引文格式：邹崇尧,梁斌,厉芳婷,等. 基于CORS对流层延迟改正模型在山区地灾监测的分析应用[J]. 地理空间信息, 2023, 21(12): 100-102. doi: 10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.12.024

基于CORS对流层延迟改正模型在山区地灾监测的分析应用

邹崇尧[1]，梁　斌[1]，厉芳婷[1]，王鹏旭[2]，林晓静[1]
（1. 湖北省测绘工程院，湖北 武汉 430074；2. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心 湖北珞珈实验室，湖北 武汉 430079）

摘　要：地灾监测是当下重点的卫星导航与位置服务应用场景，通常使用单基站或基准站网为监测点提供数据服务。由于地灾监测点普遍位于山区，当不便建设单基站，而区域基准站网与监测点又可能存在较大的高程差时，直接使用基准站网提供服务会产生对流层延迟建模的精度不一致，导致监测点高程数据不准确的问题。针对该问题，利用一种改进的线性插值方法，通过修正对流层延迟误差，经研究区域实验，结果表明在该实验区域内，高程方向的精度可提升到93.6%，可显著提升湖北省连续运行参考站系统提供地灾监测服务时各监测点高程方向的定位精度，为山区地灾监测场景提供稳定可靠的差分数据服务。

关键词：连续运行参考站系统；天顶对流层延迟；虚拟参考站；网络RTK；地灾监测
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）12-0100-03

Analysis and Application of Tropospheric Delay Correction Model Based on CORS in Mountain Disaster Monitoring

ZOU Chongyao[1], LIANG Bin[1], LI Fangting[1], WANG Pengxu[2], LIN Xiaojing[1]
(1. Hubei Institute of Surveying and Mapping Engineering, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Luojia Laboratory, GNSS Research Center of Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Disaster monitoring is currently the key application scenario of satellite navigation and positioning services with a single base station or a reference station network to provide data services for monitoring points. Since the disaster monitoring points are generally located in mountain areas, when it is not convenient to build a single base station, there may be a large difference in elevation between the regional reference station and the monitoring point, directly using the reference station to provide services will result in inconsistencies in the accuracy of tropospheric delay modeling and inaccurate elevation data of monitoring points. To solve this problem, we used an improved linear interpolation method to correct the tropospheric delay error. After the experiment in the research area, the results show that the accuracy of elevation direction can be increased by 93.6%. It can significantly improve the positioning accuracy of elevation direction of each monitoring point when the continuous operation reference station(CORS) system in Hubei Province provides disaster monitoring services, and provide a solution for stable and reliable differential data services for mountain disaster monitoring.

Key words: CORS, ZTD, VRS, NetRTK, disaster monitoring

湖北省属地质灾害多发地区，常见的地质灾害类型为滑坡。由于地灾监测预警的需求紧迫，除了直接建设单基站对各观测点进行监测外，也可利用湖北省连续运行参考站系统（HBCORS）对监测点提供虚拟参考站（VRS）数据服务，将各监测点作为网络RTK直接接入HBCORS，作为单基站监测模式的印证与补充。由于HBCORS各基准站普遍位于城市建成区与山顶、山谷的监测点存在一定高差，直接使用HBCORS进行服务时，应考虑到山顶、山谷监测点与居住建成区已有基准站之间的高差问题[1]。

为了解决监测点与HBCORS各基准站高程差导致的对流层建模精度不一致的问题，本文将利用一种改进的线性插值方法，选用GPT2+Saas模型[2]与GMF投影模型[3]相关参数，根据基准站与流动站之间的高程差，对天顶对流层延迟进行修正[4]，显著提升高程方向定位精度，利用HBCORS在地灾监测场景提供稳定可靠的数据服务，为CORS在普适性监测场景的应用提供了方法。

1　对流层延迟的计算

对流层延迟参数和高程参数具有很强的相关

收稿日期：2023-11-09。
项目来源：湖北省自然资源科研基金资助项目（ZRZY2023KJ07）。
第一作者简介：邹崇尧（1967—），正高职高级工程师，研究方向为测绘工程应用，E-mail：zoucyao@163.com。

