

GNSS 对流层延时映射函数影响分析比较研究

高兴国¹ 刘焱雄¹ 冯义楷¹ 彭琳¹

(1 国家海洋局第一海洋研究所工程院, 青岛市仙霞岭路 6 号, 266061)

摘要: 根据渤海湾三维气象场数据计算得到的映射函数值, 比较了 Marini 连续映射函数、NMF 和 VMF1 三类典型的映射函数在不同高度、不同方位产生的投影误差, 以及对同一测站点位精度的影响。比较结果表明, 在不同高度角下各函数的投影值之间出现微小差异; 高度角越小, 其相对误差越大。在 5° 高度角方向, VMF1 模型相对误差最大仅为 4%, 得到的基线精度最高, 解算基线后的 N RMS 为 0.209 1 周, 明显优于 NMF、Marini 模型。考虑到水汽的时变特性, 水汽分布的不均匀性是研究如何提高映射函数精度时不可忽略的关键因素。

关键词: 对流层延时; 映射函数; 数值气象模式

中图法分类号: P228.41

GNSS 信号在对流层中的延时包含湿分量延时和干分量延时两个部分。干分量延时通常采用数学物理模型计算^[1], 湿分量延时由水汽引起, 反映了大气中的水汽含量。由于大气中的水汽具有时变特性, 很难建立模型进行精确计算。测站天顶对流层总延时是干分量延时与湿分量延时之和, 正常情况下, 测站的天顶方向湿分量延时约占总延时的十分之一^[2]。GNSS 观测数据并不总是在天顶方向。在处理 GNSS 数据时, 如果把测站与每颗卫星对应的斜延时作为待估参数求解, 将使得观测方程无解。因此, 只能把每一个测站天顶延时作为未知数来估计得到, 通过映射函数将天顶方向的干湿分量延时投影到任意高度角方向, 得到斜向延时。斜向延时与天顶方向干湿分量延时的关系为:

$$\text{SPD}(e) = M_h(e)Z_h + M_w(e)Z_w \quad (1)$$

式中, e 为卫星高度角; $\text{SPD}(e)$ 为 e 高度角下的斜向总延时; M_h 为干分量映射函数; M_w 为湿分量映射函数; Z_h 为干分量延时; Z_w 为湿分量延时。

对流层延时干湿分量映射函数关系到各种估计参数的解算精度, 也关系到 GNSS 数据的利用率。对映射函数的研究是近年来国内外 GNSS 气象学研究的热点之一。

1 对流层映射函数模型

1.1 经验模型

经验模型多依赖于地面测站气压和纬度等参数, 精度最终都受到初始参数的限制, 比较典型的有 Marini 连续性映射函数和 Saastamoinen 映射函数。Marini 连续性映射函数满足连续分式(2):

$$M(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1 + c}}}{\sin e + \frac{a}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}}} \quad (2)$$

式中, a, b, c 是在经验资料基础上获得的。该映射函数是第一个与卫星高度角相关的经验性映射函数, 它的缺陷在于不容易被物理解释, 也不能随意改变以适应不同的地区和季节^[3]。

1.2 拟合模型

拟合映射函数模型是根据 Radiosonde 数据得到的。Niell 映射函数模型(NMF)是目前比较经典且应用十分广泛的模型, 它考虑了南北半球和季节性的非对称性, 其干映射项还包括与地理

测站高程有关的改正,反映了大气密度随高度增加而减少的变化率。由于 Niell 认为地表温度变化要比 2 000 m 以上的剧烈得多,因此,对于取决于地表参数的模型而言,地表参数限制了模型的精度。本文根据随时间周期性变化的大气层分布,采用美国标准大气模式中北纬一些地区(15°、30°、45°、60°、75°)在冬季(1月)和夏季(7月)的温度和相对湿度廓线,得出映射函数中系数在不同纬度上的值,并根据经验公式内插得出测站的干湿映射函数系数。

