

GPS 信号对流层延迟改正新模型研究

殷海涛^{1,2} 黄丁发¹ 熊永良¹ 王贵文³

(1 西南交通大学测量系,成都市二环路北一段 111 号,610031)
(2 山东省地震局,济南市文化东路 20 号,250014)
(3 武汉大学测绘学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)

摘要:为削弱对流层对 GPS 精密定位的影响,从大气折射率入手将大气分为 3 层,建立了大气折射率模型,并导出对流层天顶延迟模型。利用 IGS 跟踪站的实测数据进行了验证,实验证明了新模型的有效性。
关键词:GPS;对流层;大气折射率;改进的天顶延迟模型
中图法分类号:P228.41

GPS 卫星信号经过地球外部的大气层传播至地面上 GPS 接收机时,会受到对流层的影响。对流层对 GPS 信号的影响从天顶方向的 2 m 到地平高度角 15° 的 25 m,即使通过模型修正,也只能修正其中的 90%~95%;特别是湿大气部分,由于变化随机性强,很难用模型来估计^[1]。所以对对流层延迟的改正精度一直制约着 GPS 测量精度的提高。然而由于对流层误差影响的复杂性,现有对流层模型^[2,3]的精度难以满足高精度基线解算的要求。

本文分析了不同高程段对流层大气折射率的变化情况,建立了新的大气折射模型,在此模型基础上进行分段积分,得到了站点的对流层改正模型,最后利用实际数据对新模型和传统模型进行了比较,验证了新模型的有效性。

1 对流层大气折射率建模方法分析

1.1 传统大气折射率模型分析

电磁波在大气中传播时,由于受对流层的影响而使传播速度及传播路径发生变化,以小于光速的群速在传播,而传播路径也将产生弯曲(一般小于 1 cm^[4],可以不予考虑),所以研究对流层对电磁波传播的折射影响,首先就要研究对流层大气折射率。大气折射率随高度 h 呈线性变化^[5]:

$$N(h) = N_0 + \Delta N \times h \quad (1)$$

式中, $N(h)$ 为高度 h 处的折射率; N_0 为地面折射率; ΔN 为折射率梯度; h 为从地面起算的高度。

在近地面 1 km 范围内,此线性模型与实际数据之间吻合较好;若超出该范围,则模型精度将随高度的增加逐渐下降。为了得到高、低空都适用的大气折射指数模型,平均大气折射率可用负指数模型来近似^[5]:

$$N(h) = N_0 \cdot e^{-c(h-h_0)} \quad (2)$$

式中, c 为指数衰减系数(1/m); h_0 为地面的海拔高度(m)。此模型对年平均或月平均大气折射率误差很小,一般小于 5 N 单位。

上述两种模型各有适用的区段,但都不能完全表达大气折射率的整个剖面。虽然在不同区段内大气折射率随高程呈线性或负指数变化,但干湿项折射率随高程的变化速度是不同的,所以要将它们分别考虑。

1.2 新对流层折射率模型的提出

基于以上的理论分析,并结合多地区、多时段探空数据,作者提出了大气折射率分段模型。该模型充分考虑了大气折射率随高程变化的特点,将大气从测站地面到测站处的对流层顶分为 3 层:第 1 层是从测站地面到测站上空 1 km 处,该区段取线性模型;第 2 层是地面上空 1 km 处到高程 12 km 处,该区段取指数模型;第 3 层是从高程 12 km 处到测站处的对流层顶,该段取另一种指数模型。这样就可以更精确地描述整个剖面。

干分量折射率公式：

$$N_d(h)=\begin{cases} N_d(h_0)-\Delta N_{d1}\cdot h, & h_0\leqslant h\leqslant h_0+1\,000\text{ m} \\ N_d(h_0+1\,000)\cdot\exp\left[-\alpha_{d1}\frac{h-h_0-1\,000}{\overline{H}_{d1}}\right], & h_0+1\,000\text{ m}<h\leqslant 12\,000\text{ m} \\ N_d(12\,000)\cdot\exp\left[-\alpha_{d12}\frac{h-12\,000}{\overline{H}_{d12}}\right], & 12\,000\text{ m}\leqslant h\leqslant 60\,000\text{ m} \end{cases}\quad (3)$$

由于湿分量变化很大,且随机性强,目前尚没有可靠的模型来进行模拟,本文使用与干分量类

似的公式来对湿分量折射率进行解算：

$$N_w(h)=\begin{cases} N_w(h_0)-\Delta N_{w1}\cdot h, & h_0\leqslant h\leqslant h_0+1\,000\text{ m} \\ N_w(h_0+1\,000)\cdot\exp\left[-\alpha_{w1}\frac{h-h_0-1\,000}{\overline{H}_{w1}}\right], & h_0+1\,000\text{ m}<h\leqslant 12\,000\text{ m} \end{cases}\quad (4)$$

