

基于地基 GPS 与 MODIS 遥感影像的 映射函数与大气可降水汽分析

蒋光伟¹, 王 利², 张秀霞³

(1. 国家测绘局 大地测量数据处理中心, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 地质工程与测绘学院,
陕西 西安 710054; 3. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了提高短期和中小尺度灾害性天气可降水汽预报的准确性和实时性, 利用西安地基 GPS 数据和 MODIS 遥感影像, 采用 NMF、GMF 和 VMF1 映射函数设计了 4 种获取天顶干延迟初始值的方案, 探讨了映射函数对计算天顶总延迟的影响。结果表明: 在卫星高度角为 10° 时, VMF1 映射函数反演效果和精度最佳, GMF 映射函数次之, NMF 映射函数最弱; 而在卫星高度角为 15° 时, 上述 3 种映射函数效果相当。最后, 结合综合水汽含量与可降水汽的关系, 通过计算地基 GPS 和 MODIS 遥感影像综合水汽含量, 得到了地基 GPS 和 MODIS 遥感影像可降水汽 ($P_{PWV-GPS}$, $P_{PWV-MODIS}$), 并拟合了二者之间的线性关系, 结果为 $P_{PWV-MODIS} = 1.421 7 P_{PWV-GPS} - 2.143$, 相关系数为 0.952 1。

关键词: 天顶总延迟; 映射函数; 地基 GPS; MODIS 遥感影像; 综合水汽含量; 可降水汽

中图分类号: P49; P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2010)04-0436-05

Analysis of Mapping Function and Atmospheric Precipitable Water Vapor Based on Ground GPS and MODIS Remote Sensing Image

JIANG Guang-wei¹, WANG Li², ZHANG Xiu-xia³

(1. Geodetic Data Processing Center, State Bureau of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Geology Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
3. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract In order to improve the accuracy and real-timing for forecasting precipitable water vapor of disastrous weather in mesoscale and microscale, ground GPS data and MODIS remote sensing image in Xi'an were used to design four schemes for obtaining the original value of zenith dry delay with NMF, GMF and VMF1 mapping functions, and the effect of mapping function on calculating zenith total delay was discussed. The results showed that when the elevation of satellite was 10° , retrieval effect and precision of VMF1, GMF and NMF mapping functions were best, middle and weak, respectively; however, the three mapping functions were considerable when the elevation of satellite was 15° . Finally, integrate water vapors of ground GPS and MODIS remote sensing image were calculated, and then precipitable water vapors ($P_{PWV-GPS}$, $P_{PWV-MODIS}$) were calculated according to the relationship between integrate and precipitable water vapors; the relationship of precipitable water vapor between ground GPS and MODIS remote sensing image were fitted into linear function $P_{PWV-MODIS} = 1.421 7 P_{PWV-GPS} - 2.143$, and the related coefficient was 0.952 1.

Key words: zenith total delay; mapping function; ground GPS; MODIS remote sensing image; integrate water vapor; precipitable water vapor

0 引言

水汽在全球气候系统、天气动力系统、气候灾害监测、水文学及空间大地测量等领域占有重要地位,

目前常规水汽探测手段不能及时有效覆盖一个地区, 严重制约相关学科的发展。地基 GPS^[1] 作为新型的大气探测技术, 通过高覆盖率的地基 GPS 网, 提供大范围、时间和空间高分辨率的水汽信息, 可有

收稿日期: 2010-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点基金项目(40534021); 中国地质调查局项目(1212010914015); 国家自然科学基金项目(40802075; 40902081)

作者简介: 蒋光伟(1985-), 男, 陕西西安人, 工学硕士, 从事 GPS 气象以及高精度 GPS 数据处理研究。E-mail: jgw_1985@163.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

效弥补传统探测技术在时间和空间分辨率上的不足; 目前已成为水汽探测的重要手段。为了利用 GPS 获取更多的水汽信息, 通常采取降低卫星高度角的方法; 然而, 当降低卫星高度角时, GPS 水汽的计算受到很多误差的影响。比如, 不同映射函数对天顶总延迟的影响, 若不能有效削弱或去除这些误差, 则会影响解算水汽含量的精确度。因此, 研究映射函数对天顶总延迟的影响对于掌握水汽的变化有重要意义。

笔者利用降低卫星高度角到 10° 的 GPS 数据, 分析了不同映射函数对天顶总延迟的计算影响, 同时针对地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的大气可降水汽(Precipitable Water Vapor, P_{PWV})等数据, 研究融合和统一这两类数据的方法, 拟合其线性关系。