性[5-6]，在短时相对定位中，难以估计得到准确的对流层延迟，只能采用外部改正[7]，在实际应用中，通常使用一些对流层延迟算法来建模实现外部改正。

1.1　常规对流层延迟的计算

对流层延迟可以根据基准站间计算的大气来内插流动站处的大气信息，常用的是基于平面二维坐标线性插值法（LIM）来计算。

$$\hat{\boldsymbol{T}}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{X}_{ab} \tag{1}$$

$$\hat{\boldsymbol{T}}=\begin{bmatrix}\hat{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M},1}\\ \hat{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M},2}\\ \vdots\\ \hat{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M},n-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\Delta X_{\mathrm{M},1}\ \Delta Y_{\mathrm{M},1}\\ \Delta X_{\mathrm{M},2}\ \Delta Y_{\mathrm{M},2}\\ \vdots\quad\ \vdots\\ \Delta X_{\mathrm{M},n-1}\Delta Y_{\mathrm{M},n-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{X}_{ab}=\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix} \tag{2}$$

式中，o为基准卫星；p为参考卫星；1、2…$n-1$为用到的辅助基准站；ΔX 和 ΔY 分别为2个站在X方向和Y方向上平面坐标的差值；$\hat{T}$ 计算的是双差对流层延迟；a、b 为内插系数，通过最小二乘法可表示为：

$$\boldsymbol{X}_{ab}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{T}} \tag{3}$$

那么流动站v与主基准站M之间的双差对流层延迟方程为：

$$T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M,V}}=[\Delta X_{\mathrm{M,V}}\ \Delta Y_{\mathrm{M,V}}]\cdot(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\hat{\boldsymbol{T}} \tag{4}$$

式中，$T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M,V}}$ 为基准站M与流动站V之间依据卫星o、p内插得到的双差对流层延迟 。

1.2　对流层延迟的改进算法

对流层延迟受观测设备位置影响很大，基准站与流动站存在较大高差时，双差对流层延迟的不准确性会直接导致测量误差的增大，且对于类似情况的基准站网，这个误差为系统性误差。

为了解决这个问题，本系统利用了一种改进的线性插值法。在对任意2个高差较大的基准站进行区域大气建模时，提取完固定基线下的双差大气信息后，首先完成对流层延迟的高程偏差补偿修正，下面将进行具体阐述。

某个三角网存在3个基准站M、N、B，此时有接入的流动站V，且距基准站M最近，则M为三角网主基准站，N、B为辅基准站，在利用LIM法计算该内插模型前，站M和站N之间的双差对流层延迟应为：

$$T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{MN}}(\Delta h_{\mathrm{MN}})=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(\Delta h_{\mathrm{N}})-T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(\Delta h_{M}) \tag{5}$$

式中，Δh_{MN} 为基准站M与基准站N之间的大地高之差；$T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(\Delta h_{\mathrm{N}})$ 和 $T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(\Delta h_{\mathrm{M}})$ 分别基准站N与M同卫星o、p的星间单差对流层延迟；h_{M}、h_{N} 为站M、N大地高。将基准站的高程补偿至流动站大地高椭球面 h_{V}，则基准站M和N经过补偿后的单差对流层延迟分别为:

$$\bar{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}})=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}})+T_{\mathrm{CorN}} \tag{6}$$

$$\bar{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}})=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}})+T_{\mathrm{CorM}} \tag{7}$$

方程（6）、（7）的补偿改正值可进一步推导为：

$$T_{\mathrm{CorN}}=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{V}})-T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}}) \tag{8}$$

$$T_{\mathrm{CorM}}=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}})-T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}}) \tag{9}$$