式中,下标 d 和 w 分别代表干项和湿项; $N(h)$ 为海拔高度 h 处的大气折射率(N 单位); $N(h_0)$ 为地面处的大气折射率(N 单位); ΔN_1 为近地 1 000 m 内的折射率梯度(1 N/m); α_1 为地面上空 1 000 m 至海拔 12 000 m 的指数衰减率(1/m); α_{12} 为海拔 12 000~60 000 m 的指数衰减率。 \overline{H}_{d1} 和 \overline{H}_{d12} 分别为各区段均质大气高度的平均值,干项均质大气高可用下式计算：

$$\overline{H}=R_dT/g_m\quad (5)$$

式中, R_d 为干气体常数; g_m 为平均重力; φ 和 h 分别为用户纬度和高程(m); T 为绝对气温(K)。

对于湿项均质大气高,按照 φ 划分为 3 个带^[6]：

$$H_w^\varphi=\begin{cases} 2\,500,0^\circ\leqslant\varphi\leqslant30^\circ \\ 2\,000,\pm30^\circ\leqslant\varphi\leqslant\pm60^\circ \\ 1\,000,\pm60^\circ\leqslant\varphi\leqslant\pm90^\circ \end{cases}$$

因为大气折射指数的年变化很小,模型中各参数可用各地区的年平均和不同季节平均值来求得。

1.3 实例验证

本文利用成都大气探空站(高程 544 m,北纬

32.7°,东经 103.83°)2004 年 7~9 月每天 2 个时次(北京时间 08 时和 20 时)的大气探空数据来对新模型的精度进行验证。不同高度折射率计算公式为：

$$N=N_d+N_w=\frac{77.6P}{T}+\frac{3.73\times10^5e_w}{T^2}\quad (6)$$

$$e_w=A\times10^{\frac{a\times t_d}{b+t_d}}\quad (7)$$

式中, P 和 T 分别为规定层气压和温度; e_w 为水汽压; $A=6.11,a=7.5,b=237.3;t_d$ 为规定层露点温度。

设 $H=h_0$,则用实测数据和新模型计算所得成都每天的大气折射率差值如图 1 所示。其差值中误差见表 1。

表 1 成都大气折射率差值中误差

Tab.1 Mean Square Errors of Tropospheric Refractive Index in Chengdu

	干项/N		湿项/N	
	08 时	20 时	08 时	20 时
7 月	2.36	2.96	4.35	6.27
8 月	2.53	2.43	4.05	5.04
9 月	2.95	2.95	3.65	3.76

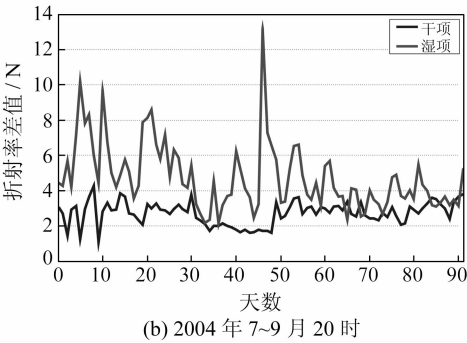
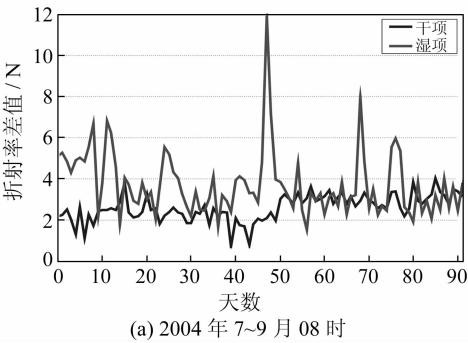


图 1 成都大气折射率差值图

Fig.1 Difference of Tropospheric Refractive Index Model in Chengdu

从图 1 和表 1 中可以看出,新模型对干分量折射率的符合精度明显高于湿分量。对 7~9 月的解算结果进行比较可以看出,干分量符合精度较稳定,随季节、时段的变化较小;而湿分量在 7、8 月(湿度较大)时精度较差,9 月(相对较干燥)时精度又有所提高。而且新模型的湿分量折射率在 08 时的精度比 20 时的精度要高,主要是受大气湿度的影响,这也符合了成都地区降水主要集中在夜间的事实。由新模型计算得出的干分量和湿分量折射率中误差均值分别为 2.7 N 和 4.5 N,说明了新的大气折射率模型具有

$$\begin{aligned} Z_d(H) &= 10^{-6} \cdot \int_H^{h_d} N_d(h)dh = 10^{-6} \cdot \left\{ \int_H^{H+1\,000} [N_d(h_0) - \Delta N_d \cdot (h - h_0)]dh \right. \\ &\quad + \int_{H+1\,000}^{12\,000} N_d(H+1\,000) \cdot \exp\left(-\alpha_{d1} \cdot \frac{h - (H+1\,000)}{\overline{H}_{d1}}\right)dh \\ &\quad \left. + \int_{12\,000}^{H_d} N_d(12\,000) \cdot \exp\left(-\alpha_{d12} \cdot \frac{h - 12\,000}{\overline{H}_{d12}}\right)dh \right\} \end{aligned} \tag{9}$$

