

# 动态映射函数最新进展及其在 GNSS 遥感水汽中的应用研究

张双成<sup>1</sup> 叶世榕<sup>1</sup> 刘经南<sup>1</sup> 李 冲<sup>2</sup>

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)  
(2 国家测绘产品质量监督检验测试中心,成都市人民北路二段 198 号,610081)

**摘 要:**给出了基于欧洲中尺度数值预报中心(ECMWF)构建的高精度动态映射函数 VMF1 和 GMF 的研究进展及方法,对 NMF、VMF1 和 GMF 三种映射函数进行了时空分析,结合实例分析了三种映射函数在 GNSS 遥感水汽中的应用。实验结果证实,动态映射函数 VMF1 和 GMF 较常规 NMF 函数具有更高的精度和全球覆盖性,且基于 ECMWF 构建的动态映射函数可以提高 GNSS 遥感水汽的精度。  
**关键词:**动态映射函数;地基 GNSS 气象;数值天气模式;GNSS 信号方向湿延迟  
**中图法分类号:**P237.9; P228.42

在空间大地测量数据处理中,常用的 Niell 静态映射函数 NMF 仅用分布在北半球的少数探空站的一年观测数据来确定模型系数<sup>[1]</sup>。NMF 的模型偏差使其难以满足当前全球高精度 GNSS 和 VLBI 等数据处理的分析需求,因此,高精度映射函数的构建成为空间定位数据处理与 GNSS 实时遥感空间大气分布等领域的研究热点。随着数值天气模式(numerical weather models, NWM)精度的不断提高,NWM 可近实时提供高时空分辨率的对流层折射率分布,使得近年来 NWM 逐渐被用于构建高精度动态映射函数<sup>[2-8]</sup>。目前,基于 NWM 构建的动态映射函数 IMF(isobaric mapping functions)、VMF1(vienna mapping functions 1)和全球动态映射函数(global mapping functions,GMF)等模型已被逐步用于高精度 GNSS 数据处理软件如 GAMIT/GLOBK 和 Bernese 等进行定轨定位数据分析。本文给出了静态 NMF 采用的连分式形式及其模型系数的确定方法,以及基于 ECMWF(European center for medium-range weather forecasts)观测资料构建的近实时(6 h 分辨率)动态映射函数 VMF1 和 GMF,并对 NMF、VMF1 和 GMF 三种映射函数在不同地域及时域进行了时空变化分析。

## 1 基于 NWM 构建高精度动态映射函数 VMF1 和 GMF

随着空间定位理论技术的不断完善和各类误差源改正的不断细化,目前,对流层折射延迟 STD(slant-path total delay)逐步成为高精度 GNSS 和 VLBI 数据处理的主要误差源,而映射函数精度的高低直接制约着天顶总延迟(zenith total delay, STD)修正精度的提高,进而影响折射延迟和定轨定位等参数估值的精度,因此,构建高精度映射函数成为当前解决大气折射影响的热点问题。

诸多学者对映射函数的构建作了大量的研究,并提出了多种映射函数,如 Chao 映射函数、Davis 的 CFA2.2 映射函数、Ifadis 映射函数以及 Herring 的 MTT 映射函数等。

NMF 映射函数基于随时间周期性变化的大气层分布,采用了美国标准大气模式中北纬一些地区冬季(一月)和夏季(七月)的温度和相对湿度的廓线,认为南北半球是非对称的,季节性行为也如此。NMF 包括干映射项  $NMF_{dry}(e)$  和湿映射项  $NMF_{wet}(e)$  两部分<sup>[1]</sup>,均采用类似于 MTT 模型的三项连分式,且干映射项还包括与测站高程

有关的改正,反映了大气密度随高度增加而减少的变化率。

1.1 基于 ECMWF 构建动态映射函数 VMF1

大气折射延迟不仅可以通过追踪射线各层点的折射率进行严密计算,而且可用地表气象参数模型化近似求取,或为避免气象观测的麻烦,用常年气象资料建立的平均大气模式近似表示,但精度必然受到限制。ECMWF 可近实时提供高时空分辨率的对流层折射率分布,为高精度构建动态映射函数提供了一种全新的研究手段。VMF1 仍然采用 NMF 的三项连分式映射函数表达式,与 NMF 的不同之处在于干湿映射项中系数的算法选取。

