta s_2^{\text{SIB}} = -(q_1^{\text{SIB}}/f_1 - q_2^{\text{SIB}}/f_2)/(f_1^2 - f_2^2)$, Δs_2^{FIB} 和 Δs_2^{SIB} 分别为掩星射线经过 FIB 和 SIB 时的电离层二阶残余误差。

2 二阶项误差基本特征

电离层二阶项误差与地理位置、掩星方位角关系密切,即使在同一掩星发生地和同一太阳活动水平,来自不同方位角的掩星事件的二阶项误差也有不同的值。本文仿真了 6 个有代表性的掩星事件,并分析了在不同太阳活动水平下、地理位置和

地方时下的电离层二阶项误差的变化特征。

2.1 仿真方案

在真实的掩星环境中, Δs_2 项很难精确获得,但可通过高精度的三维射线追踪技术仿真得到。射线追踪法是基于几何光学的高频电磁波分析方法,是解决电磁波在大气中心传播问题的重要手段。在给定中性大气模型、电离层模型、地磁场模型以及 GNSS/LEO 掩星轨道的情况下,利用三维射线追踪技术可以模拟得到二阶项误差^[10]。首先,仅采用中性大气模型来模拟信号传播;其次,采用中性大气模型、电离层模型,以及地磁场模型仿真 L_i 信号的传播,得到 q_i ;将上述仿真得到的 q_i 代入式(2),即可得到电离层二阶误差项。

本文设计了 4 种仿真方案(表 1),方案 1 仅引入中性大气模型,使用的是 MSIS90 模型,这是为了仿真计算仅受中性大气影响的情况;方案 2、3 和 4 中加入了电离层模型和地磁场模型,使用的分别是 3D NeUoG 模型和 IGRF11 模型,同时,为便于对比分析太阳活动强度($F_{10.7}$ 指数)的影响, $F_{10.7}$ 指数分别设为 70、150 和 220,分别表示低、中、高三种太阳活动水平。MSIS 大气模型是 Hedin 等人^[11] 构建的一个全球性的三维大气模型,可计算得到中性大气密度和温度值,目前应用比较广泛的是 MSIS-90 模型。NeUoG 模型是由奥地利的 Graz 大学研发的三维电子密度经验模型^[12],能够计算空间上任意点在任意时刻的电子密度值,为了保证能够用于高精度的 3D 射线追踪技术,该模型也能够计算空间上连续的电子密度一阶导数。国际地磁参考模型 IGRF 是由国际地磁与高空物理联合会建立,用于描述地球磁场中大尺度的内源场分布及其长期变化的模型,可以计算从 1900 年至今地球上任意点的磁场矢量,目前最新版本是 IGRF-11^[13]。

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation Parameters Configuration

方案编号	地球形状	中性大气模型	电离层模型	地磁场模型	$F_{10.7}$ 指数
方案 1	椭球	MSIS90	—	—	—
方案 2	椭球	MSIS90	NeUoG	IGRF11	70
方案 3	椭球	MSIS90	NeUoG	IGRF11	150
方案 4	椭球	MSIS90	NeUoG	IGRF11	220

图 2 给出了在 3 种 $F_{10.7}$ 指数下,2010 年 1 月 4 日 UTC 17 时的全球 TEC 分布图。从图 2 中可以看出,在赤道附近 TEC 具有明显的双峰结构,称为电离层赤道异常,这一异常特征随着 $F_{10.7}$ 指数的增加而更加明显。表 2 给出了 6 次掩星事件发生地的 TEC 值,不同地理位置、地方时

下的 TEC 值有所差异。在同一经线上(事件 1、事件 2 和事件 6),随着纬度的增加,TEC 值变小。而在同一纬线上(事件 2、事件 3、事件 4 和事件 5),地方时为 15 h(事件 2)的掩星发生地的 TEC 值较大,而地方时为 5 h(事件 3)的掩星发生地的 TEC 值较小。当 $F_{10.7}$ 为 220 时,全球最大