湿分量对流层延迟为:

$$\begin{aligned} Z_w(H) &= 10^{-6} \cdot \int_H^{h_w} N_w(h)dh = \\ &10^{-6} \cdot \left\{ 1\,000N_w(h_0) - \Delta N_w \cdot \frac{1}{2} \cdot [(1\,000 + H - h_0)^2 - (H - h_0)^2] + \right. \\ &\quad \left. \left[N_w(h_0 + 1\,000) / \left(\frac{\alpha_{w1}}{\overline{H}_{w1}} \right) \right] \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha_{w1}}{\overline{H}_{w1}} \cdot (h_w - (h_0 + 1\,000))\right) \right] \right\} \end{aligned} \tag{10}$$

式中, h_d 为对流层外边缘的高度(m), $h_d = 40\,136 + 148.72(T - 273.16)$; T 为高程 H 处的绝对气温; $h_w = 12\,000$ m 为对流层湿项的协议高度。

3 实验及结果分析

3.1 实验方法

本文实验所选用的 GPS 站点为中国境内部分 IGS 跟踪站(BJFS、KUNM、LHAS 和 WUHN)和四川连续观测网中的成都站(CHDU)。所采用的数据为各站 2004 年 7~9 月共 9 d 的数据(每隔 10 d 取 1 d 的数据)。实验所用软件为 GAMIT10.2,解算时对流层解算参数个数选为 13,气象条件选取标准大气条件。

由于 GAMIT 软件的对流层天顶延迟参数估计精度优于 ± 1 cm^[11,12],可视成真值,所以本文用上述 3 种模型计算出的对流层天顶延迟值与 GAMIT 软件解算结果进行比较即可求出模型精度。

3.2 结果分析

根据上述解算方法,利用不同模型对实测数据进行解算,其各测站对流层天顶延迟解算结果见图 2。可以看出, Saastamoinen 模型与 Hopfield 模型在各站的对流层天顶延迟解算精度都很接近,其差值约为 ± 3 mm。新模型与 Saas-

很高的精度。

2 对流层延迟改正模型的提出

根据得到的对流层大气折射率模型,对信号路径进行积分就可以得到站点处的对流层延迟值。公式如下:

$$Z(H) = Z_d(H) + Z_w(H) = 10^{-6} \int_H^{H_d} N_d(h)ds + 10^{-6} \int_H^{H_w} N_w(h)ds \tag{8}$$

干分量对流层延迟为:

tamoinen、Hopfield 模型在 BJFS 和 WUHN 站精度相当,约为 ± 4 cm,但随着测站高程的增加,新模型的精度逐渐好于其他两种模型。在 CHDU、KUNM 和 LHAS 站,新模型的精度均约为 ± 4 cm,而 Saastamoinen 和 Hopfield 模型各站的精度分别为 ± 5 cm、 ± 8 cm 和 ± 10 cm,其主要原因可能是由于 Saastamoinen 和 Hopfield 模型中不同高程处的气象参数推算不准确造成的。

4 结论与建议

1) 新大气折射模型对干分量折射率符合较好(2.7N),也较稳定,而湿分量由于其随机性强等特点,目前还不能很好地进行模拟。2) 利用实测数据对新模型与 Saastamoinen 模型和 Hopfield 模型进行比较,结果表明,在测站高程较小的情况下,它们的精度相当(± 4 cm);随着高程的增大,新模型的精度要逐渐高于这两种模型。

在实际应用中,为了获得更精确的结果,需做好以下几项工作。

- 1) 精确测定地面的气象参数。本模型所需参数为地面测定的气温 T 、气压 P 和水汽压 e_w 。
- 2) 需要精确测定大气层各层面的气压和温度等参数用来更精确地计算各项递减率等。

