

附加相位延迟到弯曲角反演过程中的误差传递模型^{* 1}

王也英¹ 符 养² 杜晓勇² 严 卫³

WANG Yeying¹ FU Yang² DU Xiaoyong² YAN Wei³

1. 解放军 61741 部队, 北京, 100081

2. 北京应用气象研究所, 北京, 100029

3. 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101

1. No. 61741 of PLA, Beijing 100081, China

2. Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China

3. Institute of Meteorology, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China

2008-07-16 收稿, 2009-03-11 改回.

Wang Yeying, Fu Yang, Du Xiaoyong, Yan Wei. 2010. An error propagation model during the retrieval process of excess phase delay to bending angle. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(4):514-519

Abstract In order to study the error propagation process of the Global Navigation Satellite System (GNSS) radio occultation, the impact of random errors of excess phase delay on the retrieved bending angle were deduced theoretically during the retrieval process of excess phase delay to bending angle in this work. Under the condition of precise orbit determination with the GPS and Low Earth Orbit (LEO) satellites, the impact of orbit error on the retrieval results is neglected with the orbit parameters as constants, and the impact of the random errors $\delta\Delta L$ of excess phase delay ΔL on the retrieved bending angle α 's errors $\delta\alpha$ is considered in this paper. Meanwhile, the End-to-end GNSS Performance Simulator (EGOPS) simulation software is employed to simulate the data of atmospheric excess phase delay and, the Challenging Microsatellite Payload (CHAMP) real orbit data, MSIS-90 atmospheric model and full 3D ray tracing program are used in the Forward Model with one occultation event selected to validate the error propagation model. The research results show that the change of excess phase delay is able to cause the corresponding bending angle errors. The random errors of 5 cm, 1 cm and 1 mm are set to the excess phase delay and then the bending angles are retrieved with the result that the corresponding bending angle errors are less than ± 0.2 mrad, ± 40 μ rad and ± 4 μ rad, respectively. For the purpose of statistical analysis, 20 occultation events were selected randomly on which we figured out the corresponding bending angles mean bias caused by the excess phase delay with 1 cm random error set. It is slightly larger than the error from case studies, but entirely consistent with the model with the retrieval bending angle errors within ± 40 μ rad. Based on such statistical analyses accuracy of the model suggested in this paper is validated.

Key words Excess phase delay, Bending angle, Error, Model

摘 要 为了研究全球卫星导航定位系统无线电掩星探测中的误差传递过程, 文中讨论了掩星探测中附加相位延迟到弯曲角的反演过程中, 附加相位延迟随机误差对反演弯曲角误差的影响。在对全球卫星导航定位系统和低轨道卫星进行精密定轨的情况下, 忽略轨道误差对反演结果的影响, 将轨道参数视为常数, 考虑附加相位延迟 ΔL 存在随机误差 $\delta\Delta L$ 时对反演弯曲角 α 带来的弯曲角误差 $\delta\alpha$ 。利用 EGOPS 仿真软件, 采用数值模拟的方法模拟了无电离层影响的大气附加相位延迟数据, 利用 CHAMP 真实轨道数据, MSIS-90 大气模型和全三维射线追踪器进行前向建模, 从中选取了一个掩星事件对误差传递模型进行了验证。结果表明: 附加相位延迟的变化会给弯曲角的反演带来相应的误差: 当随机误差为 5 cm 左右时, 反演的弯曲角误差在 ± 0.2 mrad 范围内; 当随机误差为 1 cm 左右时, 反演的弯曲角误差在 ± 40 μ rad 范围内; 当随机误差为 1 mm 左右时, 反演的弯曲角误差在 ± 4 μ rad 范围内。最后从模拟的掩星事件中随机抽取了 20 个掩星事件进行统计分析, 给出了 20 个掩

* 作者简介: 王也英, 主要从事无线电掩星研究。E-mail: bjwangyy@yahoo.com.cn

星事件存在 1 cm 附加相位延迟测量误差引起弯曲角误差的均值误差,其误差特性虽略大于个例研究结果,但与模型完全吻合,反演的弯曲角误差也在 $\pm 40 \mu\text{rad}$ 范围内,进一步验证了模型的准确性。

