

## 基于我国沿海GPS站点数据提取天顶水汽含量的方法对比研究

卢勇夺<sup>1</sup>, 刘思晗<sup>1</sup>, 王朝阳<sup>2</sup>, 周东旭<sup>2</sup>, 燕丹晨<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 10001; 2. 国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘 要:** 基于我国沿海地基GPS数据与海洋站气象数据, 利用相关干对流层模型、湿对流层模型等, 提取了东海沿海北茭、崇武2个GPS站天顶水汽含量, 并与MODIS水汽产品数据做对比分析。结果表明: Elgered干对流层模型与Beivs湿对流层模型组合而成的提取方法较好, 其平均偏差小于0.50 mm、均方根误差小于5.10 mm, 其结果检验了沿海GPS提取水汽含量的可行性与有效性。

**关键词:** GPS; 海洋站; 水汽含量; Bernese

**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2016)02-0016-06

### 1 引言

水汽是大气层重要的动态物理参数, 其对云层、降水的形成及演变具有显著效应, 亦是海-气相互作用的重要因子, 在海洋气象、海洋环境预报等方面发挥着不可或缺的角色。全球定位系统(GPS)、北斗等导航定位系统在气象学上的应用与研究越来越广泛。国内外多位学者利用陆基GPS开展了提取大气水汽含量的研究<sup>[1-4]</sup>, 已逐步成为陆地大气监测的重要手段。但现有的GPS水汽提取主要针对大陆地区GPS站, 较少涉及沿海、海上GPS站<sup>[1]</sup>, 针对我国沿海地区GPS站的水汽提取研究则更为缺失, 因此其相关研究工作一定程度上是我国沿海GPS海洋、气象监测应用的基础。本文以我国东海沿海地基GPS数据和同步海洋站气象实测数据为基础, 结合卫星遥感理论和MODIS水汽数据, 开展我国沿海GPS水汽提取分析, 研究适合我国东部沿海的GPS水汽提取方法。

### 2 GPS数据处理与方法

当GPS发出的电磁信号穿过大气对流层时, 会受到对流层大气折射的影响, 发生信号延迟<sup>[5]</sup>。对流层延迟包含两部分: 一部分主要是由大气水汽引起, 称为湿对流层延迟; 另一部分由氮、氧等水汽以外的气体引起, 这部分延迟被称为干对流层延迟。湿对流层延迟(Zenith Wet Delay, ZWD)与信号传播路径上的大气水汽含量或可降水量(Precipitable Water, PW)近似成正比关系, 其关系公式可表示为:

$$PW = F \cdot ZWD \quad (1)$$

$$F = \frac{10^6}{u \cdot R_v \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2 - w \cdot k_1 \right)} \quad (2)$$

式中:  $F$ 为转换因子,  $u$ 为水的密度,  $R_v$ 为水汽常量,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 为大气折射因子,  $w$ 为水汽分子与干空气分子的质量比,  $T_m$ 为对流层加权平均温度,  $T_m$ 与地面温度存在一定关系, 可通过某种模型求解得到, 常见 $T_m$ 模型有Bevis模型<sup>[6]</sup>、毛节泰(Mao)模型<sup>[7]</sup>

收稿日期: 2015-03-13

基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201105017); 中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金课题(KLOCAW1410)

作者简介: 卢勇夺(1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋遥感信息提取与应用研究和数据管理应用平台开发等。

E-mail: luyd@nmefc.gov.cn

等,另外 $F$ 常取经验值0.15<sup>[8]</sup>。通过物理变换,将湿对流层分量延迟转化成大气水汽含量。

干对流层延迟(Zenith Dry Delay, ZDD)与气压、温度等因素有关,可利用某种干对流层模型求解得到,干对流层模型有Saastamoinen模型<sup>[9]</sup>、Hopfield模型<sup>[10]</sup>、Black模型<sup>[11]</sup>及Elgered模型<sup>[12]</sup>等。其具体形式分别如下:

$$ZDD_s = 0.227 \frac{P_s}{1 - 0.0026 \cos(2\varphi) - 0.00028H} \quad (3)$$

$$ZDD_H = 1.552(40.082 + 0.14898(T_s - 273.16) - H) \frac{P_s}{T_s} \quad (4)$$

$$ZDD_B = 0.2343(T_s - 4.12) \frac{P_s}{T_s} \quad (5)$$

$$ZDD_E = (2.2779 \pm 0.0024) \frac{P_s}{1 - 0.00266 \cos(\varphi) - 0.00028H} \quad (6)$$

式(3)—(6)中: $P_s$ 表示GPS站点地面气压, $\varphi$ 表示GPS站点纬度, $H$ 表示GPS站点海拔高度, $T_s$ 表示GPS站点地面绝对温度。