1.3 气象模型

VMF1 是一种利用欧洲中期天气预报中心数值气象模式数据计算映射函数的方法^[4]。它满足 Marini 连续分式,每天可以获得全球 2.0°×2.5°网格点的 VMF1 数据文件,文件包括网格点 4 个历元的干分量和湿分量天顶延时、干湿分量映射函数系数 a_h 和 a_w 数据。测站的 a_h 和 a_w 可以通过一定的内插方法计算,湿映射函数中的系数 b_w 、 c_w 为常数,干映射函数系数 b_h 、 c_h 可以通过经验公式计算。

2 基于渤海湾气象场数据的映射函数数值计算

映射函数值是斜向延时与天顶延时的比值,天顶延时是斜向延时的特例。映射函数包括干湿映射函数两种,二者在低高度角时差异比较明显,因此,精确求定斜向路径的干、湿延时是计算干、湿分量映射函数值的关键。GNSS 信号在传播方向的干延时(slant dry delay, SDD)、湿延时(slant wet delay, SWD)的理论表达式为^[3]:

$$\begin{aligned} \text{SDD} &= 10^{-6} \int_0^s N_d \text{d}s = 10^{-6} \int_0^s k_1 \frac{P_d}{T} \text{d}s \\ \text{SWD} &= 10^{-6} \int_0^s N_w \text{d}s = \\ 10^{-6} \int_0^s \frac{R_d}{\epsilon} (k_2 - \epsilon k_1 + \frac{k_3}{T}) q \rho \text{d}s \end{aligned} \tag{3}$$

式中, $k_1=0.007\ 76\ (\text{K}/\text{Pa})$; $k_2=0.704\ (\text{K}/\text{Pa})$; $k_3=3\ 740\ (\text{K}^2/\text{Pa})$; N_w 是静水力学延时; N_w 是湿气体折射率; R_d 为干气体常数; q 为相对湿度; ρ 为大气的密度; ϵ 为干气体常数与湿气体常数的比值。

2.1 渤海湾气象场数据的产生

渤海湾气象场的产生采用了美国宾州大学/国家大气研究中心 V3.7 版本的中尺度气象模式 MM5。本文采用 NCEP/NCAR 的 FNL 水平分辨率为 1.0°×1.0°的全球分析资料,为同化模拟提供较高分辨率的背景场和侧边界条件,同时加

入 GTS 常规观测和非常规资料,利用 MM5 模式的 4DDA 格点 nudging 同化,分别对实验区域进行了高分辨率的数值同化模拟,产生需要的连续逐小时 22 层气象场。模式的网格是 3 重嵌套,3 个网格的水平分辨率分别为 27 km、9 km、3 km。物理过程参数化使用了无积云对流参数化方案、高分辨率行星边界层(MRF)方案、简单冰显式水汽方案、云辐射方案和 5 层土壤模式。同时,在实验区域将 3 km 网格上的温度、水汽、高度场插值到 1' 的经纬度网格上,从而最终计算得出渤海湾的空间湿折射率。

2.2 空间折射率的切比雪夫多项式拟合与内插

对 MM5 模式成果求得的折射率进行积分,由于产生的折射率网格太粗,求得的对流层湿延时难以满足精度要求,因此,需要在任一卫星高度角方向上根据折射率采用移动窗口方法拟合内插更高分辨率的折射率场。

利用移动窗口的切比雪夫拟合法,内插得到 100 m 高度间隔的折射率场,并根据式(3)得出气象场内的对流层斜向湿延时。2 万 m 以上的水汽对信号的延时影响很小,几乎可以省略不计。因此,应用 Saastamoinen 模型式(4)计算超出气象场范围的天顶湿延时,并根据 NMF 模型投影到相应的高度角方向上,最终根据式(5)得到测站任意高度角方向的水汽总延时 SWD,从而得到相应的映射函数值:

$$\begin{aligned} \tilde{d}_w &= 0.002\ 277 \cdot \frac{e_p}{F(\varphi, H)} (\frac{1\ 225}{t+273.15} + 0.05) \\ F(\varphi, H) &\equiv 1 - 0.002\ 6 \cdot \cos(2\varphi) - 0.000\ 28 \cdot H \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \text{SWD}(e) &= \text{SWD}_f(e) + \tilde{d}_w \cdot \\ &\frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\text{sine} + \frac{a}{\text{sine} + \frac{b}{\text{sine} + c}}} \end{aligned} \tag{5}$$