1 相关函数模型

1.1 大气延迟函数

当信号通过大气层时, 由于大气水汽的存在, 会使信号发生传播延迟和路径弯曲。对于一个来自天顶方向的信号, 假定大气是球形对称的, 那么大气天顶总延迟 D_{ZTD} (Zenith Total Delay)^[2-3] 可表示为

$$D_{ZTD} = \int_{H_0}^H (n - 1)dh = 10^{-6} \int_{H_0}^H Ndh \quad (1)$$

式中: H_0 和 H 分别表示在地球中心投影坐标中接收信号点高于大地水准面的高程和对流层高于大地水准面的高程; N 为大气折射率; n 为大气折射指数; h 为信号延迟。1974 年 Thayer 给出了 N 的经验计算公式^[2-3]

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} Z_d^{-1} + k_2 \frac{P_w}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{P_w}{T^2} Z_w^{-1} \quad (2)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 都为折射常数, 由 Bevis 等^[4] 给出常数值; P_d 、 P_w 为干洁空气和水汽的偏压; T 为开尔文绝对温度; Z_d^{-1} 和 Z_w^{-1} 分别为干洁空气和水汽的逆向压缩因子。因此, 对于 GPS 接收机站点上的路径延迟 $S(z)$ 可表示为

$$S(z) = f_d(z)d_d + f_w(z)d_w \quad (3)$$

式中: d_d 为由干洁空气引起的静力延迟; d_w 为由水汽分子引起的天顶湿项延迟; z 为地面接收机卫星高度角; f_d 、 f_w 分别为天顶静力延迟、天顶湿延迟与斜距延迟之间的转换函数, 即映射函数。

1.2 映射函数模型

常用的映射函数有 MIT、NMF、GMF、VMF1。其中 NMF 映射函数是 Niell 应用位于北纬 75° 到南纬 43° 范围内 26 个全球分布的探空气球资料, 采用

美国标准大气模式, 中北纬一些地区 (15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75°) 冬季 (1 月) 和夏季 (7 月) 的温度和相对湿度的轮廓线, 建立的只与测站地理位置和观测日期相关的连分式系数。NMF 映射函数考虑了南北半球和季节性的非对称性, 在干投影项包括了测站与高程有关的改正, 反映了大气密度的空间分布。Boehm 等^[5] 在 2006 年通过提取欧洲中期天气预报中心提供的初始角 3.3° 的折射率资料, 利用射线跟踪算法得到全球 $2.5^\circ \times 2.0^\circ$ 分辨率的每 6 h 格网点的干湿映射函数系数, 建立了 VMF1 映射函数^[5-6]; 相比于 NWF 映射函数, VMF1 映射函数是经纬度的函数, 对经度有一定敏感性。GMF 映射函数是 Boehm 等^[5] 采用 3 年的月平均气象剖面简化 VMF1 映射函数发展而来的, 是年积日、经度、纬度、高程的函数, 更易于在软件中实现。

MIT、NMF、GMF、VMF1 映射函数都是基于连分式, 主要区别在于干湿项系数的确定是基于不同的模型与数据得出的。MIT、NMF、VMF1 映射函数 $f(\varphi)$ 可以统一表示为^[2]

$$f(\varphi) = \frac{1 + t_1}{\sin \varphi + t_2} \quad (4)$$

式中: $t_1 = \frac{a}{1 + t_{11}}$; $t_{11} = \frac{b}{1 + c}$; $t_2 = \frac{a}{\sin \varphi + t_{22}}$; $t_{22} = \frac{b}{\sin \varphi + c}$; t_1 、 t_2 、 t_{11} 、 t_{22} 为中间变量; φ 为卫星高度角; a 、 b 、 c 分别为干湿项系数, 可由气压、温度、相对湿度计算得到。

2 映射函数对计算天顶总延迟的影响

天顶总延迟的精度直接影响着可降水汽、综合水汽含量(Integrte Water Vapor, I_{wv})的精度^[7-9]。若在低高度时, 天顶干延迟没有完全被估计而估计天顶湿延迟, 会引起水汽计算的不准确和大地高的位置误差。有必要采用更为准确、动态的低高度角映射函数来计算天顶总延迟和水汽含量。因此, 利用西安地区 2008 年 7 月连续 12 d 的 GPS 观测数据和 4 个辅助站数据, 采用 GAMIT 10.34 软件, 在计算时考虑大气荷载的影响, 分 4 种方案提供先验的天顶干延迟, 计算绝对天顶延迟^[10]。其中, 在 7 月 4 日 (年积日 186 d) 下雨时, 研究了映射函数对计算天顶总延迟的影响。

