

# 掩星接收机误差对大气温度反演精度影响仿真研究<sup>\*1</sup>

王也英<sup>1,2,3</sup> 杜晓勇<sup>2,4</sup> 符 养<sup>2</sup> 林龙福<sup>2</sup> 严 卫<sup>1</sup>  
WANG Yeying<sup>1,2,3</sup> DU Xiaoyong<sup>2,4</sup> FU Yang<sup>2</sup> LIN Longfu<sup>2</sup> YAN Wei<sup>1</sup>

1. 解放军理工大学气象学院, 南京, 211101
2. 北京应用气象研究所, 北京, 100029
3. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京, 100080
4. 北京大学物理学院, 北京, 100871

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

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

3. *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*

4. *Dept. of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*

2006-12-04 收稿, 2007-03-13 改回.

**Wang Yeying, Du Xiaoyong, Fu Yang, Lin Longfu, Yan Wei. 2008. Temperature retrieval deviation affected by occultation receiver errors using simulation method. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(1):101–110**

**Abstract** In order to evaluate the influences on the radio occultation sounding accuracy affected by occultation receiver errors, we employ the EGOPS simulation software to evaluate the influences on the temperature, refractivity, density and pressure profiles retrieval by occultation receiver noises respectively, which include the doppler biases and drifts, clock stability/single-differencing, receiver thermal noise and multipath. METOP and GPS constellation are selected as LEO satellite and transmit system respectively, and GRAS antenna is setting in the simulation process. From the 567 simulated occultation events, one rising and one setting occultation events are tested in the simulation. The results show that the maximum temperature deviation is reached to 2 K due to the influence of the Doppler bias, 0.3 K due to the influence of the Doppler shift, 3 K due to the influence of the Clock stability/single-differencing, over 4 K due to the influence of the receiver thermal noise and 1.5 K due to the influence of the multipath respectively. It can be seen that the worst situation for temperature retrieval is near the stratopause. The major error sources are the impact of the Receiver thermal noise, Clock stability/single differencing and POD-induced Doppler biases. For the purpose of statistical analysis, thirty occultation events are accounted to calculate the temperature retrieval deviation with the ECMWF data. We find that the average deviation of temperature reach 1 K at 45 km height, and the standard bias reach its maximum at stratopause with the value of about 5 K, while the maximum deviation is 5 K at stratopause. Through the simulation and inversion processing, the results we have been achieved are validated.

**Key words** Occultation receiver, EGOPS software, Errors, Simulation

**摘 要** 为了评估掩星接收机误差对无线电掩星探测精度的影响, 利用 EGOPS 软件仿真研究了多普勒偏差、多普勒频移、时钟稳定性/单差分、接收机噪声和局部多路径等对 GNSS 无线电掩星反演大气温度、折射率、密度、压力廓线的影响。模拟设计过程中选择 METOP 作为接收的 LEO 卫星, GPS 星座作为发射系统, 设置 GRAS 天线。从模拟的 567 个掩星事件中选择一个上升掩星事件和一个下降掩星事件进行模拟分析。研究结果表明: 对于设置的“最差”情况, 温度误差最大值大部分出现在平流层顶附近, 其中多普勒偏差引起的温度误差最大值接近 2 K, 多普勒频移引起的温度误差最大值小于 0.3 K, 时钟稳定性/单差分引起的温度误差最大值接近 3 K, 现实接收机噪声引起的温度误差最大值超过了 4 K, 局部多路径引起的温度误差最大值小于 1.5 K。经讨论分析认为: 对于高质量的无线电掩星反演, 掩星接收机误差源中最主要的是接收机热噪声、时钟

\* 作者简介: 王也英, 主要从事无线电掩星和气象雷达研究. E-mail: bjwangyy@yahoo.com.cn

稳定性/单差分和多普勒偏差。文中还随机选取了 30 个掩星事件进行统计分析,将其温度反演结果与 ECMWF 分析场数据比较得出,温度误差的平均偏差在 45 km 高度上最大,约为 1 K;最大标准偏差出现在平流层顶,约为 5 K,这验证了廓线反演算法的有效性,表明了误差分析结果的正确性和普遍性。

**关键词** 掩星接收机,EGOPS 软件,误差,仿真

**中图法分类号** P414

## 1 引言

全球导航卫星系统(GNSS, Global Navigation Satellite System)掩星观测是在低地球轨道(LEO, Low Earth Orbit)卫星上安装 GNSS 掩星接收机,临边接收 GNSS 卫星导航信号,反演大气参数廓线。接收机性能参数对掩星反演结果有直接影响,在接收机诸参数中,哪些参数对掩星反演结果影响较大,影响究竟有多大是人们关心的问题。本文利用 EGOPS(End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator)软件进行了这方面的探索。

Ramsauer 和 Kirchengast(2001)利用 EGOPS 对 GNSS 掩星数据反演大气廓线对仪器误差的敏感性进行了研究,其研究所选择的两个掩星事件都位于北半球 ECMWF 的高精度分析区域,且两个掩星事件的空间跨度相对较小,并利用 ECMWF 格点数据作为初始场,其廓线反演精度较高,给分析的结果带来了一些偶然性,使研究的结果偏小。本文在南北半球分别选取的一个上升掩星事件和一个下降掩星事件,仿真研究 GNSS 掩星接收机误差对 GNSS 掩星反演大气参数的影响,在此基础上,还在一天发生的掩星事件中随机选取了 30 个掩星事件进行统计验证分析,减少了研究结果的偶然性,使结果更具有普遍性。

## 2 EGOPS 软件简介

EGOPS 软件(Kirchengast, et al., 1998, 2002a, 2002b)包括 5 个大系统和 4 个输入模块,前 4 个系统各结合一个输入模块。前 4 个系统为:任务分析/设计系统(MAnPl: Mission Analysis/Planning)、前向模型系统(FoMod: Forward Modeling)、观测模型系统(OSMod: Observation System Modeling)和掩星数据反演系统(InRet: Occ. Data Inversion/Retrieval),组成了 EGOPS 系统的计算核心;最后一个系统为可视化/验证系统(Visualization/Validation),主要用于后处理和验证前 4