关键词 附加相位延迟,弯曲角,误差,模型

中图法分类号 P405

1 引言

GNSS(Global Navigation Satellite System)是全球卫星导航定位系统的简称。由于美国的 GPS(Global Positioning System,全球定位系统)是现在最成功的卫星导航系统,也是目前在掩星探测中主要运用的系统,人们常把 GNSS 掩星探测称为 GPS 掩星探测。以 GPS 卫星为例,当 GPS 卫星发出的微波信号穿过地球大气到达 LEO(Low Earth Orbit)卫星时,发生掩星事件(图 1, Syndergaard, 1999)。

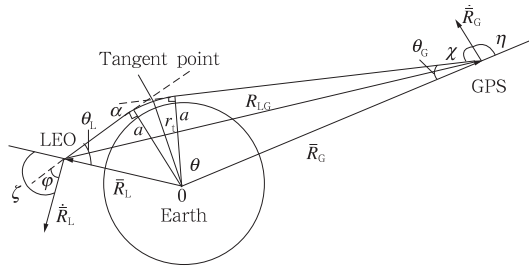


图 1 掩星事件瞬间几何关系 (Syndergaard, 1999)

Fig. 1 An instant geometry relationship of radio occultation event (from Syndergaard, 1999)

$\bar{R}_L, \bar{R}_G$: 折射中心到 LEO 卫星和 GPS 卫星的矢量;

$\dot{\bar{R}}_L, \dot{\bar{R}}_G$: LEO 卫星和 GPS 卫星的速度在掩星平面上的投影;

a : 射线路径的碰撞参数,即折射中心到入射与出射信号路径的渐近线中的任意一条的垂直距离;

φ : 信号入射方向与 $\dot{\bar{R}}_L$ 的夹角;

χ : 信号出射方向与 $\dot{\bar{R}}_G$ 的夹角;

α : 大气总弯曲角;

ζ : $\bar{R}_L$ 与 $\dot{\bar{R}}_L$ 之间的夹角;

η : $\bar{R}_G$ 与 $\dot{\bar{R}}_G$ 之间的夹角;

θ : GPS 与 LEO 卫星相对于折射中心的位置矢量之间的夹角;

θ_L : $\bar{R}_L$ 与信号入射方向之间的夹角;

θ_G : $\bar{R}_G$ 与信号出射方向之间的夹角;

R_{LG} : LEO 卫星与 GPS 卫星之间的几何距离;

r_1 : 近地点向径,即射线路径地点相对于折射中心的几何距离。

对于 GPS 和 LEO 卫星在精密轨道的情况下,它们的轨道精度分别为厘米级和分米级,LEO 卫星轨道经过优化后也可以达到厘米级。Kirchengast (1998)研究了不同星历误差影响时发现,位置误差等于 50 m 时,对于干空气的反演已经没有影响;对于速度误差为 0.05 mm/s 时,反演折射率、压力和温度误差的相对误差在 40 km 以下小于 0.1%。王也英等(2008)利用数值模拟的方法研究发现,在精密轨道确定(POD)存在 ± 0.05 mm/s 速度误差时,在 30 km 以下给温度反演带来的误差小于 0.1 K。这些研究结果表明,在精密轨道情况下,轨道误差对大气参数反演结果的影响可以忽略不计。因此,文中将轨道参数视为常数,考虑附加相位延迟 ΔL 存在随机误差 $\delta\Delta L$ 时,对反演弯曲角 α 带来的弯曲角误差 $\delta\alpha$ 进行了误差传递公式的推导,并利用数值模拟的方法对模型进行了验证,给出了数值模拟结果。

2 误差传递公式推导

基于掩星事件瞬间几何关系(图 1),以下推导附加相位延迟 ΔL 存在随机误差 $\delta\Delta L$ 时对反演弯曲角的影响。

由于地球大气层的作用,每次采样中两个频率的 GPS 载波都有附加相位的延迟 (Syndergaard, 1999):

$$\Delta L_i = L_i - R_{LG} = \int n_i ds - R_{LG} \quad (1)$$

$$\Delta L_i - L_i + R_{LG} = 0 \quad (2)$$

式中: $\Delta L_i (i=1,2)$ 为载波 L_1 与 L_2 的附加相位延迟; $L_i (i=1,2)$ 为接收机载波相位路径,即信号经过的等效光学路径长度; R_{LG} 为 LEO 卫星与 GPS 卫星之间的几何距离; $n_i (i=1,2)$ 是 L_1 与 L_2 的折射率,等式右边第一项是 L_1 与 L_2 的折射率在信号路径上的积分。