方案 1: 卫星高度角分别为 15° 和 10° , 采用 VMF1 映射函数和欧洲中期天气预报中心提供的先验天顶干延迟。

方案 2: 卫星高度角分别为 15° 和 10° , 采用

VMF1 映射函数和全球气压温度(GPT)模型^[1]提供的先验天顶干延迟。

方案 3: 卫星高度角分别为 15° 和 10° , 采用 GMF 映射函数和 GPT 模型提供的先验天顶干延迟。

方案 4: 卫星高度角分别为 15° 和 10° , 采用 NMF 映射函数和 GPT 模型提供的先验天顶干延迟。

由于西安地裂缝布置的网点位分布比较近, 因此选择西安北郊的点 XA00 来反映西安地区的天顶总延迟变化, 数据采样间隔为 30 s, 实验结果如图 1、2。

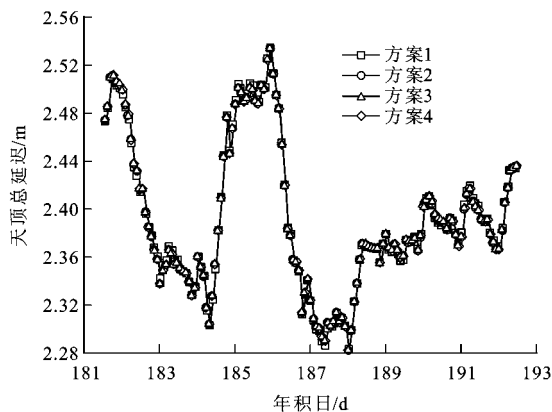


图 1 点 XA00 在高度角为 15° 时 4 种方案的天顶总延迟

Fig. 1 Zenith Total Delay of Four Schemes at the Site XA00 When Elevating Angle was 15°

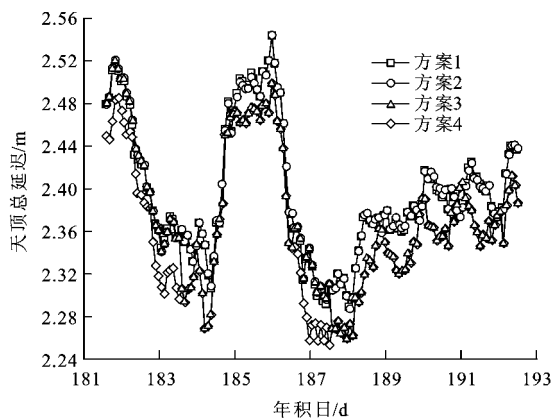


图 2 点 XA00 在高度角为 10° 时 4 种方案的天顶总延迟

Fig. 2 Zenith Total Delay of Four Schemes at the Site XA00 When Elevating Angle was 10°

从图 1 可以看出, 在卫星高度角为 15° 时, 4 种方案计算的天顶总延迟趋势趋于一致, 互差性很小。而从图 2 可以看出, 在卫星高度角为 10° 时, 4 种方案的主要差别为:

(1) 方案 1 与方案 2 趋势一致, 相差不大, 说明在卫星高度角较低时, VMF1 映射函数起主要作用, 而天顶总延迟的动态初始值效果不显著, 对最终

的天顶总延迟不起主要作用。

(2) 方案 3 与方案 1、2 总体趋势一致, 天顶总延迟略小于方案 1、2, 但在 186 d (雨天) 时出现了明显的不同; 而从 188 d 到 192 d 总体趋势又趋于一致。结合图 3~5 可以看出, 西安北部水汽变化比较频繁, 大量集聚, 导致在某些时段, 方案 3 总体趋势出现了异常。主要原因有: GMF 映射函数没有考虑大气的瞬时变化, 而 VMF1 映射函数考虑了。在一定程度上, 如果没有近实时的映射函数, GMF 映射函数可以替代 VMF1。

(3) 方案 4 与方案 1~3 在天顶总延迟上出现较大差异, 尤其是在 186 d (雨天), 浮动比较大; 方案 4 的总体趋势较方案 1、2 有较大幅度的变化, 但与方案 3 总体趋势一致。主要原因有: 在 186 d (雨天), 水汽变化剧烈, 而从 188 d 到 192 d, 虽然没有下雨但水汽变化相对频繁。