式中, $\tilde{d}_w$ 为根据模型计算得到的天顶湿延时; $\text{SWD}_f(e)$ 为根据式(3)计算得到的气象场内相应高度方向的延时; φ 为气象场顶层与信号方向交点纬度(以 rad 为单位); e_p 为湿分量气压值; H 是交点的正高(km); P 为顶层交点大气压(以 mbar 为单位); a 、 b 、 c 是 Niell 映射函数系数; e 为卫星高度角。

3 不同映射函数结果的比较分析

为了计算不同映射函数模型引起的映射误

差,本文处理了渤海湾 2007 年 9 月、10 月两个月的三维气象场资料,测站位于渤海湾区域的中心。计算测站不同方位和高度角下的水汽延时,然后用倾斜方向的水汽延时除以天顶方向的水汽延时,得到 8 个方位上的 13 个对应卫星高度角方向(侧重于低高度角)的映射函数值(WMF)。20°高度角方向的 WMF 值与 NMF 模型结果的差异如图 1 所示,通过比较发现二者差异很小,相对误差均小于 1%。气象预报资料得到的映射函数较为可靠,采用其作为评价各个映射函数的标准。

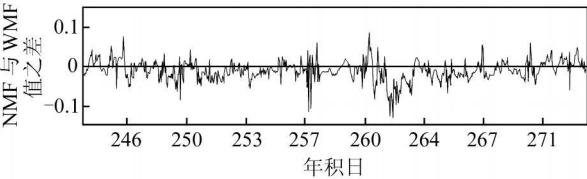


图 1 20°高度角下 WMF 与 NMF 模型间的差值
Fig. 1 Difference Between WMF and NMF Model at 20° Elevation Angle

以 WMF 为标准分析比较了 VMF1、NMF、Marini 3 种映射函数的相对误差,图 2 给出的是湿映射函数的比较结果。不难看出,卫星高度角越小,对应的干湿映射函数相对误差的差异就越明显。在比较的 3 种模型中,VMF1、NMF 对应的湿映射函数相对误差相差不大,远小于 Marini 模型值,都有随着高度角的减小而增大的趋势。在干映射函数比较中,VMF1 的精度明显优于 NMF 和 Marini。高度角为 10°时,各种映射函数模型的相对误差都小于 3%,但是随着高度角的变小,相对误差逐渐增大。在 5°高度角时,Marini 模型的干映射函数相对误差较大。VMF1 模型精度最高,在 5°高度角时,映射函数相对误差最大仅为 4%,精度明显高于 Marini 模型。

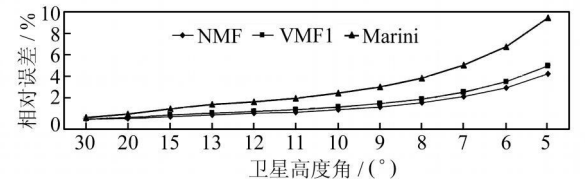


图 2 不同湿映射函数模型的相对误差比较
Fig. 2 Comparison of Relative Errors of Different Wet Mapping Function Models

由于大气中的水汽具有时变特性,导致相同高度角下不同方位、不同时刻计算得到的映射函数值也出现差异,高度角较小时差异尤其明显,在 5°高度角时差异最大超过 0.4,这体现了水汽空间分布不均匀对映射函数的影响。这是影响映射

函数模型精度的一个重要因素。图 3 给出了 NMF 模型在不同方位和高度方向的映射函数误差。

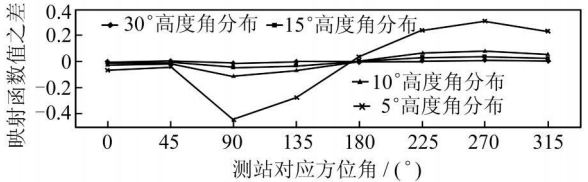


图 3 不同高度角方向水汽分布不均匀对 NMF 的影响
Fig. 3 Influence of Asymmetric Distribution of Water Vapor on NMF