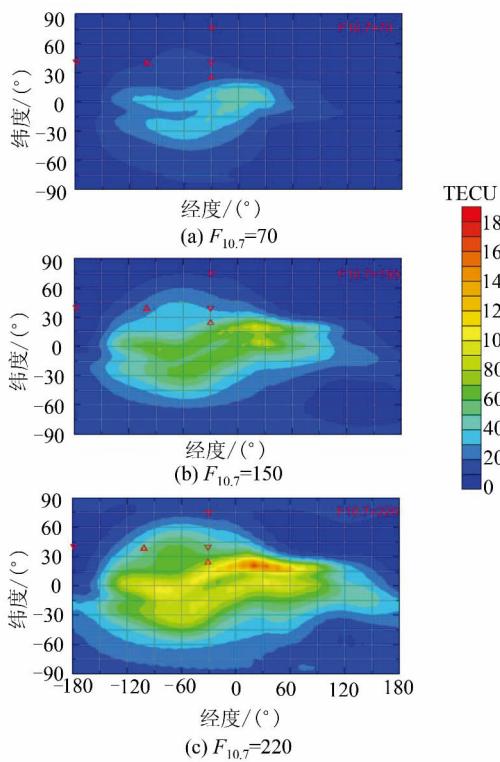


图2 2010年1月4日UTC 17h的全球TEC分布图
Fig. 2 Global TEC Map at 17h UT, on Jan. 4, 2010

TEC值约为180 TECU($1 \text{TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^3$)。

2.2 基本特征分析

图3给出了在不同太阳活动水平、地理位置

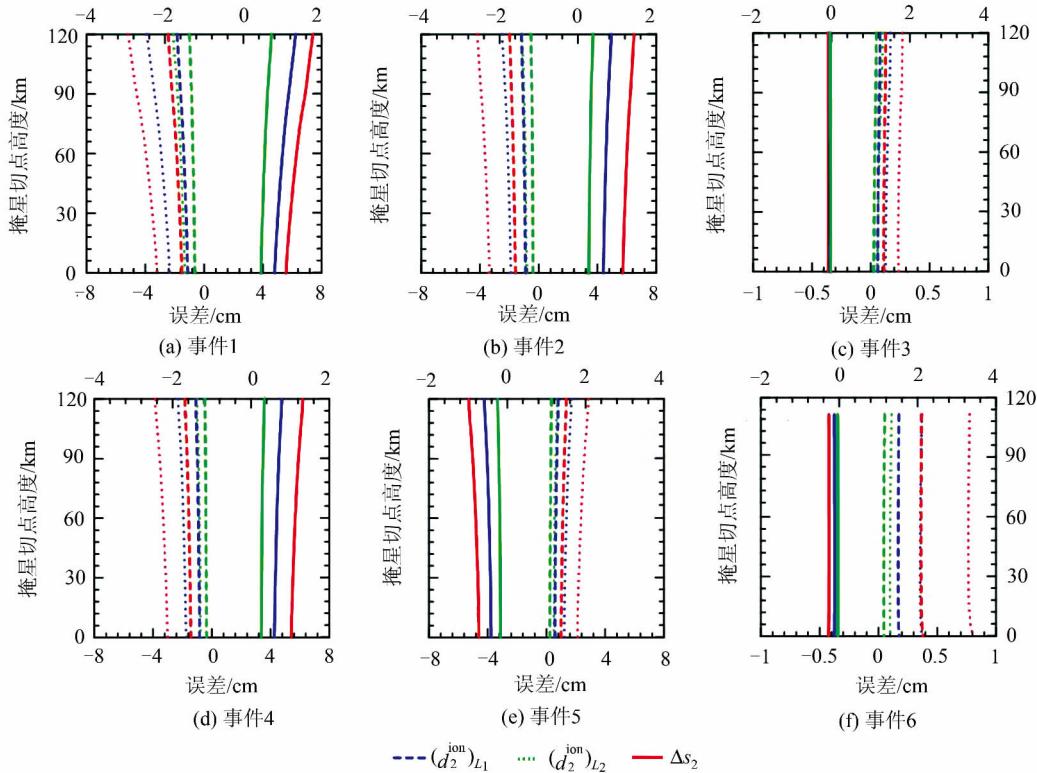


图3 6次掩星事件的电离层二阶项延迟及残余误差图
Fig. 3 Ionospheric Second Order Delay and Residual Error of 6 Occultation Events