(4) 方案 3、4 的 GMF 和 NMF 映射函数值都是近实时值。如果水汽变化剧烈频繁, 在卫星高度角较低时, 映射函数对水汽反演的差别有显著差别。NMF 映射函数最不敏感, GMF 映射函数次之, 而 VMF1 映射函数很敏感。主要原因有: VMF1 映射函数是近实时的, 而 GMF 和 NMF 映射函数都是年平均性的, 同时 GMF 映射函数在天顶总延迟上接近于方案 1、2。因此, VMF1 映射函数是首选, GMF 映射函数是备选。

3 地基 GPS 和 MODIS 遥感影像可降水汽的线性关系

为了融合地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽, 增加其空间分布, 为层析对流层提供更多的空间格网点, 这里重点分析这两类可降水汽的差异性和相关性。笔者首先获取 2008 年 7 月 5 日~10 日的 MODIS 遥感影像水汽产品 MOD05 数据^[1214], 计算 MODIS 遥感影像综合水汽含量。地基 GPS 的综合水汽含量计算流程为: 首先利用高精度软件 GAMIT 10.34 求得天顶总延迟, 然后由野外记录数据求出天顶干延迟, 接着计算天顶湿延迟, 最后将天顶湿延迟转化为综合水汽含量。每个 GPS 站点的地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的综合水汽含量 (I_{WV-GPS} , $I_{WV-MODIS}$) 及其比值结果见表 1。

可降水汽与综合水汽含量的关系可表达为

$$P_{PWV} = \frac{I_{WV}}{\rho} \quad (5)$$

式中: ρ 为水的密度 (kg/m^3)。图 3~5 分别为 MODIS

表 1 基于地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的综合水汽含量及其比值

Tab. 1 Integrate Water Vapors of Ground GPS and MODIS Remote Sensing Image and Their Ratio				
时间	GPS 站点名	$I_{\text{WV-GPS}}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$I_{\text{WV-MODIS}}/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$I_{\text{WV-MODIS}}/$ $I_{\text{WV-GPS}}$
2008-07-05 11: 35	XJ01	2. 607 213	3. 289 124	1. 261 548
	XJ07	2. 551 733	3. 332 347	1. 305 915
	XJ08	2. 554 690	3. 332 685	1. 304 536
	XJA1	2. 490 755	3. 323 210	1. 334 218
	XJA5	2. 522 928	3. 288 588	1. 303 481
2008-07-06 12: 20	XJ07	1. 854 883	2. 407 439	1. 297 893
	XJ08	1. 892 113	2. 407 599	1. 272 439
	XJ13	1. 972 725	2. 442 491	1. 238 131
	XJA1	1. 783 608	2. 383 346	1. 336 250
	XJA5	1. 881 363	2. 515 484	1. 337 054
2008-07-07 11: 20	XJ04	2. 994 763	4. 136 689	1. 381 308
	XJ13	3. 051 973	4. 182 647	1. 370 473
	XJA1	2. 960 177	4. 180 869	1. 412 371
	XJA2	3. 299 720	4. 203 241	1. 273 817
	XJA5	2. 978 413	4. 261 212	1. 430 699
2008-07-08 12: 05	XJA6	2. 769 910	4. 115 489	1. 485 784
	XJ04	3. 039 870	3. 656 512	1. 202 851
	XJ13	2. 932 420	3. 691 528	1. 258 867
	XJA6	2. 851 150	3. 713 149	1. 302 334
2008-07-09 11: 10	XJ03	3. 010 845	4. 170 240	1. 385 073
	XJ06	2. 955 947	4. 159 233	1. 407 073
	XJA3	2. 826 079	4. 044 261	1. 431 050
	XJA4	3. 364 390	4. 203 853	1. 249 514
	XJA6	3. 007 241	4. 156 831	1. 382 274
2008-7-10 11: 55	XJ02	3. 258 330	4. 463 423	1. 369 85
	XJ03	3. 283 730	4. 463 692	1. 359 336
	XJ04	2. 960 480	4. 482 523	1. 514 120
	XJ06	3. 161 030	4. 485 428	1. 418 977
	XJA3	3. 007 090	4. 407 982	1. 465 863
	XJA4	3. 413 270	4. 490 760	1. 315 677