个系统的计算结果,并以方便的形式(如图形、动画等)提供给使用者。

### (1) 任务分析/设计系统

任务分析/设计系统(MAnPl)所考虑的是对单颗 LEO 卫星或 LEO 卫星星座所携带的 GNSS 掩星接收机进行分析和设计,包括天线视域的设计、分析、评估和研究,并优化掩星事件的覆盖范围以及一些相关的统计。该系统包括如下参数输入:模拟数据类型的选择(掩星数据或反射数据)、模拟时间、高度层、时间步长(只用于反射数据的计算)、地理区域、GNSS-LEO 反射路径的处理、地球模型、掩星/反射天线的型式、LEO 轨道传播、GNSS 轨道传播等。

### (2) 前向模型系统

前向模型系统(FoMod)和随后的观测系统模型一起执行半现实的模拟观测。主要观测量是时间延迟相位和幅度的测量,在“现实世界”是通过 GNSS 和 LEO 卫星的轨道运动,上升/下降通过地球大气时,利用 LEO 卫星上的 GNSS 大气探测接收机(GRAS)追踪 GNSS 掩星信号。该模型本身表示模拟 GNSS 信号传播经过大气层/电离层系统给出 GNSS 和 LEO 卫星的轨道运动。其结果称为“理想”信号,因为它只包含大气层/电离层介质的影响。“理想”意味着信号刚刚进入接收机天线并在接收机系统发生衰减之前的一种状态。

前向模型系统包括如下参数输入:模拟掩星事件类型、单个掩星事件理想的几何模型、现实几何模型、选择大气和电离层模型、前向模型采样频率和信号传播模拟器选择等。

### (3) 观测模型系统

观测模型系统(OSMod)和前向模型系统一起执行半现实的模拟观测。它本身表示对接收机天线和轨道数据(GNSS 和 LEO 卫星的位置和速度)叠加各类相关的物理和技术影响到观测系统(天线、接收机、平台和基准站)的“理想”信号(相位和幅度数据)。实际上这些“理想”信号数据是前向模型的输

出,这也是观测模型系统得以执行的先决条件。模式中主要的误差源包括:精确轨道确定(POD, Precise Orbit Determination)误差、天线增益模式、接收机噪声、局部多路径和差分处理/时钟精度。

观测模型系统包括如下参数输入:前向模型事件的选择、接收机采样频率、发射机信号功率、精确轨道误差模型、掩星天线描述、接收系统模拟类型。

#### (4) 掩星数据反演系统

掩星数据反演系统(InRet)处理模拟或观测的相位和幅度数据,典型的是通过多普勒频移和弯曲角获得准垂直大气的折射率、密度、压力、温度和湿度廓线。处理过程需要对电离层校正和将载波相位变换到中性大气的弯曲角廓线,变换弯曲角廓线到折射率廓线( Abel 变换),最后从折射率反演得到大气变量。在处理链的最后阶段,对对流层的大气而言,可以设定为干、湿空气反演。

掩星数据反演系统包括如下参数输入:待处理掩星数据类型、弯曲角反演描述、折射率廓线反演描述和大气廓线反演描述。

#### (5) 可视化及验证系统

可视化验证系统分别为以上介绍的4个系统提供可视化功能,分别为:通过“可视化任务分析/设计统计”(Visualize MAnPl Statistic)和“可视化地理地图”( Visualize Geographic Maps)窗口接口为任务分析设计系统提供可视化结果。通过可用的“可视化/验证”菜单窗口接口的“可视化验证廓线”选项为前向模型系统、观测模型系统和掩星数据反演系统提供可视化结果。

### 3 误差源介绍

结合本文的研究重点,对用于仿真研究的几类误差源(Kursinski, 1997a, 1997b)进行介绍,并引入相应误差源在 EGOPS 软件中采用的模型。

#### 3.1 精密轨道确定 POD 误差

卫星轨道误差是指用卫星星历表示的卫星轨道与真正轨道之间的值不符。其中, GPS 和 LEO 的位置误差对掩星测量的影响主要来自于卫星径向方向的位置误差,它会影响到每条射线路径上近地点高度的确定。而卫星速度误差的影响主要来自沿信号路径方向的速度分量和加速度分量。在 EGOPS 中,使用了“动力学 POD 误差模型”(Kinematic POD Error Model),模拟 POD 位置误差时主要考

虑 GNSS 和 LEO 位置误差, POD 速度误差通过沿线速度偏差和频移误差叠加到理想的 LEO 速度上,而 POD 引起的附加相位误差通过引入沿射线附加相位的漂移和加速度误差,利用时间将其推导到多普勒偏差和多普勒频移。沿射线速度误差(对多普勒偏差估计)和沿射线加速度误差(对多普勒频移估计)的变化相互独立。

#### 3.2 接收机噪声

接收机噪声与接收机硬件有关,有限的 GNSS 信号强度和接收机放大噪声的组合产生了随机相位的误差。EGOPS 中使用了“真实接收机性能噪声模型”(Realistic performance /noise Model),利用现实的 RMS(均方根)特性来模拟相位和幅度的测量误差。噪声模型参数包括:单边带带宽、LEO 天线噪声温度和 A/D 转换量化级数。

#### 3.3 局部多路径

当被天线附近的 LEO 卫星表面反射的信号进入卫星接收天线时,就会发生局部多路径效应。EGOPS 中使用了“正弦局部多路径模型”(Sinusoidal Multipath Model),其模拟参数包括相位误差周期、幅度和相位误差幅度的初值。