和地方时下的电离层二阶项误差的变化特征。随着太阳活动水平的增加,各掩星事件中的误差均相应变大。事件1、2和6位于同一子午圈,具有相同的地方时,其中事件1的电离层误差最大,而事件6的误差最小,说明低纬地区的误差要大于高纬地区,主要是由于电离层电子密度以及TEC值随着纬度的升高而不断降低。事件2~5掩星事件基本位于同一纬圈上,具有不同的地方时,分别为15 h、5.1 h、10.3 h和10.3 h,其中事件3的误差最小,表明发生于夜间或清晨的掩星事件受电离层影响较小。

表3列出了0~120 km内电离层二阶误差项绝对值的最大数值。二阶项延迟 $(d_2^{\text{ion}})_{L_1}$ 和 $(d_2^{\text{ion}})_{L_2}$ 数值很小,即使在 $F_{10.7} = 220$ 时,其最大值也不过几个cm,远低于电离层一阶项延迟。如事件1的 $(d_2^{\text{ion}})_{L_1}$ 和 $(d_2^{\text{ion}})_{L_2}$ 最大值分别仅为-2.4 cm和-5.2 cm。但在中高层大气上,电离层二阶项延迟要大于中性大气延迟误差。经双频线性组合后,只是部分二阶项延迟被消除了,依然有不低于70%(Δs_2 占 $(d_2^{\text{ion}})_{L_1}$ 的比例)的残余误差 Δs_2 存在。当太阳活动水平较低时($F_{10.7}$ 为70和150), Δs_2 基本在亚cm级水平,但当太阳活动水平较高时($F_{10.7} = 220$), Δs_2 可能达到cm级,比如事件2的 Δs_2 最大值约为1.4 cm。而当掩星发生在中

表 2 6 次掩星事件的基本信息

Tab. 2 Summary of 6 Selected Occultation Events

掩星 编号	纬度/ (°)	经度/ (°)	方位角/ (°)	地方时/h	事件 类型	TEC		
						$F_{10.7}=70$	$F_{10.7}=70$	$F_{10.7}=70$
事件 1	24.943	-30.124	2.874	15	上升	16.727	41.344	72.696
事件 2	38.532	-30.050	20.346	15	下降	11.395	28.965	52.587
事件 3	39.264	-178.376	148.236	5.1	下降	2.907	3.447	3.759
事件 4	39.119	-100.637	341.599	10.3	上升	10.157	26.118	46.916
事件 5	39.702	-100.689	213.842	10.3	上升	10.035	25.794	46.33
事件 6	74.013	-29.273	136.888	15	下降	3.872	7.995	13.39

表 3 0~120 km 之间电离层二阶项误差的最大值

Tab. 3 The Maximum of Ionospheric Second Order Error Between 0~120 km

	$F_{10.7}=70$			$F_{10.7}=150$			$F_{10.7}=220$		
	$(d_2^{\text{ion}})_{L_1}/\text{cm}$	$(d_2^{\text{ion}})_{L_2}/\text{cm}$	$\Delta s_2/\text{cm}$	$(d_2^{\text{ion}})_{L_1}/\text{cm}$	$(d_2^{\text{ion}})_{L_2}/\text{cm}$	$\Delta s_2/\text{cm}$	$(d_2^{\text{ion}})_{L_1}/\text{cm}$	$(d_2^{\text{ion}})_{L_2}/\text{cm}$	$\Delta s_2/\text{cm}$
事件 1	-1.0	-2.1	0.7	-1.8	-3.9	1.3	-2.4	-5.2	1.8
事件 2	-0.5	-1.1	0.4	-1.2	-2.5	0.9	-2.0	-4.2	1.4
事件 3	0.0	0.1	-0.0	0.1	0.2	-0.1	0.1	0.3	-0.1
事件 4	-0.5	-1.0	0.3	-1.1	-2.3	0.8	-1.8	-3.9	1.3
事件 5	0.3	0.7	-0.2	0.8	1.7	-0.6	1.4	2.9	-1.0
事件 6	0.0	0.1	-0.0	0.2	0.4	-0.1	0.4	0.8	-0.3