VMF1 通过提取 ECMWF 提供的初始高度角  $3.3^{\circ}$  的湿折射率资料,利用射线跟踪算法得到全球经纬方向  $2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$  分辨率的 6 h 分辨率格网点干湿映射项系数  $a_{\text{dry}}$  和  $a_{\text{wet}}$  值<sup>[5,7]</sup>,计算结果可近实时从奥地利维也纳理工大学大地测量研究所网站下载 (<http://mars.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1>)。用户可用全球格网点的  $a_{\text{dry}}$  和  $a_{\text{wet}}$  值采用一定的内插算法求取测站的  $a_{\text{dry}}$  和  $a_{\text{wet}}$  值。VMF1 湿映射项系数  $b_{\text{wet}}$  和  $c_{\text{wet}}$  分别取常数 0.001 46 和 0.043 91;干映射项系数  $b_{\text{dry}}$  和  $c_{\text{dry}}$  利用 ECMWF 提供的 40 a 观测数据以水平约 125 km 的分辨率采用球谐函数展开式计算得到, $b_{\text{dry}}$  取常数 0.002 9, $c_{\text{dry}}$  由下式计算<sup>[5-7]</sup>:

$$c_{\text{dry}} = c_0 + \left[ \left( \cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365} \cdot 2\pi + \psi\right) + 1 \right) \cdot \frac{c_{11}}{2} + c_{10} \right] \cdot (1 - \cos\varphi) \quad (1)$$

式中,doy 为 UTC 时间系统的年积日;参数  $c_0$ 、 $c_{10}$ 、 $c_{11}$  和  $\psi$  可由索引表查取<sup>[5-7]</sup>。

1.2 基于 ECMWF 构建全球映射函数 GMF

为了简化 VMF1 计算上的繁琐和提高模型获取的实时性,Boehm 等人在 VMF1 的基础上构建了类似 NMF 易于实现的、且与 VMF1 精度相当的全球映射函数 GMF<sup>[8]</sup>。GMF 的构建利用 ECMWF 提供的 40 a 全球  $15^{\circ} \times 15^{\circ}$  分辨率的月平均廓线(气压、温度和湿度等)分析数据,采用类似 VMF1 的射线轨迹法计算模型系数  $a_{\text{dry}}$  和  $a_{\text{wet}}$ ,而  $b_{\text{dry}}$ 、 $b_{\text{wet}}$ 、 $c_{\text{dry}}$  和  $c_{\text{wet}}$  仍采用 VMF1 模型计算值。GMF 模型系数  $a_{\text{dry}}$  和  $a_{\text{wet}}$  算法相同,下面仅给出  $a_{\text{dry}}$  系数的表达式<sup>[8]</sup>:

$$a_{\text{dry}} = a_0 + A \cdot \cos\left(\frac{\text{doy} - 28}{365} \cdot 2\pi\right) \quad (2)$$

式中,平均值  $a_0$  和振幅  $A$  的算法相同,均采用下面的球谐函数展开至 9 阶表达式<sup>[8]</sup>计算得到:

$$a_0 = \sum_{n=0}^9 \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\varphi) \cdot [A_{nm} \cdot \cos(m\lambda) + B_{nm} \cdot \sin(m\lambda)] \quad (3)$$

2 动态映射函数的时空变化分析

为了验证 VMF1 和 GMF 对常用 NMF 模型的改进,本文主要对 VMF1、GMF 和 NMF 的干映射项在赤道及南半球不同的 IGS 站进行了时空变化分析。图 1 为相应的比对图,图中,光滑粗线为 NMF 分布,光滑细线为 GMF 分布,粗糙折线为 VMF1 分布。

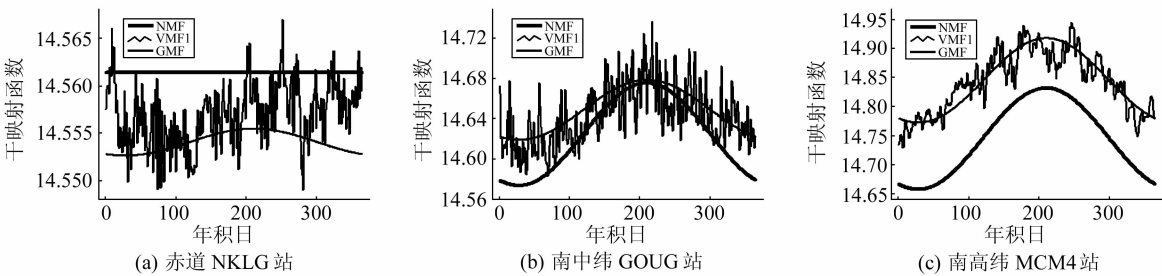


图 1 各站的干映射 2006 年分布图  
Fig. 1 Hydr. MF at Different Sites in 2006

由图 1 可以看出,VMF1 和 GMF 在不同的时空域均吻合得很好,证实了 GMF 不仅计算快捷、简便,且精度与 VMF1 相当。在赤道附近,VMF1 和 GMF 可以更真实地反映对流层折射的变化;在中纬地区尤其是北纬地区,三者吻合得较好;在南半球高纬地区,VMF1、GMF 与 NMF 表现出的系统性大偏差是由于 NMF 的建立仅利用