方程（8）、（9）进一步展开可得：

$$\begin{aligned}T_{\mathrm{CorN}}=&\mathrm{ZTD}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{V}})\times(\mathrm{MF}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{V}})-\mathrm{MF}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{V}}))-\\ &\mathrm{ZTD}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}})\times(\mathrm{MF}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}})-\mathrm{MF}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{N}}))\end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}T_{\mathrm{CorM}}=&\mathrm{ZTD}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}})\times(\mathrm{MF}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}})-\mathrm{MF}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}}))-\\ &\mathrm{ZTD}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}})\times(\mathrm{MF}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}})-\mathrm{MF}^{\mathrm{o}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{M}}))\end{aligned} \tag{11}$$

式中，$\mathrm{ZTD}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}})$ 为基准站M在 h_{V} 高程下的天顶对流层延迟，可利用GPT2+Saas中相关大气参数计算；$\mathrm{MF}^{\mathrm{p}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}})$ 为基准站M在 h_{V} 高程下卫星p投影函数，可利用GMF相关参数计算，其余近似表达含义一致。相对于基准站M、N校正前存在的对流层延迟系统误差，通过在同一水平面 h_{V}，使用传统的LIM方法也可获得高校正精度的对流层延迟修正值 T_{CorM}、T_{CorN}。

将方程（6）、（7）、（8）、（9）代入方程（5），则方程（5）可表示为：

$$\bar{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{MN}}(\Delta h_{\mathrm{VV}})=T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{N}}(h_{\mathrm{V}})-T^{\mathrm{op}}_{\mathrm{M}}(h_{\mathrm{V}}) \tag{12}$$

式中，$\bar{T}^{\mathrm{op}}_{\mathrm{MN}}(\Delta h_{\mathrm{VV}})$ 为修正后的基线MN基于基准卫星o与参考卫星p的双差对流层延迟。

将这项系统性的双差对流层延迟进行提前修正后，再利用传统LIM方法进行内插，则可以得到任意2个站点不受高差影响的双差对流层延迟。这个过程即为MLIM方法。

2　研究区域介绍

本文将以HBCORS在鄂西地区的基准站作为实验分析对象，验证对流层的改进算法，从而分析地灾监测点接入HBCORS时的情况。

鄂西地区一般包括十堰、恩施、襄阳、宜昌4个地市、神农架林区以及荆门、荆州市部分地区，经度分布大约在108°~112°E之间。根据HBCORS概略分布及高程统计图（如图1），可见鄂西地区基准站普遍高程在200~600 m，部分基准站高程达到900 m以上。

具体选取鄂西地区存在较大高差的相邻基准站4个，取外围3个站作为基准站组成三角网，三角网

内部基准站作为流动站进行观测并获得固定解，该实验网型、站间距、各站高程如图2、3所示。通过采用传统LIM与MLIM 2种方法可内插出不同对流层建模策略下的流动站大气延迟，进而可以生成2种虚拟观测值，发送给流动站进行RTK对比测试，

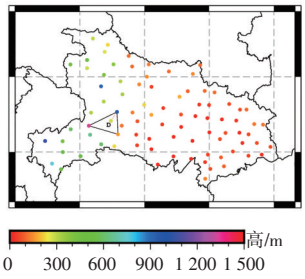


图1 HBCORS概略分布及高程统计图

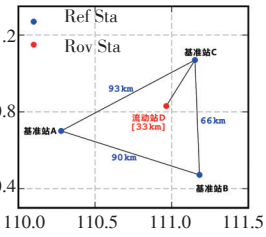


图2 实验网分布及基线示意图

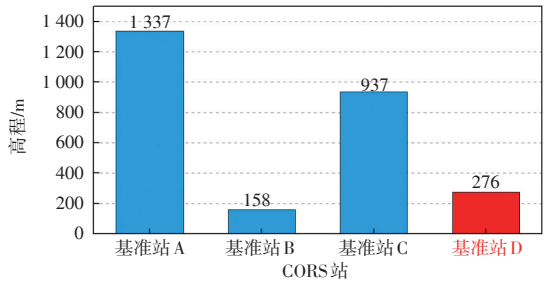


图3 实验网高程分布统计图

3 实验结果及分析

由于图2中选择的模拟流动站实际为坐标精确已知的CORS基准站，因此站点的RTK结果可以直接进行外符合精度比较。通过收集原始观测数据，整理后对定位误差与固定率等指标进行了统计，并绘制了站点D在LIM模式与MLIM模式下的外符合定位误差时间序列（如图4）。