GPS对流层延迟(Zenith Total Delay, ZTD)可通过Bernese处理软件解算得到,其与干对流层延迟、湿对流层延迟的关系可以表示为:

$$ZTD = ZDD + ZWD \quad (7)$$

通过式(1)—(6)分别求解得到GPS天顶水汽含量。

我国沿海GPS观测系统由分布于我国沿海海岸及部分岛屿上数十个海洋站点组成,为我国沿海可降水量提取及台风监测奠定了基础。考虑到我国沿海台风受灾情况与GPS站点数据连续情况,我们选取2013年6—10月我国东部沿海的北茭、崇武GPS站天顶延迟及气温、气压等数据开展水汽提取分析研究。由于我国沿海海洋站尚未有连续观测的无线电探空仪、水汽辐射计等资料,本文选取了已广泛应用的MODIS水汽产品作为检验分析GPS PW的参考值,其空间分辨率为5 km,产品精度约为5 mm。本文以平均偏差(Bias)、均方根误差(RMS)、相关系数(Corr)等作为评价因子。

为研究分析不同水汽提取方法对GPS PW的影响,本文利用GPS对流层延迟数据ZTD计算GPS PW时,干对流层模型采用了Saastamoinen模型、Hopfield模型、Black模型及Elgered模型等,湿对流

层模型(模型)采用了常数模型( $F=0.15$ )、Bevis模型及Mao模型等。

### 3 分析结果与讨论

基于2013年6—10月北茭、崇武GPS对流层延迟及气象数据,本文采用不同水汽含量提取方法求解GPS水汽含量PW,并与MODIS PW比对分析,以检验分析不同水汽提取方法的可行性与有效性,相关结果见表1、表2、表3。

从表1可见,在Tm为常数模型下,采用不同干

表1 Tm为常数2013年6—10月北茭与崇武GPS PW与MODIS PW对比结果

沿海GPS站点	干对流层模型	平均偏差/mm	均方误差/mm	相关系数
北茭	Saastamoinen	-3.75	5.83	0.759 4
	Hopfield	-7.34	4.27	0.870 6
	Black	-6.80	4.46	0.857 3
	Elgered	-3.28	4.89	0.825 4
崇武	Saastamoinen	-4.22	4.42	0.823 3
	Hopfield	-7.14	3.88	0.884 7
	Black	-6.79	3.51	0.905 4
	Elgered	-3.88	3.95	0.859 5

表2 Bevis Tm模型2013年6—10月北茭与崇武GPS PW与MODIS PW对比结果

沿海GPS站点	干对流层模型	平均偏差/mm	均方误差/mm	相关系数
北茭	Saastamoinen	-0.03	6.11	0.757 7
	Hopfield	-4.13	4.21	0.874 3
	Black	-3.50	4.47	0.857 6
	Elgered	0.42	5.03	0.820 2
崇武	Saastamoinen	-0.42	4.54	0.822 9
	Hopfield	-3.84	3.86	0.897 3
	Black	-3.39	3.58	0.912 4
	Elgered	-0.09	4.02	0.858 2

表3 Mao Tm模型2013年6—10月北茭与崇武GPS PW与MODIS PW对比结果

沿海GPS站点	干对流层模型	平均偏差/mm	均方误差/mm	相关系数
北茭	Saastamoinen	0.11	6.13	0.757 4
	Hopfield	-4.01	4.21	0.874 4
	Black	-3.37	4.47	0.857 6
	Elgered	0.56	5.04	0.819 8
崇武	Saastamoinen	-0.28	4.55	0.822 8
	Hopfield	-3.72	3.86	0.897 7
	Black	-3.26	3.59	0.912 6
	Elgered	0.06	4.02	0.858 1