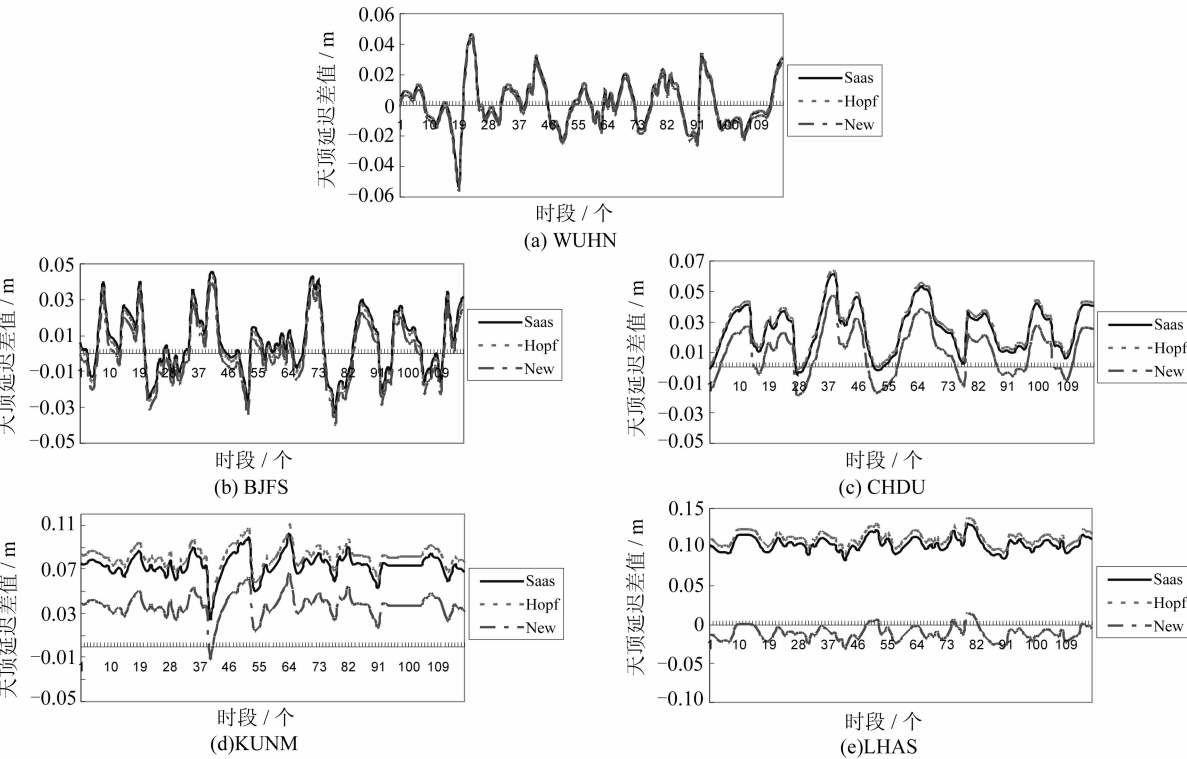


图 2 各测站不同模型所得天顶延迟差值
Fig. 2 Differences of Tropospheric Zenith Delay of Three Models

参 考 文 献

[1] Henk K B, van der Marel H, van der Hoeven A G A. Integrated Atmospheric Water Vapor Estimates from a Regional GPS Network[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(D3): 4 025-4 033

[2] 欧吉坤. GPS 测量的中性大气折射改正的研究[J]. 测绘学报, 1998, 27(1): 31-36

[3] 杨力. 大气对 GPS 测量影响的理论与研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001

[4] 黄捷. 无线电测速定位的对流层电波传播误差[J].

电波与天线, 1973(3/4): 10-28

[5] Emardson T R, Derks H J P. On the Relation Between the Wet Delay and the Intergrated Precipitable Water Vapour in the Eurpeian Atmosphere[J]. Meteorol Applications, 1998, 7: 61-68

[6] 张瑜. 大气折射率干项引起电波折射误差的简便算法[J]. 中国空间科学技术, 1999(5): 67-70

第一作者简介: 殷海涛, 博士, 主要从事 GPS 高精度测量的理论与应用研究。
E-mail: yinhaitao121@163.com

New Model for Tropospheric Delay Estimation of GPS Signal

YIN Haitao^{1,2} HUANG Dingfa¹ XIONG Yongliang¹ WANG Guiwen³

(1 Dept. of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, 111 Erhuan Road, Chendu 610031, China)
(2 Earthquake Adminstration of Shandong Province, 20 East Wenhua Road, Jinan 250014, China)
(3 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: A new tropospheric zenith delay model is proposed based on a 3-layer partition of atmosphere and real observation data from regional GPS network are used for the performance testing. It is shown that the accuracy of tropospheric delay estimation are better in CHDU, KUNM and LAHS stations using the proposed model than Hopfield and Saastamoinen models.

Key words: GPS; troposphere; refraction index; improved tropospheric zenith delay model