遥感影像反演的 7 月 6 日(188 d)、7 月 8 日(190 d)、7 月 10 日(192 d)可降水汽。

基于表 1 的 30 个综合水汽含量数据和公式(5), 计算得到地基 GPS 与 MODIS 遥感影像的可降水汽($P_{\text{PWV-GPS}}$, $P_{\text{PWV-MODIS}}$), 进而拟合得到他们之间的线性关系(图 6)。结果表明: 地基 GPS 与 MODIS 遥感影像的可降水汽相关系数为 0. 952 1, 标准偏差为 2 mm, 斜率偏差为 0. 08。地基 GPS 与 MODIS 遥感影像的可降水汽线性关系可表示为

$$P_{\text{PWV-MODIS}} = 1. 421 7 P_{\text{PWV-GPS}} - 2. 143 \quad (6)$$

从表 1 和图 3~6 可以得出以下认识:

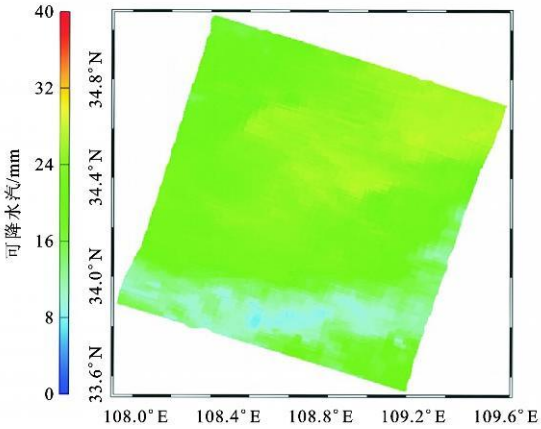


图 3 2008 年 7 月 6 日 12: 20 MODIS 遥感影像近实时可降水汽

Fig. 3 Near Real Time Precipitable Water Vapor of MODIS Remote Sensing Image in July 6th 2008

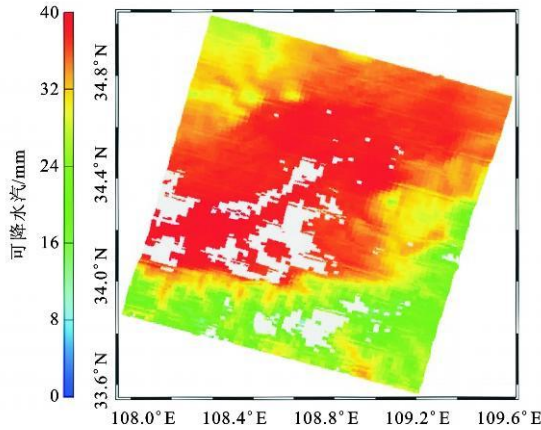


图 4 2008 年 7 月 8 日 12: 05 MODIS 遥感影像近实时可降水汽

Fig. 4 Near Real Time Precipitable Water Vapor of MODIS Remote Sensing Image in July 8th 2008

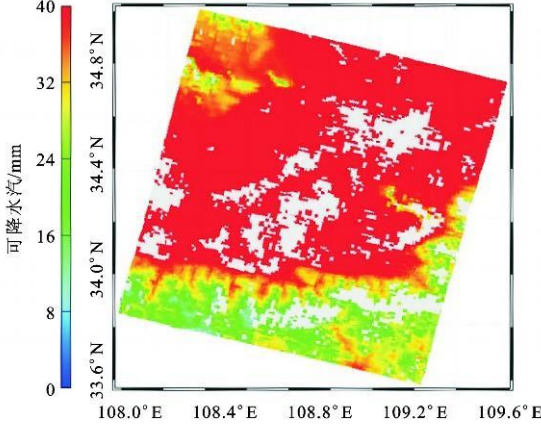


图 5 2008 年 7 月 10 日 11: 55 MODIS 遥感影像近实时可降水汽

Fig. 5 Near Real Time Precipitable Water Vapor of MODIS Remote Sensing Image in July 10th 2008

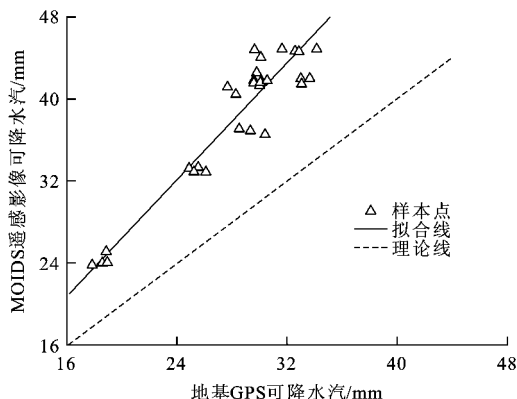


图 6 基于地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽的线性关系

Fig. 6 Linear Relationship of Precipitable Water Vapor Between Ground GPS and MODIS Remote Sensing Image