低纬度地区,且掩星方位角约为 0°或 180°时, Δs_2 也可能达到 cm 级,如 $F_{10.7}=150$ 时,事件 1 的 Δs_2 最大值约为 1.3 cm。此外,比较图 3 中事件 4、5 的二阶项误差,不仅它们的二阶项延迟的正负号相反,而且它们的残余误差 Δs_2 的正负号也相反。从上述分析中可知,二阶项残余误差 Δs_2 的正负号则取决于掩星方位角以及掩星发生地的位置。

结合图 3 和表 3 可以发现,二阶项残余误差 Δs_2 通常在亚 cm 级水平,但在较高太阳活动水平下,或当掩星发生地位于中低纬度地区,且掩星方位角约为 0°或 180°时,可达到 cm 级。

3 二阶项误差全球分布特征

为了更清楚地理解电离层二阶项误差 Δs_2 与地理位置,以及掩星方位角之间的变化关系,这里进一步仿真了掩星方位角为 0°时全球分布的掩星事件,并计算了相应的全球二阶项误差分布。

3.1 仿真方案

本文首先仿真了一组发生于同一地点,但掩星方位角不同的掩星事件的 GNSS 和 LEO 卫星轨道。为了便于简单处理,这里所仿真的掩星事件的 GNSS 和 LEO 卫星轨道共面,且 GNSS 和 LEO 卫星均为圆轨道,其轨道高度分别为 20 000 km 和 800 km。地球则视为半径 6 371.004 km 的球体。这些掩星事件的经纬度间隔分别为 10°和 5°,则共有 1 332 次事件。

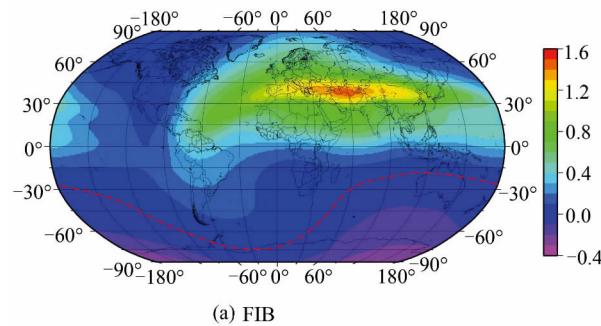
根据所仿真的 GNSS/LEO 掩星轨道,并采用与 § 2.1 同样的仿真步骤来模拟附加相位观测值和电离层二阶项延迟,仿真参数设置见表 1 中的方案 1 和方案 3。此时可以得到不受电离层影响的真正的附加相位观测值 ρ^{neu} 及 q_i^{FIB} 和 q_i^{SIB} 等项。再通过式(2)即可得到 FIB 和 SIB 二阶残余误差项 Δs_2^{FIB} 、 Δs_2^{SIB} 及 Δs_2 。

3.2 全球分布特征分析

图 4 给出了掩星方位角为 0°时 60 km 上的全球 FIB 和 SIB 二阶项误差,其中红色折线表示 FIB 或 SIB 二阶项误差为零。从图中可以明显看出,当掩星方位角为 0°时(即掩星射线从南向北传播),FIB 二阶项误差在北半球以及南半球的大部分地区都为正值,而 SIB 二阶项误差则相反,在南半球以及北半球的大部分地区都为正值。正如 § 2.2, FIB 和 SIB 误差的正负性与 F_2 层峰值高度处的 $\cos\theta$ 的正负性有关。另外,由于电离层赤道异常现象,以及周日变化特征(地方时 14~16 h 电子密度达到最大)的影响,FIB 和 SIB 的二阶项误差具有明显的峰值现象,其中 FIB 误差具有“单峰”结构,而 SIB 误差具有“双峰”结构。