将式(2)对时间求导:

$$\Delta \dot{L}_i + \dot{R}_{LG} - \dot{L}_i = 0 \quad (3)$$

式中: $\Delta \dot{L}_i (i=1,2)$ 为附加相位延迟对时间的导数, 称附加多普勒; $\dot{L}_i (i=1,2)$ 是 f_1 和 f_2 载波相位路径对时间的导数, 与多普勒频移的关系为 (Syndergaard, 1999)

$$\dot{L}_i = \frac{dL}{dt} = c \cdot \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (i=1,2) \quad (4)$$

式中 Δf_i 是 f_i 的多普勒频移, 即信号接收频率相对于发射频率的变化。

由多普勒频移与卫星速度的关系可以得到 (Syndergaard, 1999):

$$\dot{L} = \left(\left| \dot{\bar{R}}_L \right| \cos \varphi(a) - \left| \dot{\bar{R}}_G \right| \cos \chi(a) \right) \quad (5)$$

式中: $\dot{\bar{R}}_L$ 和 $\dot{\bar{R}}_G$ 分别为 LEO 卫星和 GPS 卫星的速度在掩星平面上的投影; φ 为信号入射方向与 $\dot{\bar{R}}_L$ 的夹角; χ 为信号出射方向与 $\dot{\bar{R}}_G$ 的夹角。

当式(3)中省略代表两个不同频率的下标时, 将式(5)代入式(3)得到等价于多普勒观测方程 (Syndergaard, 1999):

$$\Delta \dot{L} + \dot{R}_{LG} - \left(\left| \dot{\bar{R}}_L \right| \cos \varphi(a) - \left| \dot{\bar{R}}_G \right| \cos \chi(a) \right) = 0 \quad (6)$$

在以上几何关系的基础上, 推导附加相位延迟存在的随机误差对反演弯曲角影响的误差传递模型。

(1) 求附加相位延迟 ΔL 对碰撞参数 a 带来的误差 δa 。

由式(6)对碰撞参数 a 求导得:

$$d\Delta \dot{L} = \left(\left| \dot{\bar{R}}_G \right| \sin \chi(a) \cdot \chi'(a) - \left| \dot{\bar{R}}_L \right| \sin \varphi(a) \cdot \varphi'(a) \right) da \quad (7)$$

因为 (Syndergaard, 1999):

$$\varphi(a) = \zeta - \theta_L = \zeta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right) \quad (8)$$

$$\chi(a) = \pi - \eta - \theta_G = \pi - \eta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right) \quad (9)$$

式中 ζ 为 $\bar{R}_L$ 与 $\dot{\bar{R}}_L$ 之间的夹角; θ_L 为 $\bar{R}_L$ 与信号入射方向之间的夹角; θ_G 为 $\bar{R}_G$ 与信号出射方向之间的夹角; η 为 $\bar{R}_G$ 与 $\dot{\bar{R}}_G$ 之间的夹角。

对式(8)、(9)求导得

$$\varphi'(a) = \left(\zeta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right) \right)' = -\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)^2}} \quad (10)$$

$$\chi'(a) = \left(\pi - \eta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right) \right)' = -\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)^2}} \quad (11)$$

将式(10)、(11)代入式(7)得

$$d\Delta \dot{L} = \left[\left| \dot{\bar{R}}_L \right| \sin \varphi(a) \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)^2}} \frac{1}{|\bar{R}_L|} - \left| \dot{\bar{R}}_G \right| \sin \chi(a) \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)^2}} \frac{1}{|\bar{R}_G|} \right] da \quad (12)$$

对式(12)进行整理得

$$da = \left[\frac{\left| \dot{\bar{R}}_L \sin \varphi(a) \right|}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} - \frac{\left| \dot{\bar{R}}_G \sin \chi(a) \right|}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right]^{-1} d\Delta \dot{L} \quad (13)$$