了北半球的气象观测资料所致。  
图 2 显示出 VMF1、GMF 与 NMF 在年周期变化率上具有极强的一致性。图 3 从全球的角度反映出 VMF1、GMF 和 NMF 在北半球吻合得很好(由于 NMF 的建立利用了北半球的气象观测数据),而在南半球则折射出较大的系统性偏差。

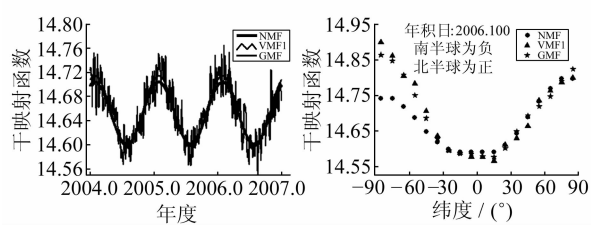


图 2 北中纬 MATE 站干映射函数 2004~2007 年分布图  
Fig. 2 Hydr. MF at MATE in 2004-2007

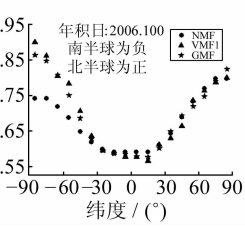


图 3 干映射函数沿经线方向分布图  
Fig. 3 Hydr. MF Along Longitude

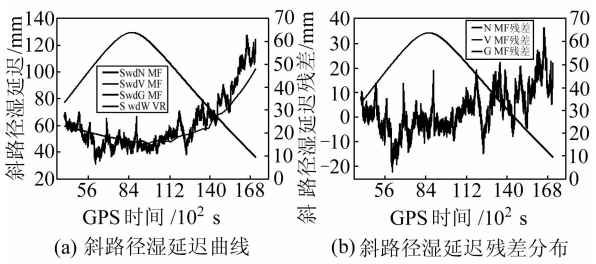


图 4 SA10 站 Prn24 斜路径湿延迟曲线和斜路径湿延迟残差分布

Fig. 4 SWD and SWD Bias of Prn24 at SA10

### 3 动态映射函数在 GNSS 遥感水汽中的应用研究

为了进一步验证 VMF1 和 GMF 在遥感水汽应用中的有效性,本文选取了北半球加拿大卡尔加里大学的附带有微波辐射计 WVR 的 SA10 测站(北纬 51°)的观测数据进行了实验解算。由于没有当地大量的气象观测资料求取 SA10 站的平均加权温度,因此,文中仅对 GNSS 反演的斜路径湿延迟 (slant wet delay, SWD) 进行了比对。SWD 的求取首先采用 GAMIT 软件包估计 ZTD,利用 SA10 站的气象观测数据分离出该站的湿延迟,然后顾及大气水平梯度和后拟合双差残差,利用不同的映射函数求解 SWD<sup>[10-12]</sup>。考虑到 SA10 站有并址的 WVR 作为检测手段,故将 WVR 观测值作为 SWD 的参考真值,计算结果如图 4 和表 1 所示。

表 1 基于不同映射函数得到的斜路径湿延迟残差误差统计/mm

Tab. 1 Errors Statistics for SWD Bias Based Different MFs/mm

残差类型	偏差	均方误差
NMF-WVR	8.963 04	6.747 07
VMF1-WVR	6.756 68	4.133 87
GMF-WVR	7.258 92	5.670 41

图 4(a)从直观上显示出利用三种映射模型反演得到的 SWD 具有极强的一致性,而且均与 WVR 观测结果吻合得较好,也再次利用 WVR 数据证实了利用地基 GNSS 反演 SWD 的有效性;随着高度角的不断降低,GNSS 反演得到的 SWD 与 WVR 逐渐出现较大偏差,原因在于大气底层的水汽含量较大,进而使得 GNSS 和 WVR 探测器在低高度角时受对流层水汽折射的影响。