#### 3.4 时钟稳定性/单差分

一般 GPS 资料处理时通常采用差分法来消除时钟的不稳定性及 SA 造成的时钟影响。差分法包括单差、双差和三差法等。其中单差法分为接收机间单差法(一个为地面接收机,另一个为 LEO 上的接收机,也称地基单差分法)和 GPS 星间单差法(一颗为被掩的 GPS 卫星,另一颗为非掩的 GPS 卫星)两种;本文是采用差分处理时钟模型的“地基单差分”方法来研究时钟的稳定性。其模拟参数包括 LEO 时钟相对稳定度和地基链大气噪声。

### 4 模拟设计

模拟开始时间设置为 2001 年 9 月 15 日 00:00 UTC,模拟时间长度为 24 h。选择 METOP(Meteorological Operational satellite)作为接收的 LEO 卫星, GPS 星座作为发射系统。设置 GRAS(GNSS Receiver for Atmospheric Sounding)天线(掩星天线共两副,沿卫星飞行方向天线用于观测上升掩星,逆卫星飞行方向天线用于观测下降掩星)(Gobiet, et al, 2002; Foelsche, et al, 2002)。计算得到一天的掩星事件分布(图 1),共计 567 个掩星事件。

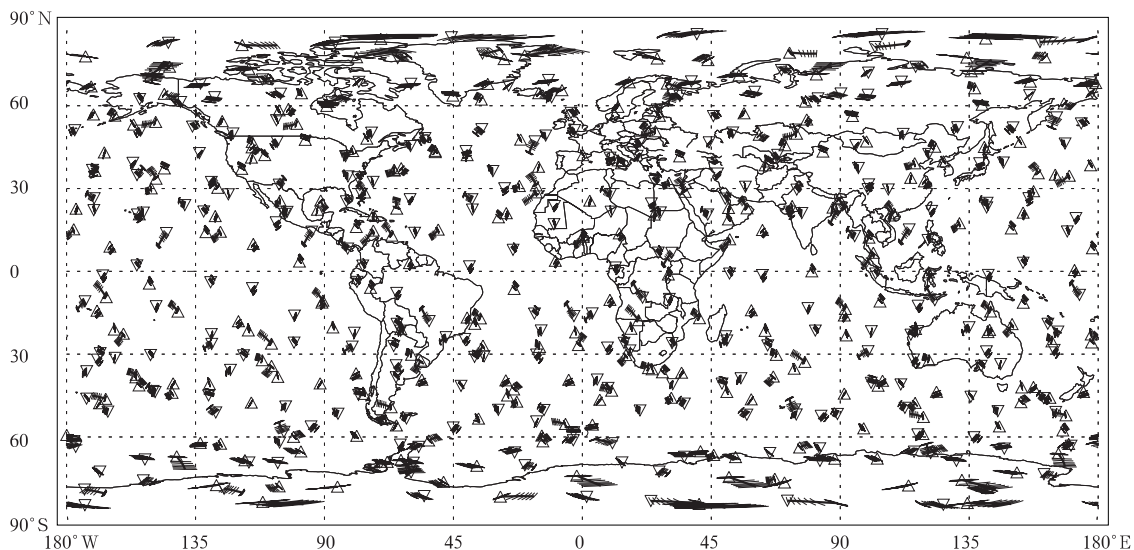


图1 全天掩星事件分布(△代表上升掩星,▽代表下降掩星)

Fig.1 Occultation events distribution for the full day

从模拟的 567 个掩星事件中选择 2 个掩星事件用于前向建模。即选择的第 22 号下降掩星位于 29°—32°N、100°E 左右。第 474 号上升掩星位于

24°—28°S、16°W 左右。

首先利用前向模型生成不含仪器误差的理想信号,采用的输入参数设置见表 1。

表 1 软件参数设置

Table 1 Software parameters setup

参数名称	参数设置
大气模型	GCM3DA <sub>tm</sub> ,并用高分辨率(T213L50)ECMWF 分析数据文件作初始场
电离层模型	NeUoG(格拉茨大学开发的 3D 电离层模型)
太阳活动指数 F10.7	219(NOAA 实测的 2001 年 9 月 15 日的太阳活动指数)
采样率	10 Hz

产生了理想的 FoMod(Forward Modeling, 前向模型)数据后,引入研究的误差。利用 EGOPS 的 OSMoD(Observation System Modeling, 观测系统模型)的功能来模拟不同类型的误差。本文模拟了

5 种不同的误差,根据 GRAS 的技术指标将所有的误差源设置为 GRAS 误差,称为“标准情况”。再利用前向模型生成“标准情况”下的掩星信号。误差模型详细设置见表 2。

表 2 理想情况和标准情况误差设置

Table 2 Ideal and standard case errors setup

误差名称	理想情况	标准情况
多普勒偏差	无多普勒偏差	沿射线速度误差:0.05 mm/s
多普勒频移	无多普勒频移	沿射线加速度误差: $0.05 \times 10^{-3}$ mm/s <sup>2</sup>
时钟稳定性/单差分	非差分/精确时钟	地基单差分,对应于最差时钟的稳定性,设为 1s Allan 偏差 $1 \times 10^{-13}$
接收机噪声	无天线噪声	单边带带宽标准值:10 Hz,LEO 天线噪声温度:150 K,A/D 转换量化级数:4
局部多路径	无局部多路径	多路径相位误差周期:300 s,多路径相位误差幅度:1 mm,相位误差幅度的初值:0 mm

## 5 仪器误差设置

分别对多普勒偏差、多普勒频移、时钟稳定性/单差分、接收机噪声和局部多路径以及 GRAS 整体

的仪器误差进行设置。在研究某一误差的影响时,其余误差项的设置仍采用表 2 的标准情况不变。模拟不同误差情况下接收机接收到的第 22 号和 474 号掩星的信号。仪器误差设置见表 3。