式(13)反映了附加相位延迟存在随机误差 $\delta \Delta L$ 时对碰撞参数 a 带来的误差 δa , 即

$$\delta a = \left[\frac{\left| \dot{\bar{R}}_L \sin \varphi(a) \right|}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} - \frac{\left| \dot{\bar{R}}_G \sin \chi(a) \right|}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right]^{-1} \frac{d(\delta \Delta L)}{dt} \quad (14)$$

(2) 求碰撞参数 a 的误差 δa 对弯曲角 α 带来的误差 $\delta \alpha$ 。

由于 (Syndergaard, 1999):

$$\alpha = \theta - \arccos\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right) - \arccos\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right) \quad (15)$$

将式(15)对碰撞参数 a 求导得

$$d\alpha = \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)^2}} \cdot \frac{1}{|\bar{R}_L|} + \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)^2}} \cdot \frac{1}{|\bar{R}_G|} \right] da \quad (16)$$

对式(16)进行整理得

$$d\alpha = \left[\frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} + \frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right] da \quad (17)$$

对应于碰撞参数 a 的误差 δa 对弯曲角 α 带来的误差 $\delta \alpha$, 即为

$$\delta\alpha = \left[\frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} + \frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right] \delta a \quad (18)$$

(3) 求附加相位延迟 ΔL 存在随机误差 $\delta\Delta L$ 时反演弯曲角 α 的相应误差 $\delta\alpha$ 。

由式(14)与式(18)可以得

$$\delta\alpha = \frac{\left[\frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} + \frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right] d(\delta\Delta L)}{\left[\frac{|\dot{\bar{R}}_L| \sin\varphi(a)}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} + \frac{|\dot{\bar{R}}_G| \sin\chi(a)}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right]} \quad (19)$$

低地球轨道卫星 Microlab-1 和 CHAMP 都为近圆轨道,所以 GPS 卫星和 LEO 卫星在假定为圆形轨道的情况下

$$\eta \approx \zeta \approx 90^\circ \quad (20)$$

因为

$$\sin(\varphi(a)) = \sin\left(\zeta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)\right) \quad (21)$$

$$\sin(\chi(a)) = \sin\left(\pi - \eta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)\right) \quad (22)$$

所以由式(20)和(21)得到

$$\begin{aligned} \sin(\varphi(a)) &= \sin\left(\zeta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)\right) \approx \\ \cos\left(\arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)\right) &= \sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_L|}\right)^2} \end{aligned} \quad (23)$$

同理,由式(20)和(22)得到

$$\begin{aligned} \sin(\chi(a)) &= \sin\left(\pi - \eta - \arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)\right) \approx \\ \cos\left(\arcsin\left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)\right) &= \sqrt{1 - \left(\frac{a}{|\bar{R}_G|}\right)^2} \end{aligned} \quad (24)$$

将式(23)和(24)代入式(19)中,简化后得到

$$\delta\alpha = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_L|^2 - a^2}} + \frac{1}{\sqrt{|\bar{R}_G|^2 - a^2}} \right) d(\delta\Delta L)}{\left(\frac{|\dot{\bar{R}}_L|}{|\bar{R}_L|} + \frac{|\dot{\bar{R}}_G|}{|\bar{R}_G|} \right)} \quad (25)$$

地球平均半径 $R_{\text{Earth}} = 6370$ km, GPS 卫星和 CHAMP 卫星的平均轨道高度分别为 20200 和 454 km,则 $|\bar{R}_G| \approx 26570$ km, $|\bar{R}_L| \approx 6824$ km。对于地球表面以上 0—90 km 高度的射线, $a_0 \approx 6370$ —6460 km。

当 GPS 卫星和 LEO 卫星发生掩星事件时,考虑它们的速度分量都在同一个平面内的简化情况,

则

$$\dot{\bar{R}}_L = \bar{V}_L \quad \dot{\bar{R}}_G = \bar{V}_G \quad (26)$$

式中 $\bar{V}_L$ 、 $\bar{V}_G$ 分别是 LEO 卫星和 GPS 卫星的速度。

根据开普勒第三定律,卫星的角速度为

$$n = \left(\frac{GM}{a_s^3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

式中 GM 为地球引力常数和地球质量的乘积,其值为 3.986×10^5 (km³/s³); a_s 为卫星轨道的长半轴长度,对于圆形轨道即为卫星的轨道半径。

卫星的线速度与角速度的关系为

$$|\bar{V}| = n \cdot |\bar{R}| \quad (28)$$

式中 $|\bar{V}|$ 为卫星的线速度, $|\bar{R}|$ 为卫星轨道半径,将 CHAMP 卫星和 GPS 卫星的平均轨道半径代入式(26)和(28)分别得到

$$\begin{aligned} \left| \frac{\dot{\bar{R}}_L}{|\bar{R}_L|} \right| &\approx 7.64 \text{ km/s} \\ \left| \frac{\dot{\bar{R}}_G}{|\bar{R}_G|} \right| &\approx 3.87 \text{ km/s} \end{aligned} \quad (29)$$