不同的映射函数又得到测站不同的坐标估值。点位的精度反映了不同映射函数模型的影响^[6,7]。本文采用 GAMIT/GLOBK(10.2 版本)软件对渤海湾 GNSS 观测网进行数据处理。基线解算时,采用了 IGS 精密星历,数据采样间隔 30 s,卫星截至高度角为 10°。观测值采用消除电离层后的组合观测值,数据解算模式为周跳自动修复,采用不同的映射函数模型得到不同的点位和基线解算精度。从表 1 给出的结果可知,Marini 模型没有顾及到水汽分布的不均匀性,给 GNSS 精密定位带来较大影响,得到的基线解算的精度相对较差;从其他各项基线计算精度指标来看,VMF1 精度优于 NMF 和 Marini 模型,其基线解算后的 NRMS 值最小为 0.209 1 周,基线解算各方向的残差标准差均小于 5 mm,基线相对中误差也最小,这说明采用以 VMF1 为代表的气象模型解算基线的质量较高,得到的点位偏差也最小。

表 1 不同映射模型解算基线精度统计表

Tab. 1 Precision Comparison of Baseline Produced by Different Mapping Functions

名称	基线分量精度/mm				基线相对中误差/ 10^{-10}	NRMS/周
	∂N	∂E	∂U	∂S		
VMF1	3.93	4.23	4.32	4.75	1.448	0.209 1
NMF	3.98	4.51	4.44	5.23	1.834	0.210 3
Marini	6.38	4.71	4.88	5.32	2.25	0.234 9

注: N 为南北方向, E 为东西方向, U 为高程方向, S 为基线长度方向。

4 结 语

本文对 3 类映射函数模型从映射值相对误差和基线解算精度两个方面进行了比较分析,基于三维大气场数据内插得到的气象模型,如 VMF1、GMF 等,精度明显优于其他类型的模型。水汽分

布的不均匀性在低高度角方向对映射函数具有较大影响,也直接影响着高精度 GNSS 数据处理中测站点位的精度,特别是在水汽输送交换频繁的沿海地区。

参 考 文 献

[1] 刘焱雄, Biz H, 陈永奇. GNSS 气象学中垂直干分量延时的精确确定[J]. 测绘学报, 2000, 29(2): 172-180

[2] Hopfield H S. Two-Quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data[J]. J Geophys Res, 1969, 74: 4 487-4 499

[3] 宋淑丽, 朱文耀, 廖新浩. 地基 GNSS 气象学研究的主要问题及最新进展[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 250-259

[4] Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere Mapping Function for GNSS and Very Long Baseline

Interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Operational Analysis Data [J]. J Geophys Res, 2006, 111: 406-415

[5] Koub J. Implementation and Testing of the Gridded Vienna Mapping Function1 (VMF1) [J]. J Geod, 2008, 82: 193-205

[6] de Haan S, van der Marel H. The Influence on GNSS Estimates of NWP-derived Mapping Functions [J]. Physicas and Chemistry of the Earth, 2004, 29: 159-166

[7] 张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. 动态映射函数最新进展及其在 GNSS 遥感水汽中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(3): 280-283

第一作者简介: 高兴国, 硕士, 主要从事 GNSS 气象学、海洋测绘等方面的研究。
E-mail: gaoxingguo001@163.com

Anlysis of Influence of Mapping Function on GNSS Tropospheric Delay

GAO Xingguo¹ LIU Yanxiong¹ FENG Yikai¹ PENG Lin¹
(1 The First Institute of Oceanography, SOA, 6 Xianxialing Road, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the mapping function values derived from numerical weather model data (NWM), we compared the projection errors and baseline's precision produced by Marini, NMF and VMF1 mapping function model at different elevation angles and azimuths. The results show that mapping values are slightly different, and relative errors gradually increase with the decrease of elevation angle. It implies that the maximum relative error of VMF1 is only 4% when the elevation angle is 5° and the precision of baseline produced by VMF1 is the highest. The NRMS of VMF1 is 0.209 1, which is much lower than NMF and Marini model. Considering time-changing property of water vapor, asymmetric distribution of water vapor is the key factor to improve the precision of mapping function.

Key words: tropospheric delay; mapping function; numerical weather model (NWM)

About the first author: GAO Xingguo, master, majors in technology and application of GNSS.
E-mail: gaoxingguo001@163.com