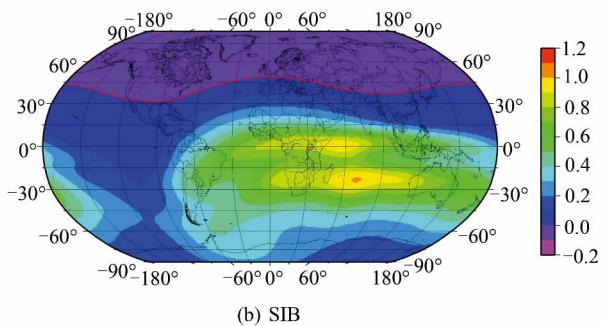
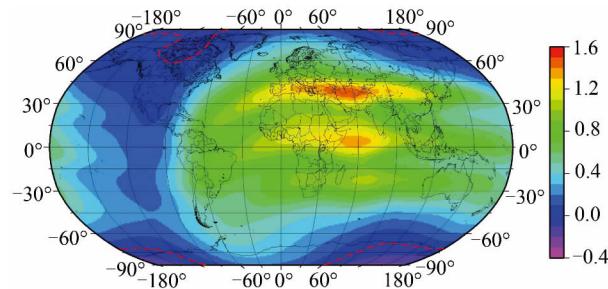
图 5 为掩星方位角为 0°时全球掩星事件 60 km 处的电离层二阶项误差 Δs_2 分布图。当 FIB 和 SIB 具有相同正负号时,则误差会变大;而当两者符号相反时,则误差会变小。鉴于图 4 中 FIB 和 SIB 二阶项误差的正负特征,除了部分高纬地区的二阶项误差 Δs_2 为负值外(图 5 中红色虚线),图 5 中的全球绝大部分地区的二阶项误差

Δs_2 都为正值。由此类推,当掩星方位角为 180° 时,全球绝大部分地区的二阶项误差 Δs_2 都为负值。由于地磁场方向大致是自南向北指向的,故



(a) FIB

一般情况下全球绝大部分地区的二阶项误差 Δs_2 的最大正值和负值约分别位于掩星方位角 0° 和 180° ,因此本文选择 0° 进行仿真。

图4 掩星方位角为 0° 时全球掩星事件 60 km 处 FIB 和 SIB 的二阶项误差Fig. 4 Global FIB and SIB Error Map at 0° Azimuth and the Altitude of 60 km图5 掩星方位角为 0° 时全球掩星事件 60 km 处的总的二阶项残余误差Fig. 5 Global Second Order Ionospheric Residual Error Map at 0° Azimuth and the Altitude of 60 km

鉴于图4中 FIB 误差的“单峰”结构和 SIB 误差的“双峰”结构,故图5中的全球二阶项误差 Δs_2 具有“三峰”结构特征,约分别位于 $30^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ 、 $0^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$ 以及 $15^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{S}$ 之间,虽然第三个“峰”结构并不是很明显。事实上可进一步类推,在掩星方位角为 0° 情况下,若电离层赤道异常中的“南峰”显著大于“北峰”,那么 FIB 二阶项误差中将会出现“双峰”结构,而 SIB 误差则仅有“单峰”结构,总的电离层二阶项误差 Δs_2 依然会具有“三峰”结构。从图5中可以看出,在中等太阳活动水平下($F_{10.7} = 150$),当掩星方位角为 0° 时,上述二阶项误差 Δs_2 “三峰”结构的数值大小约在 $1.2 \sim 1.6$ cm 左右。

4 结语

本文以 MSIS90 大气模型、3D NeUoG 电离层模型和 IGRF11 地磁场模型为大气背景,用三维射线追踪法模拟了无线电掩星中电离层二阶项残差的变化。结果表明,二阶项残差通常在

亚 cm 级水平,但在较高太阳活动水平下,或当掩星发生地位于中低纬度地区,且掩星方位角约为 0° 或 180° 时,可达到 cm 级。二阶项误差在全球分布呈现出“三峰”结构,在掩星方位角为 0° 时三个峰值分别位于 $30^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ 、 $0^\circ\text{N} \sim 15^\circ\text{N}$ 以及 $15^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{S}$ 之间。因此,在掩星数据处理中,需要加强电离层监测并有效剔除电离层二阶项的干扰。另一方面,本文是用仿真手段对电离层二阶项的初步探索,主要是选取了少量有代表性的掩星事件和 0° 方位角时的全球掩星事件,未来的工作需要引入更准确的大气、电离层、地磁场等模型,需要选取更多掩星事件进行广泛、综合的分析,从而全面、深入地认识掩星大气反演中电离层二阶项。