表 3 仪器误差参数设置  
Table 3 Instrumental parameters errors setup

误差名称	误差参数	误差参数设置
多普勒偏差	POD 沿射线速度误差	-0.3, -0.1, -0.05, 0, 0.05(标准), 0.1, 0.3[mm/s]
多普勒频移	POD 沿射线加速度误差	$-0.3 \times 10^{-3}, -0.1 \times 10^{-3}, -0.05 \times 10^{-3}, 0, 0.05 \times 10^{-3}$ (标准), $0.1 \times 10^{-3}, 0.3 \times 10^{-3}$ [mm/s <sup>2</sup> ]
时钟稳定性/单差分	地基单差分误差参数, 最差时钟稳定度	$0, 1 \times 10^{-13}$ (标准), $3 \times 10^{-13}, 1 \times 10^{-12}$ [1 sec Allan]
局部多路径	正弦多路径模型误差参数, 相位误差周期/幅度; 相位误差幅度初值	0, 300 s/(1 mm)(标准), 100 s/(1 mm) 和 100 s/(2 mm); 300 s/(1 mm) (-1 mm, 1 mm), 100 s/(2 mm) (-2 mm, 2 mm)
接收机噪声	现实性能/噪声模型误差参数, LEO 天线噪声温度和单边带带宽	150 K/(10 Hz)(标准), 150 K/(25 Hz), 250 K/(25 Hz) 和无接收机噪声。

## 6 大气参数反演

用前向模型计算得到掩星观测相位值后, 用 EGOPS 的 InRet (Inversion/Retrieval, 掩星数据反

演) 模块由相位数据处理得到多普勒频移和弯曲角, 通过 Abel 逆变换得到大气的折射率, 再利用流体静力学方程和理想大气状态方程, 计算得到大气压力、温度和密度等廓线。详细设置见表 4。

表 4 反演模块参数设置  
Table 4 Inversion modular parameters setup

参数名称	参数设置
弯曲角反演	DMI 改进电离层校正弯曲角反演, 电离层校正类型采用弯曲角校正, 使用全球弯曲角研究统计进行优化
折射率廓线反演	DMI Abel 变换大气折射率廓线反演
大气廓线反演	湿空气廓线反演, GCM 3D 大气模型作为描述参数, 并用高分辨率(T213L50)ECMWF 分析数据文件作为初始场

## 7 误差分析

限于篇幅, 本文只给出了接收机误差对反演温度廓线的影响。对每一组误差给出的是与“理想”情况的差值。

### 7.1 多普勒偏差

对于多普勒偏差引起的温度误差(图 2a、b), 最大

(POD 沿射线速度误差 -0.3 mm/s 和 0.3 mm/s) 情况: 温度误差在 10 km 以下小于 0.1 K, 向上误差逐渐增加, 在 35 km 以上时, 误差绝对值逐渐增加到大于 1 K。对于 GRAS 情况 (POD 沿射线速度误差 0.05 mm/s); 在 30 km 时温度误差小于 0.1 K, 直到平流层顶误差仍小于 0.4 K。在 30 km 附近, 6 种多普勒偏差情况下温度偏差都表现了平稳的偏离特征,

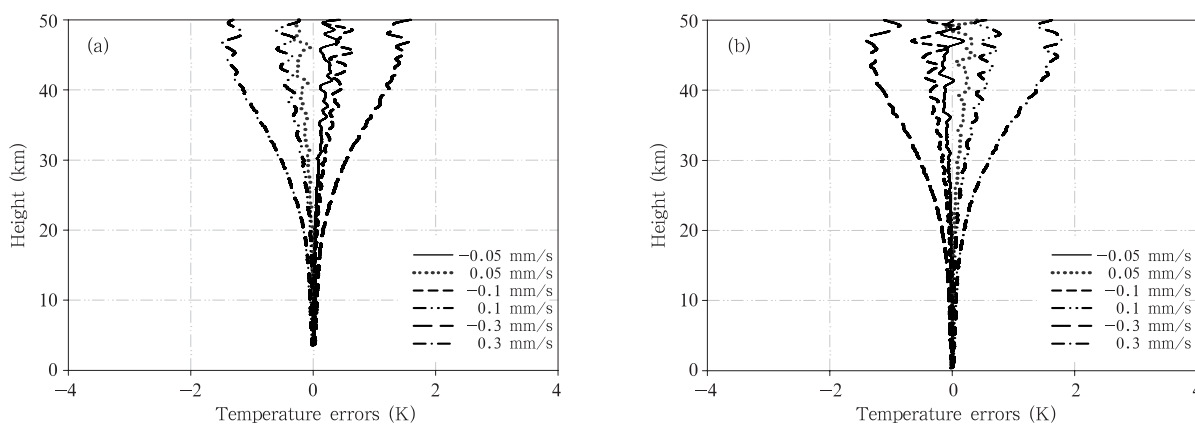


图 2 多普勒偏差引起的温度误差(a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 2 Temperature errors due to Doppler biases(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

在平流层上部温度误差曲线也呈现出明显的波动特征,这是由平流层上部的高频波动引起的。两个掩星事件相比较,第 474 号上升掩星的空间跨度较第 22 号下降掩星大,其误差幅度也要大于后者。这个结果与 Ramsauer 等(2001)的结果特性相一致,但误差在幅度上要大于其研究的结果,其主要原因是掩星事件的发生地区并不是 ECMWF 的高分辨率区域,并且掩星事件的空间跨度较其选择的掩星事件空间跨度大。

7.2 多普勒频移

多普勒频移产生温度误差(图 3)引起的 22 和 474 号两个掩星事件温度误差在 35 km 以下小于

0.1 K,其中平流层顶高度处达到最大值约为 0.4 K,同时在 30 km 以上,温度误差曲线显示出摇摆的特性,且量级非常小,不同的多普勒频移误差引起的温度误差没有明显的差别。将多普勒偏差引起的误差和多普勒频移引起的误差相对比,可以看出多普勒频移引起的误差非常小。

从图 3 同样可以看出第 474 号上升掩星误差幅度大于第 22 号下降掩星,主要还是由于掩星事件的空间跨度相差较大引起的。总体上来看,多普勒频移误差与多普勒偏差误差相比较,对于大气温度廓线反演引起的误差特别小,可以忽略。