将式(29)与 $|\bar{R}_G|$ 、 $|\bar{R}_L|$ 的近似值代入式(25),当射线距离地面高度为 90 km、对应 $a = 6460$ km 时,则 $\delta\alpha \approx 0.43\delta\Delta L \text{ km}^{-1}$;当射线距离地面高度为 1 km、对应 $a = 6371$ km 时,则 $\delta\alpha \approx 0.38\delta\Delta L \text{ km}^{-1}$ 。

我们选择最新发射的 METOP 卫星和 COSMIC 卫星轨道,轨道高度分别为 817 和 800 km,对应卫星的线速度均为 $\left| \frac{\dot{\bar{R}}_{\text{L(METOP, COSMIC)}}}{|\bar{R}_{\text{L(METOP, COSMIC)}}|} \right| \approx 7.45 \text{ km/s}$,当射线距离地面高度为 90 km、对应 $a = 6460$ km 时,则 $\delta\alpha \approx 0.40\delta\Delta L \text{ km}^{-1}$;当射线距离地面高度为 1 km、对应 $a = 6371$ km 时,则 $\delta\alpha \approx 0.38\delta\Delta L \text{ km}^{-1}$ 。由以上数据可以看出:反演弯曲角误差 $\delta\alpha$ 与附加相位延迟随机误差 $\delta\Delta L$ 之比值系数的变化不大,并且低轨卫星的轨道高度越高,系数的变化越小,越趋于稳定,因此可以在整个掩星事件过程中,将系数视为常数,即

$$\delta\alpha \approx 0.4\delta\Delta L \text{ km}^{-1} \quad (30)$$

3 个例数值模拟

为验证误差传递公式(30)的正确性,利用 EGOPS(End-to-end GNSS Performance Simulator)软件模拟了 CHAMP 卫星轨道 2002 年 3 月 23 日第 30 号掩星事件,并随机抽取了当天发生的 20 个掩星事件进行统计平均。利用 EGOPS 的前向模型系统模拟了无电离层影响的大气附加相位延迟数

据,采用 MSIS-90 大气模型,利用全三维射线追踪器进行前向模拟(袁招洪,2005),建立中性大气附加相位延迟数据(Kirchengast, et al, 1998, 2002a, 2002b)。在随后的观测系统模型中,对附加相位延迟序列的观测值 ΔL_i 分别加上 5 cm、1 cm 和 1 mm 的随机误差,最后反演得到带有误差的弯曲角序列。

图 2 给出了附加相位延迟序列的测量值增加 5 cm 随机误差的弯曲角反演结果,其中 α_1 为模拟数据反演得到的弯曲角序列,MSIS-90 大气模型计算的弯曲角用 α_{Model} 表示,利用式(30)计算得到的改正数加上模拟数据反演得到的弯曲角序列用 α_2 表示;同时,图中还给出了 $\alpha_{\text{Model}} + 0.2 \text{ mrad}$ 和 $\alpha_{\text{Model}} - 0.2 \text{ mrad}$ 两条曲线,有误差的弯曲角廓线基本上被这两条曲线所包围。并且 α_1 和 α_2 非常接近,说明了式(30)的正确性。