参 考 文 献

- [1] Melbourne W G, Davis E S, Duncan C B, et al. The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring [R]. Jet Propulsion Laboratory, California, 1994
- [2] Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. Observing Earth's Atmosphere with Radio Occultation Measurement Use Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 120(D19): 23 429-23 465
- [3] Hocke K. Inversion of GPS Meteorology Data [J]. *Annales Geophysicae*, 1997, 15 (4):443-450
- [4] Steiner A K, Kirchengast G, Foelsche U, et al. GNSS Occultation Sounding for Climate Monitoring [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Parts A)*, 2001, 26 (3):113-124
- [5] Mannucci A J, Ao C O, Pi X, et al. The Impact of

- Large Scale Ionospheric Structure on Radio Occultation Retrievals [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4 (12): 2 837-2 850
- [6] Vergados P, Pagiatakis S D. Latitudinal, Solar, and Vertical Variability of Higher-Order Ionospheric Effects on Atmospheric Parameter Retrievals from Radio Occultation Measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(A9), doi:10.1029/2011ja016573
- [7] Liu Congliang, Kirchengast G, Zhang Kefei, et al. The Effects of Residual Ionospheric Errors on GPS Radio Occultation Temperature [J]. *Chinese J Geophysics*, 2014, 57 (8): 2 404-2 414 (柳聰亮, Kirchengast G, Zhang Kefei, 等. 电离层残差对掩星反演温度精度的影响[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2 404-2 414)
- [8] Liu Congliang, Zhang Kefei, Tan Zhixiang, et al. The Effects of Ionospheric Disturbances on the Accuracy of GPS Radio Occultation Bending Angle and Temperature [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(11): 1 334-1 339(柳聰亮, Zhang Kefei, 谭志祥, 等. 电离层干扰对 GPS 掩星弯曲角和温度精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(11): 1 334-1 339)
- [9] Syndergaard S. On the Ionosphere Calibration in GPS Radio Occultation Measurements [J]. *Radio Science*, 2000, 35(3): 865-884
- [10] Qu Xiaochuan. Research on Characteristics and Correction Methods of Ionospheric Error in GNSS Radio Occultation [D]. Wuhan : Wuhan University, 2014(屈小川. GNSS 无线电掩星的电离层误差特性及改正方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2014)
- [11] Hedin A E. Extension of the MSIS Thermosphere Model into the Middle and Lower Atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(A2): 1 159-1 172
- [12] Leitinger R, Titheridge J E, Kirchengast G, et al. A "Simple" Global Empirical Model for the F Layer of the Ionosphere [J]. *Kleinheubacher Berichte*, 1996, 39: 697-704
- [13] Finlay C C, Maus S, Beggan C D. International Geomagnetic Reference Field: The Eleventh Generation [J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1 216-1 230

Analysis of Second Order Ionospheric Effects on Atmospheric Parameters Estimation in Radio Occultation

AN Jiachun¹ DU Yujun¹ QU Xiaochuan² YANG Jian³

1 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

3 School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: In the study of atmospheric inversion based on radio occultation, the residual ionospheric errors have great influence on the accuracy and the second order errors are not ignorable. In this paper, MSIS90 atmospheric model, 3D NeUoG ionospheric model and IGRF11 geomagnetic model are all collected, and 3D ray tracing method was used to simulate the changes of the second order residual ionospheric errors in radio occultation. Under different solar activities, local time, azimuth, the second order errors were analyzed, especially for its global distribution. The results show that second order errors are usually in sub-centimeter level, but up to centimeter level under higher solar activity or in middle and low latitudes at 0° or 180° azimuth, and illustrate the structure of “three-peak” in globe. Therefore, in the occultation data process, the ionospheric monitoring must be strengthened and second order ionospheric errors must be eliminated effectively.

Key words: occultation; second order residual ionospheric errors; ray tracing; simulation

First author: AN Jiachun, PhD, lecturer, specializes in satellite navigation positioning and application. E-mail: jcan@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41204028, 41231064; the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Nos. 2042014kf0266, JZ2014HGBZ0345.