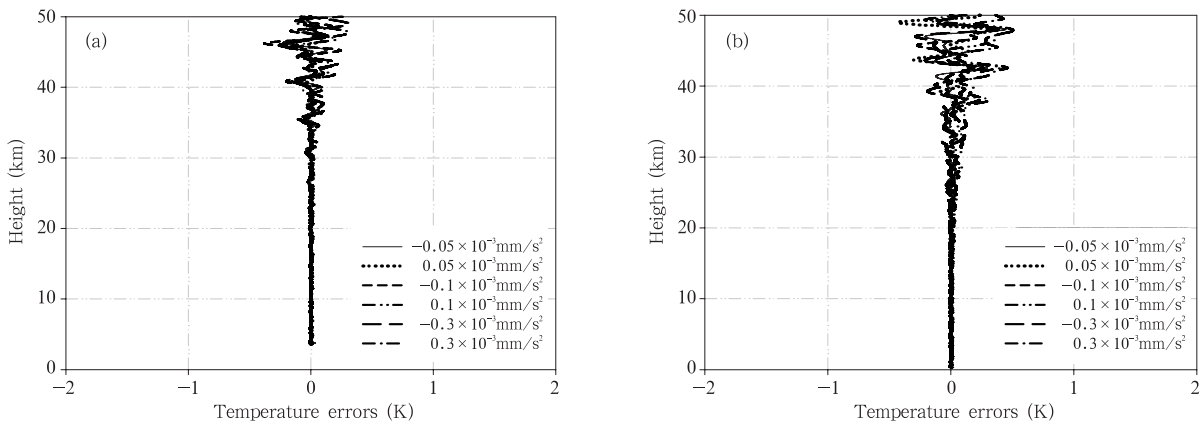


图 3 多普勒频移引起的温度误差 (a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 3 Temperature errors due to Doppler drift(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

7.3 时钟稳定性/单差分

时钟稳定性/单差分产生温度误差(图 4)引起的 22 号和 474 号两个掩星事件,在 20 km 高度以下温度误差小于 0.1 K,向上缓慢增大,对最差假

设( $1 \times 10^{-12}$  [1 sec Allan])的温度误差在 40 km 高度时达到 1 K;再向上到达平流层顶附近时,对于第 22 号下降掩星误差小于 2 K,而对于第 474 号掩星的误差却达到了一个负极值-2.8 K.误差在平流层

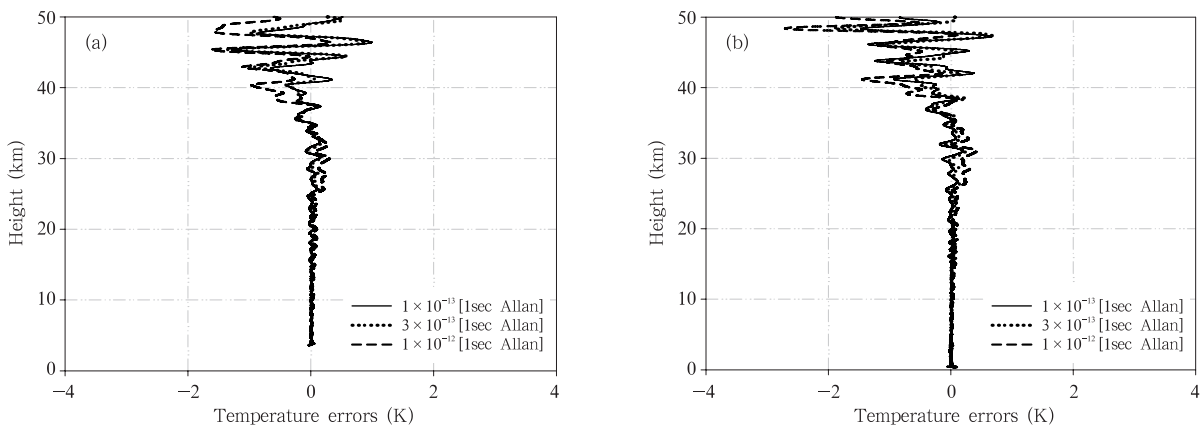


图 4 时钟稳定性/单差分引起的温度误差(a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 4 Temperature errors due to Clock Stability/Single-Differencing(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

上部的摆动特性主要是由高频的波动引起的。这个结果与 Ramsauer 等(2001)的结果相差较大,其研究结果是温度误差在 10 km 向上表现出明显的偏离特性,而本研究是在 30 km 才表现出偏离的特性,40 km 以上更为明显。这可能是由于不同背景廓线采取不同的统计优化处理引起的,还有就是与掩星的几何形状(如切点轨道)和掩星的持续时间有关。

总体来说,在整个观测系统的误差分配中,由时钟稳定性/单差分引起的误差和由多普勒偏差引起的温度误差都很主要。

### 7.4 现实接收机噪声

接收机热噪声产生的温度误差(图 5)引起 22 和 474 号两个掩星事件的温度误差,在约 30 km 以下,小于 1 K,到达 40 km 左右时,摆动的峰值约为 2 K,再向上到 50 km 左右开始超过 4 K,对于 GRAS 误差(实线),在 35 km 以下温度误差小于 1 K,超过 45 km,温度误差增大到 4 K,并且接收机噪声引起的温度误差的摆动特性更为明显。