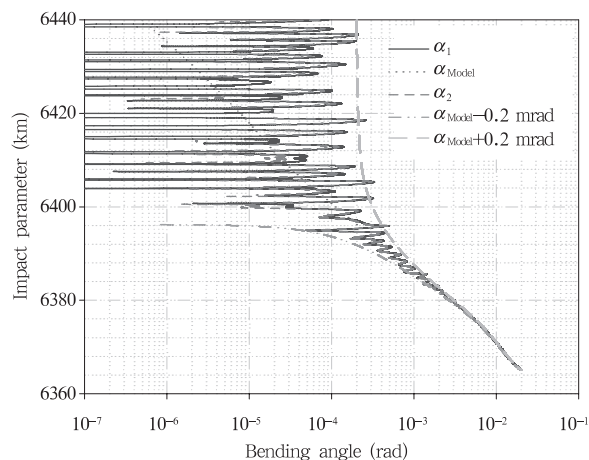


图 2 附加相位延迟序列加 5 cm 随机误差的弯曲角反演结果

Fig. 2 Bending angle retrieval results in the case of 5 cm random errors set to the excess phase delay sequence

对附加相位延迟序列的观测值加上 1 cm 的随机误差后,得到的弯曲角序列(图 3)。图 3 中曲线性质与图 2 很相似,由于附加相位延迟序列的观测值加的是 1 cm 的随机误差,两条表现相应弯曲角廓线误差范围的曲线分别改为: $\alpha_{\text{Model}} + 40 \mu\text{rad}$ 和 $\alpha_{\text{Model}} - 40 \mu\text{rad}$ 。

对附加相位延迟序列的观测值加上 1 mm 的随机误差后,得到弯曲角序列(图 4),图 4 中曲线性质与图 2 和图 3 都很相似,由于附加相位延迟序列的

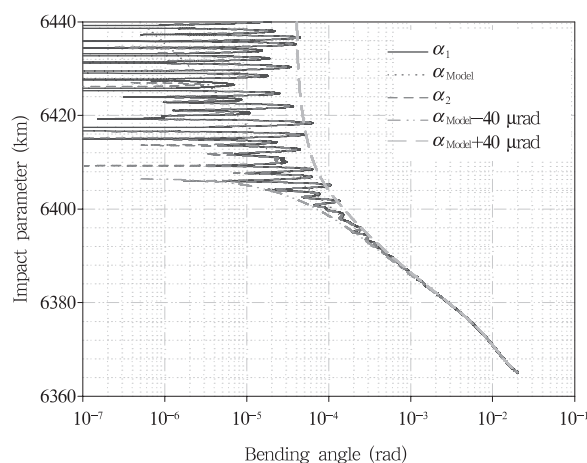


图 3 附加相位延迟序列加 1 cm 随机误差的弯曲角反演结果

Fig. 3 As in Fig. 2 but for 1 cm errors set

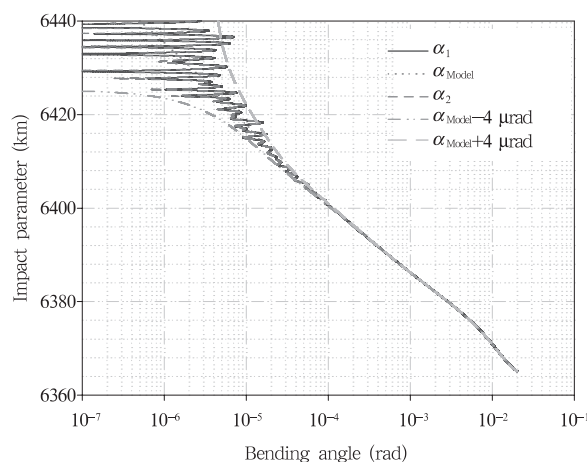


图 4 附加相位延迟序列加 1 mm 随机误差的弯曲角反演结果

Fig. 4 As in Fig. 2 but for 1 mm errors set

观测值加的是 1 mm 的随机误差,两条表现弯曲角廓线误差范围的曲线分别改为: $\alpha_{\text{Model}} + 4 \mu\text{rad}$ 和 $\alpha_{\text{Model}} - 4 \mu\text{rad}$ 。

为了更为直观地了解附加相位延迟序列存在不同随机误差情况(5 cm、1 cm、1 mm)引起弯曲角误差的大小及其随高度的变化特点,直接给出了不同附加相位延迟测量误差带来的弯曲角误差。同时模拟了 20 个掩星事件用于统计,给出了 20 个掩星事件存在 1 cm 附加相位延迟测量误差引起弯曲角误差的均值误差(图 5)。