对流层模型求解得到的 GPS PW 与 MODIS PW 均有较好的相关性, 相关系数均大于 0.76, 崇武站

GPS PW 大于 0.82, 是由于崇武站与 MODIS 数据空间匹配更好造成的; 其均方根误差 (RMS) 较小, 约

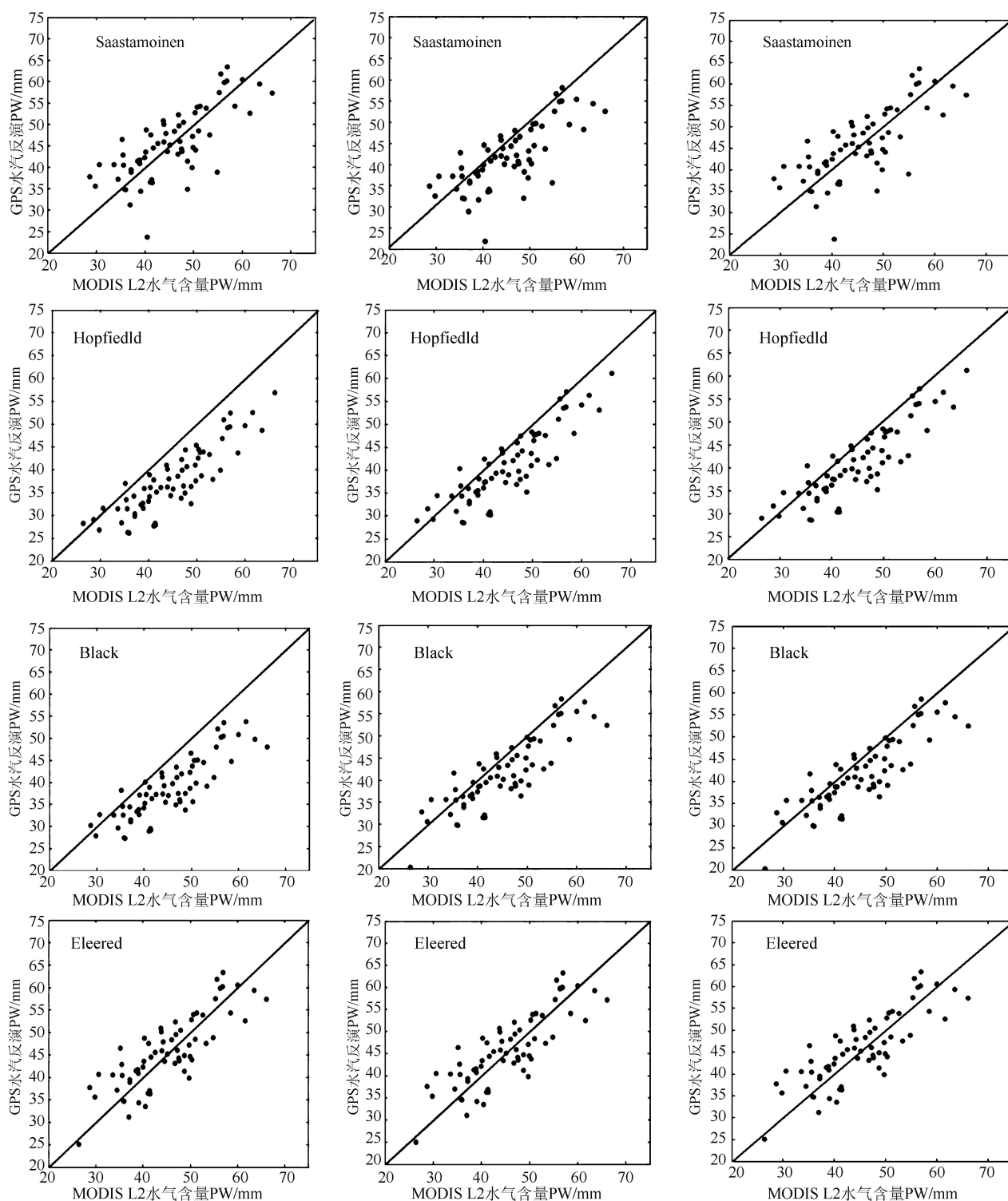


图1 北茭海洋站 GPS PW 与 MODIS L2 PW 之间对比散点图

(左侧一列 Tm 为常数, 中间一列为 Bevis Tm 模型, 右侧一列为 Mao Tm 模型)