接收机热噪声是 GRAS 观测系统引起温度反演误差中重要的因素,随着掩星技术的日益成熟,掩星接收机的设计和发展水平将朝着低系统噪声发展。

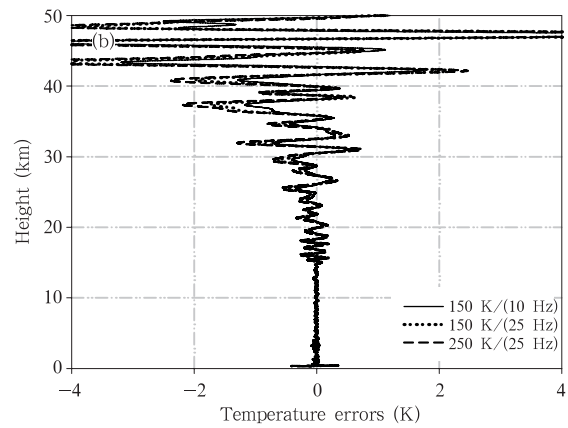
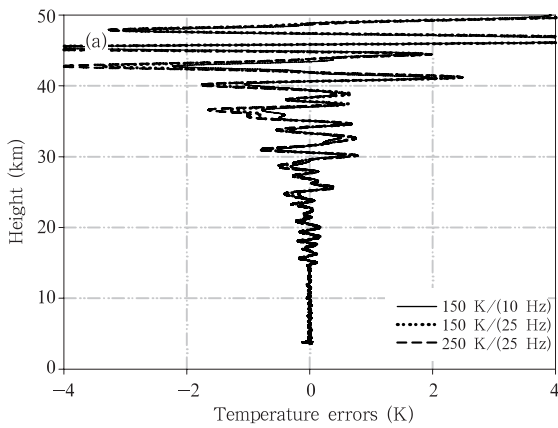


图 5 现实接收机噪声引起的温度误差 (a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 5 Temperature errors due to Realistic Noise Model(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

### 7.5 局部多路径

#### 7.5.1 局部多路径/周期和幅度

局部多路径/周期和幅度(最高射线相位误差幅

度初值为 0 mm 情况)产生温度误差(图 6)引起 22 号和 474 号两个掩星事件的温度误差在 30 km 以下很小(小于 0.2 K),在平流层上部接近平流层顶时

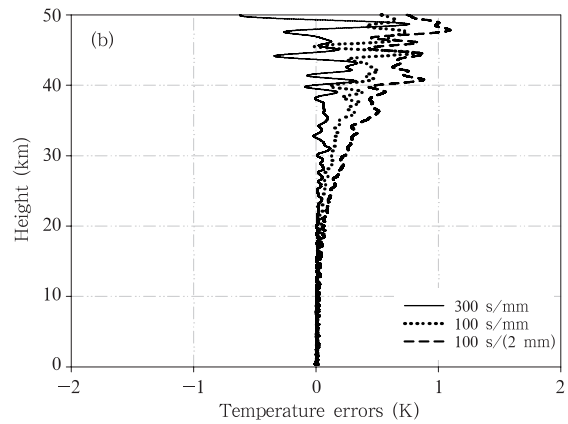
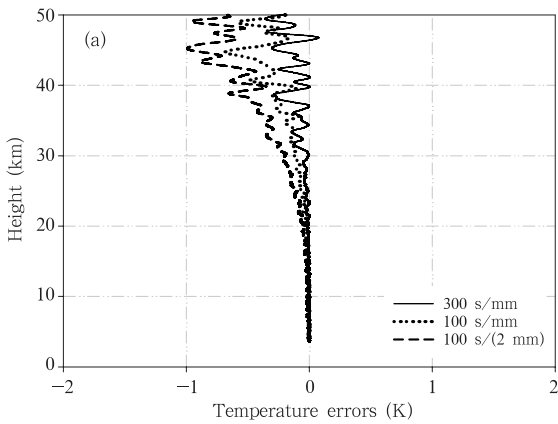


图 6 局部多路径/周期和幅度引起的温度误差

(a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 6 Temperature errors due to Local Multipath /Period and Amplitude

(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

可达到 1 K;对于 GRAS 误差(实线),直到平流层顶温度误差仍小于 0.5 K。同多普勒偏差和时钟稳定性/单差分误差引起的温度误差相比,局部多路径误差非常小,但是从结果可以清楚地看出,多路径对 GNSS 掩星接收机的影响也是非常重要的。

### 7.5.2 局部多路径/附属相位

局部多路径/附属相位(最高射线相位误差幅度初

值非零)产生温度误差(图 7)引起 22 和 474 号掩星事件的温度误差表明,局部多路径的影响明显依赖于多路径最高射线相位误差幅度初值的变化。对于 GRAS 标准情况(300 s/mm)下的温度误差,在 30 km 以下小于 0.1 K,在平流层顶附近小于 0.8 K。对于最差的情况(100 s/2 mm)下的温度误差,在 30 km 高度以下小于 0.4 K,到达平流层顶附近达到了最大值约 1.7 K。

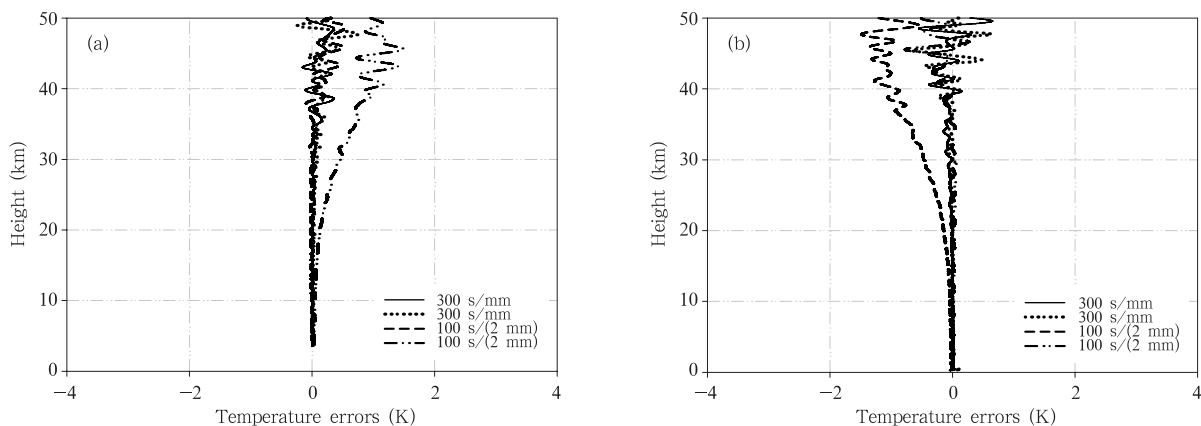


图 7 局部多路径/附属相位引起的温度误差

(a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 7 Temperature errors due to Local Multipath /Phase Dependence