从图 5 中我们可以看出,整体误差小于 $0.2 \mu\text{rad}$,20 个掩星事件存在 1 cm 附加相位延迟测

量误差引起弯曲角误差的均值误差,略大于单个掩星事件反演弯曲角的误差范围,误差小于 $0.1 \mu\text{rad}$ 。主要原因可能是由于忽略地球扁率影响,大气层的非球对称等原因引起。从总体上看,误差随高度变化并不明显,误差最大值出现在对流层底部。

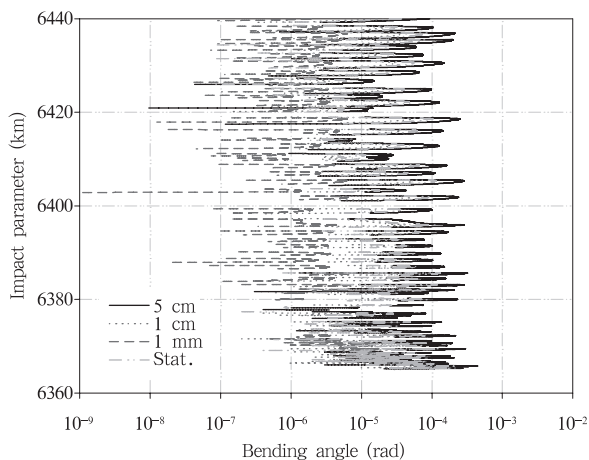


图5 弯曲角误差及统计值

Fig. 5 Bending angle errors and its statistics

4 结 论

本文主要讨论无线电掩星探测在附加相位延迟到弯曲角的反演过程中,附加相位延迟观测序列中的随机误差对反演弯曲角的误差影响。基于掩星事件瞬间几何关系,在对 GPS 卫星和 LEO 卫星进行精密定轨、忽略轨道误差对反演结果的影响和将轨道参数视为常数的情况下,考虑附加相位延迟 ΔL 存在随机误差 $\delta\Delta L$ 时对反演弯曲角 α 带来的弯曲角误差 $\delta\alpha$ 。通过误差传递公式的推导得到 $\delta\alpha \approx 0.4 \delta\Delta L$ (km^{-1}) 关系模型。最后,利用个例数值模拟的方法对其进行验证,结果表明:附加相位延迟的变化会给弯曲角的反演带来相应的误差:即当附加相位延迟观测序列存在随机误差为 5 cm 时,反演的弯曲

角误差在 $\pm 0.2 \text{ mrad}$ 范围内;当随机误差为 1 cm 时,反演的弯曲角误差在 $\pm 40 \mu\text{rad}$ 范围内;当随机误差为 1 mm 时,反演的弯曲角误差在 $\pm 4 \mu\text{rad}$ 范围内。

本文讨论的误差传播,是基于掩星事件发生瞬间的几何关系,但实际情况并非如此,而是要复杂得多。如:地球扁率的存在、大气非球对称等。Kursinski 等(1997),Syndergaard(1999)都对掩星大气探测过程中存在的各类误差源进行了全面系统介绍,并从不同的角度对各类误差源进行了定量的分析。讨论存在多种误差源条件下的掩星探测误差传递模型,将是下一步研究工作的重点。

参考文献

- 王也英,杜晓勇,符养等. 2008. 掩星接收机误差对大气温度反演精度影响仿真研究. 气象学报, 66(1):101-110
- 袁招洪. 2005. GPS 可降水量资料应用于 MM5 模式的变分同化试验. 气象学报, 63(4):391-404
- Kirchengast G. 1998. Orbit quality requirements for spaceborne atmospheric sounding using GNSS[R], presented at the EGS XXIII General Assembly, 20-24. April, Nice, France
- Kirchengast G. 1998. End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator overview and exemplary applications. Wissenschaftl. Ber. Graz, Austria
- Kirchengast G, Fritzer J, Ramsauer J. 2002a. End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator Version 4 (EGOPS4) Software User Manual (Overview). Graz, Austria, 2002
- Kirchengast G, Fritzer J, Ramsauer J. 2002b. End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator Version 4 (EGOPS4) Software User Manual (Reference Manual). Graz, Austria
- Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J I, et al. 1997. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. J Geophys Res, 102: 23429-23465
- Syndergaard S. 1999. Retrieval analysis and methodologies in atmospheric limb sounding using the GNSS radio occultation technique. Copenhagen, Denmark