结合图 4(b)和表 1 可知,利用 VMF1 映射的 SWD 精度最好,GMF 模型次之,结果也证实基于

ECMWF 构建的高精度 VMF1 和 GMF 模型可完全替代常规的 NMF 模型。

### 4 结 语

本文对 NMF、VMF1 和 GMF 三种映射函数进行了时空分析,并将其应用于地基 GNSS 遥感水汽。结果证实,动态 VMF1 和 GMF 映射函数相对 NMF 映射函数具有更好的全球覆盖性,且对 GNSS 遥感水汽精度具有一定的改进。为获取高精度 GNSS 和 VLBI 数据分析结果,建议采用近实时动态 VMF1 模型。若无法获取 6 h 分辨率 ECMWF 数据资料,可采用精度相当且无系统性偏差、易于计算的 GMF 模型代替。近实时数值天气模式不仅可以用于构建空间定位技术 GNSS 和 VLBI 中高精度的动态映射函数,而且为 GNSS 实时大气模型的建立、缩短精密单点定位的初始化时间、高精度层析 GNSS 水汽空间三维分布以及校正 InSAR 大气折射误差等领域提供了一种极其有效的研究手段。

致谢:感谢美国 MIT 授权使用 GAMIT/GLOBK 软件,美国 MIT 地球大气和行星科学系的 Robert W. King 和 Tom Herring 博士等人给予的帮助;以及奥地利维也纳理工大学大地与地球物理测量研究所提供的欧洲中尺度数值预报中心 6 h 分辨率 VMF1 模型系数和奥地利 Johannes Boehm 教授给予的帮助。

### 参 考 文 献

[1] Niell A. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths[J]. JGR, 1996, 101(B2): 3 227-3 246  
[2] Niell A. Improved Atmospheric Mapping Functions for VLBI and GPS[J]. Earth Planets Space, 2000, 52: 699-702  
[3] Niell A. Preliminary Evaluation of Atmospheric

Mapping Functions Based on Numerical Weather Models[J]. *Phys Chem Earth (A)*, 2001, 26(6/8):475-480

[4] Niell A, Petrov L. Using a Numerical Weather Model to Improve Geodesy[C]. *The State of GPS Vertical Positioning Precision: Separation of Earth Processes by Space Geodesy*, Luxembourg, 2003

[5] Boehm J, Schuh H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(1): 101603.1-101603.4

[6] Boehm J, Cervera P J M, Schuh H, et al. The Impact of Tropospheric Mapping Functions Based on Numerical Weather Models on the Determination of Geodetic Parameters[C]. *IAG Proceedings*, Cairns, 2005

[7] Boehm J, Werl B, Schuh H. Troposphere Mapping Functions for GPS and VLBI from ECMWF Operational Analysis Data[J]. *JGR*, 2006, 111(B02406): d02406.1-d02406.9

[8] Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 107304

[9] Marini J W. Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Troposphere Profile[J]. *Radio Science*, 1972,7(2):223-231

[10] Ware R, Alber C, Rocken C, et al. Sensing Integrated Water Vapor Along GPS Ray Paths[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24:417-420

[11] 张双成,叶世榕,万蓉,等. 基于 Kalman 滤波的断层扫描初步层析水汽湿折射率分布[J]. *武汉大学学报·信息科学版*,2008,33(8):796-800

[12] 张双成,刘经南,叶世榕,等. 顾及双差残差反演 GPS 信号传播方向的斜路径水汽含量[J]. *武汉大学学报·信息科学版*,2009,34(1):100-140

第一作者简介:张双成,博士生。现主要从事高精度 GNSS 数据处理与 GNSS 实时大气模型研究。  
E-mail:shuangcheng1979@163.com

## Latest Progress of Dynamic Mapping Functions and Its Application to GNSS Retrieved Water-Vapor

ZHANG Shuangcheng<sup>1</sup> YE Shirong<sup>1</sup> LIU Jingnan<sup>1</sup> LI Chong<sup>2</sup>

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 State Supervision and Testing Center of Surveying and Mapping Product, 198 2nd Section North Renmin Road, Chengdu 610081, China)

**Abstract:** We give two models of VMF1 and GMF derived from ECMWF data based on NMF model, present the space-time analysis of three mapping functions. A real example of ground-based GNSS retrieved water-vapor is given to demonstrate the accuracy of VMF1 and GMF models. It is shown that the application of VMF1 and GMF improves the precision of GNSS retrieved water-vapor. At the same time, many investigations may be concentrated on the repeat rate of baseline length, absolute changes of station heights, and the terrestrial reference frame.

**Key words:** dynamic mapping functions; ground-based GNSS meteorology; numerical weather model; GNSS slant-path wet delay

About the first author: ZHANG Shuangcheng, Ph.D candidate, majors in precise GNSS data processing and GNSS real-time atmosphere modeling.  
E-mail: shuangcheng1979@163.com