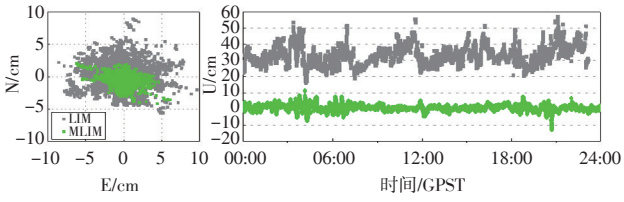


图2 两种模式下外符合定位误差时间序列图

从统计与图4的结果可以得出：①流动站D在LIM与MLIM方法下的RTK固定率均比较高且没有呈现出太大的差异，固定率分别96.6%与99.9%；②2种方法的水平定位误差分别为E：2.7 cm、N：3.2 cm与E：0.7 cm、N：0.8 cm，MLIM方法在E方向上的精度提升为74%、在N方向上的精度提升为75%；③传统LIM方法在高程方向呈现出了明显的误差，U方向的定位误差RMS为34.3 cm，MLIM方法定位误差RMS仅为2.2 cm，相比较于LIM的精度提升为93.6%。

在U方向上的定位误差RMS上的差异，显然是由于传统LIM方法在未考虑基准站与流动站之间存在的高差给对流层建模带来的影响，从而为流动站引入了较大的建模残差导致，MLIM方法则全面考虑了高程对对流层建模的影响，因而在U方向上的定位精度较高。

根据本实验数据，若需要进地灾监测的区域大地高与附近的HBCORS基准站大地高存在较大高差时，有必要在对流层建模时利用MLIM方法进行对流层延迟的修正，从而降低鄂西地区各类监测站点使用HBCORS时生成的额外大地高误差，达到进行地灾监测所需的精度要求。

4 结 语

本文利用MLIM方法，改进了HBCORS生成VRS时对流层延迟的计算方法，全面考虑了高程差对对流层建模的影响，显著提升了高程方向的定位精度，经实验验证，高程方向的定位精度提升可达93.6%。本方法满足了山区利用基准站网开展地灾监测的需求，降低了大量的监测站接入时的单基站系统布设压力，为各基准站网开展山区普适性地灾监测提供了解决方法。

参考文献

[1] 张勤，白正伟，黄观文，等. GNSS滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报，2022，51(10)：1 985-2 000

[2] 姚宜斌，张豹，严凤，等. 两种精化的对流层延迟改正模型[J]. 地球物理学报，2015，58(5)：1 492-1 501

[3] 徐杰，孟黎，任超，等. 对流层延迟改正中投影函数的研究[J]. 大地测量与地球动力学，2008(5)：120-124

[4] Yakun P，Min S，Yunbin Y. Modified Interpolation Method of Multi-reference Station Tropospheric Delay Considering the Influence of Height Difference[J]. REMOTE SENSING，2021，13(15)：2 994 -2 998

[5] 张士柱，李莎莎，肖伟，等. 利用Multi-GNSS估计天顶对流层延迟[J]. 地理空间信息，2019，17(5)：68-72

[6] Beutler G，Bauersima I，Gurtner W，et al. Atmo-spheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations[R]. Zimmerwald：Mitt Satell-beobachtungsstn，1987

[7] Wielgosz P，Paziewski J，Krankowski A，et al. Results of the Application of Tropospheric Corrections from Different Troposphere Models for Precise GPS Rapid Static Positioning[J]. Acta Geophysica，2012，60(4)：1 236-1 257