(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)

局部多路径对大气温度廓线反演的影响相对较小,其误差幅度小于多普勒偏差、时钟稳定性/单差分和接收机噪声。但其在掩星探测中的影响也是不容忽视的。

### 7.6 GRAS 整体误差

GRAS 整体的温度误差(图 8)反映了 GRAS 的整体性能,误差是相对于“理想”(各类误差均设置为 0)情况所得到的,即“标准情况”减去“理想情况”。由

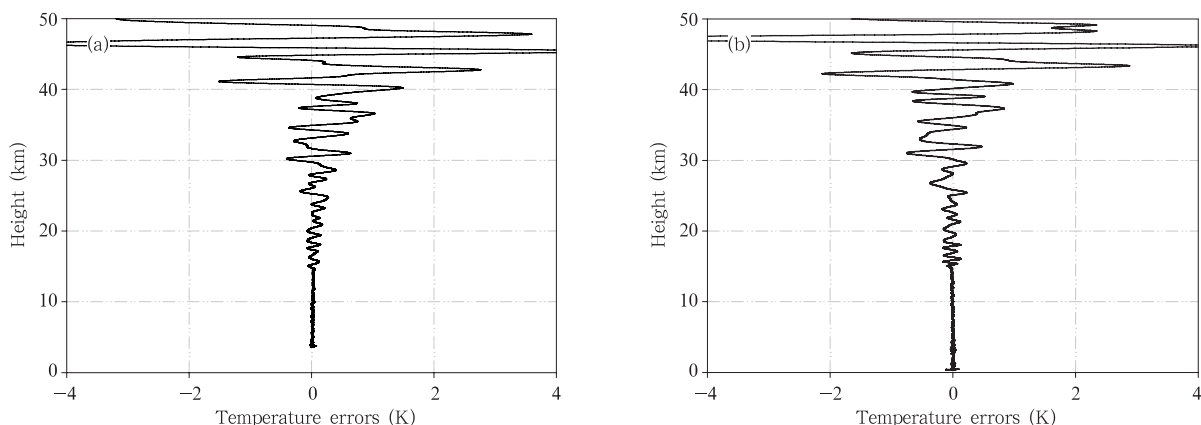


图 8 GRAS 整体的温度误差

(a. 第 22 号下降掩星, b. 第 474 号上升掩星)

Fig. 8 Total temperature errors of GRAS

(a. the 22 setting occultation, b. the 474 rising occultation)



此引起的 22 和 474 号两个掩星事件的温度误差在 30 km 以下小于 0.5 K, 从 15 km 向上到平流层顶, 曲线出现明显的摆动; 在 30—40 km, 误差达到了 1 K, 在 40 km 以上曲线摆动幅度较大; 误差峰值出现在约 48 km 高度, 误差值已经超过了 4 K, 总体来看上升掩星略大于下降掩星, 符合前面分析的结果。

## 8 抽样统计

为了验证模拟结果的正确性, 使误差分析更具有普遍性, 对模拟的全天的掩星事件进行了抽样统计, 从模拟的 567 个掩星事件中随机抽取 30 个掩星事件, 观测系统模型分别设置为“标准”和“最差”(各项参数设置误差最大) 2 种情况, 反演系统设置与第 22 号和第 474 号掩星相同。30 个抽样掩星事件的温度反演结果与 ECMWF 数据进行比较, 给出了平均偏差( $\bar{x}$ ) 和标准偏差( $\sigma_x$ ), 分别用式(1)和(2)计算

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^M x_i}{M} \quad (1)$$

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{1}{(M-1)} \sum_{i=1}^M (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

式中  $M$  为进行统计验证的掩星事件个数, 本文中  $M = 30$ ;  $\bar{x}$  为特定高度上大气参数的平均偏差;  $\sigma_x$  为差值的标准偏差。

从抽样统计的温度误差廓线(图 9)可以看出, 标准情况温度误差的平均偏差在 40 km 以下小于 0.5 K, 到 45 km 达到最大, 约为 1.5 K; 标准偏差在平流层顶附近达到最大值(约 5 K)。“最差”情况如图 9b, 温度误差的均值在 40 km 达到了 1 K, 最大值出现在约 45 km 高度上, 值小于 3 K; 标准偏差在 40 km 高度上约为 4 K, 平流层顶附近达到最大值约为 7 K, 比标准情况的温度误差约大 2 K。

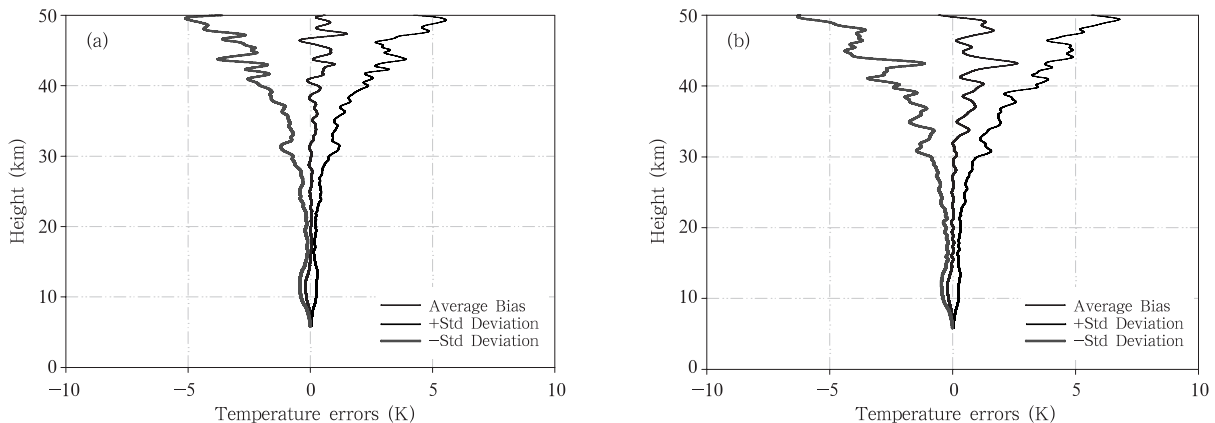


图 9 抽样统计的温度误差廓线

(a. 标准情况, b. 最差情况)