(1)地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽时空变化趋势一致。MODIS 遥感影像的近红外产品提供了大面积的水汽空间分布数据; 每天 1 次的水汽分布数据能够用于研究水汽的时空分布和气候特征。

(2)MODIS 遥感影像的综合水汽含量要比地基 GPS 的偏大, 两者比值的平均值为 1.347。MODIS 遥感影像的综合水汽含量是卫星过境时刻的大气水汽值, 而计算地基 GPS 的综合水汽含量时, 假定水汽变化随时间呈线性变化, 采用每 2 h 估计 1 次对流层参数, 同时计算天顶干延迟时使用野外气象观测记录数据, 引入一定的误差, 因此造成上述比值的平均值可能不准确。

(3)地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽呈线性关系, 相关性很显著, 但标准偏差偏大, 拟合线与理论线偏差较大。其主要原因有: 计算地基 GPS 的可降水汽时含有野外观测误差; 计算由天顶湿延迟转换到可降水汽的转换系数时插值算法带有误差。若有更加精确的可降水汽样本和无线电探空气象资料则可以拟合更为准确的关系。

4 结语

(1)卫星高度角较低时, 映射函数对计算天顶总延迟有一定影响; 相对于 GMF 和 NMF 映射函数, VMF1 映射函数更符合实际大气变化; 如果需要快速求出大气延迟值, 可用 GMF 映射函数替代 VMF1 映射函数。

(2)通过对地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽关系的初步研究, 确定了两者的线性转

换关系, 为地基 GPS 和 MODIS 遥感影像水汽产品的融合提供参考价值。但该转换关系存在的主要问题有: 由天顶湿延迟转换到可降水汽的转换系数的年周期变化没有考虑进来; 考虑大气规律、更为精确地对任意点的地基 GPS 和 MODIS 遥感影像的可降水汽进行插值有一定难度。

(3)随着 GPS 综合服务网的建立, 中国对地基 GPS 遥感水汽的研究日益重视。深入挖掘 GPS 水汽探测网潜在的数据资源以及相关的水汽资源, 进行多元水汽数据融合, 为天气预报提供准确可靠的初始湿度场以及为相关领域提供强大的数据支持, 将逐步成为一个研究热点。

参考文献:

- [1] 李国平, 黄丁发. GPS 气象学研究及应用的进展与前景[J]. 气象科学, 2005, 25(6): 651-661.
- [2] 曲建光. GPS 遥感气象要素的理论与应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [3] 赵峰. 近实时 GPS 水汽自动处理系统的初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [4] Bevis M, Businger S, Chiswell S et al. GPS Meteorology: Mapping Zenith Wet Delays onto Precipitable Water[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 33(3): 379-386.
- [5] Boehm J, Schuh H. Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: 277-281.
- [6] Kouba J. Implementation and Testing of the Gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1)[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(4/5): 193-205.
- [7] 张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. 基于 IGS 超级跟踪站的近实时 GPS 气象研究及应用[J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 93-95.
- [8] 曲伟菁, 朱文耀, 宋淑丽, 等. 三种对流层延迟改正模型精度评估[J]. 天文学报, 2008, 49(1): 113-122.
- [9] 曲建光, 吴壮. 从 GPS 推算大气水汽的误差分析[J]. 测绘工程, 2001, 10(4): 24-26.
- [10] 宋淑丽, 朱文耀. 区域 GPS 网实时计算可降水量的若干问题[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2003, 24: 20-27.
- [11] Boehm J, Heinkelmann R, Schuh H. A Global Mode of Pressure and Temperature for Geodetic Application[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(10): 679-683.
- [12] 霍艾迪, 康相武, 刘志丽, 等. 利用 MODIS 数据反演沙漠化地区地表温度的简化模式——以陕西北部地区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2009, 31(3): 306-311.
- [13] Gao B C, Goetz A F H. Column Atmospheric Water Vapor and Vegetation Liquid Water Retrievals from Airborne Imaging Spectrometer Data[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(D4): 3549-3564.
- [14] Gao B C, Kaufman Y J. The MODIS Near-IR Water Vapor Algorithm[EB/OL]. (2009-06-05) [2009-11-20]. http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/atbd_mod03.pdf.