Fig. 9 Sampling Statistics Profiles of Temperature Errors

(a. Standard case, b. Bad case)

抽样统计的结果是与 ECMWF 分析场数据进行比较得出的。30 个掩星事件在“最差”情况的温度标准偏差小于 7 K, 均值小于 3 K。采用不同的方法进行抽样, 所得到的结果会在最大均值和最大标准偏差左右波动。有些掩星事件所跨经纬度较大, 那么反演结果与 ECMWF 数据进行比较时误差可能就会较大; 有些掩星事件发生在极区, 在极区 ECMWF 的数据准确度也相对较低, 也会给数据比较带来相对较大的误差。从抽样统计的结果可以看出, 廓线反演的精度是可信的, 误差分析的结果也具

有一定的代表性。

## 9 结论和展望

本文利用 EGOPS 软件对 GNSS 掩星反演大气温度廓线进行了 GRAS 误差的敏感性仿真研究。文中选用了模拟的 2001 年 9 月 15 日发生的第 22 号下降掩星事件和第 474 号上升掩星事件作为研究对象, 模拟研究了 GRAS 对多普勒偏差、多普勒频移、时钟稳定性/单差分、接收机噪声和局部多路径等误差的敏感性特征。从反演的温度廓线出发对

GRAS 误差的影响进行了较为详细的分析,并对 GRAS 整体误差进行了总结分析,最后还对模拟产生的全天的掩星事件进行了抽样统计,给出了 30 个掩星事件反演的温度廓线与 ECMWF 数据的平均偏差和标准偏差,更好地验证了廓线反演的精度以及误差分析的普遍性和有效性。

分析的结果表明:各误差源引起的误差最大值大部分出现在平流层顶附近,其中多普勒偏差引起的误差最大值接近 2 K,多普勒频移引起的误差最大值小于 0.3 K,时钟稳定性/单差分引起的误差最大值(绝对值)接近 3 K,现实接收机噪声引起的误差最大值超过了 4 K,局部多路径引起的误差最大值小于 1.5 K;GRAS 整体误差在 30 km 以下小于 0.5 K,从 15 km 向上到平流层顶,温度误差曲线出现明显的摆动,30—40 km 误差达到了 1 K,在 40 km 以上温度误差曲线摆动幅度较大,峰值误差出现在 48 km 附近,其值已经超过了 4 K。由此可见对于高质量的无线电掩星反演,误差源中最重要的因素是接收机热噪声、时钟不稳定性/单差分以及由 POD 引入的多普勒偏差,其中多普勒偏差和时钟稳定性/单差分的影响主要在低频尺度,接收机热噪声主要在高频尺度。

从本文的研究还可以得出这样的结论:接收机误差对大气参数反演精度的影响与掩星事件的发生地点、空间跨度等有关,空间跨度越大,对反演精度的影响就越大。

仿真研究需要大量的模拟数据来进行验证,各类误差源在不同季节、不同区域(高、中、低纬)、不同的大气模型以及不同的反演算法下对大气参数反演精度的影响都将是以后模拟研究的重点。

中国的掩星探测研究正在兴起,利用 EGOPS 软件对 GNSS 掩星反演大气廓线进行接收机误差敏感性仿真研究,对于中国发展掩星计划、设计掩星接收机和今后的改进接收机性能等,都具有实际参

考价值。

## References

- Foelsche U, Kirchengast G. 2002. Sensitivity of atmospheric profiles retrieved from GNSS radio occultation data to horizontal variability in the troposphere. Techn Report for ESA/ESTEC No. 2/2002, Inst for Geophys, Astrophys, and Meteorol, Univ of Graz, Austria
- Gobiet A, Kirchengast G. 2002. Sensitivity of atmospheric profiles retrieved from GNSS radio occultation data to ionospheric residual and high-altitude initialization errors. Techn Report for ESA/ESTEC No. 1/2002, Inst for Geophys, Astrophys, and Meteorol, Univ of Graz, Austria
- Kirchengast G, Fritzer J, Ramsauer J. 2002a. End to end GNSS Occultation Performance Simulator Version 4 (EGOPS4) Software User Manual (Overview). Techn Report for ESA/ESTEC No. 3/2002, Inst for Geophys, Astrophys, and Meteorol, Univ of Graz, Austria
- Kirchengast G, Fritzer J, Ramsauer J. 2002b. End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator Version 4 (EGOPS4) Software User Manual (Reference Manual). Techn Report for ESA/ESTEC No. 3/2002, Inst for Geophys, Astrophys, and Meteorol, Univ of Graz, Austria
- Kirchengast, G. 1998. End-to-end GNSS Occultation Performance Simulator overview and exemplary applications. Wissenschaftl Ber No. 2/1998, Inst for Meteorol and Geophys, Univ of Graz Austria
- Kursinski E R, Hajj G A, Schofield J T, et al. 1997. Observing the Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System. *J Geophys Res*, 102 (D19): 23429-23465
- Kursinski E R. 1997. The GPS radio occultation concept: theoretical performance and initial results [D]. CIT, Pasadena, California
- Ramsauer J, Kirchengast G. 2001. Sensitivity of atmospheric profiles retrieved from GNSS radio occultation data to instrumental errors. Techn Report for ESA/ESTEC No. 6/2001, Inst for Geophys, Astrophys, and Meteorol, Univ of Graz, Austria