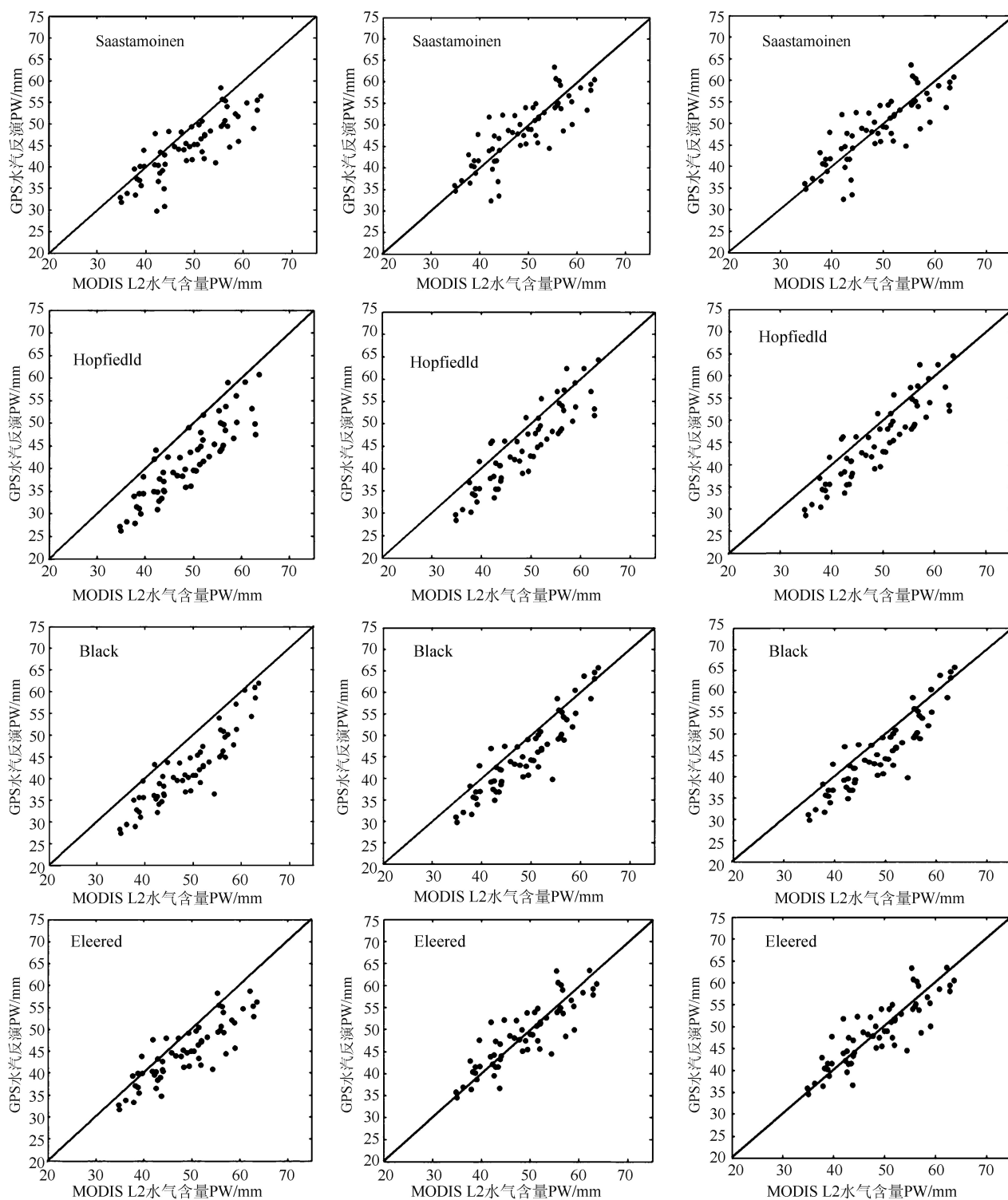


图2 崇武海洋站GPS PW与MODIS L2 PW之间比对散点图

(左侧一列 $T_m$ 为常数,中间一列为Bevis  $T_m$ 模型,右侧一列为Mao  $T_m$ 模型)



为 4.50 mm 反映了不同模型提取的 GPS PW 与 MODIS PW 精密性较好。但不同于对流层模型求解得到的 GPS PW 与 MODIS L2 PW 的平均偏差差别较大, Hopfield 模型最大, 约为 7.00 mm, Black 模型次之, Elgered 模型最小, 约为 3.50 mm, 且均为负值, 反映了利用  $T_m$  为常数求解 GPS PW 时可能存在系统偏差, 可能是因为该模型未考虑气温、气压变化对大气水汽含量的动态影响。从表 2、3 可见, 在湿对流层 Bevis  $T_m$  模型与 Mao  $T_m$  模型下, 不同于对流层模型求解得到的 GPS PW 相关结果与  $T_m$  为常数模型存在较好的相似性。

表 1、2、3 结合可见, 利用不同湿对流层  $T_m$  模型求解的 GPS PW 与 MODIS PW 对比结果不甚相同。以干对流层模型 Hopfield 为例,  $T_m$  为常数模型求解得到的 GPS PW 平均偏差最大, 约为 7.00 mm, Bevis  $T_m$  模型与 Mao  $T_m$  模型 GPS PW 平均偏差较小, 均为 4.00 mm 左右, 均为负值, 反映 Hopfield 模型求解 GPS PW 可能存在系统偏差; 同一干对流层模型下, 不同  $T_m$  模型的 GPS PW 均方根误差 (RMS) 差别较小, 均为 4.00 mm 左右; 图 1、图 2 分别给出了北茭、崇武 GPS PW 与 MODIS PW 之间比对散点图。从图中可以看出, 2013 年 6—10 月北茭、崇武两站  $T_m$  为常数模型与不同于对流层模型结合求解得到的 GPS PW 整体上较 MODIS PW 偏小, 但其散点分布相对集中, 表 1 GPS PW 与 MODIS PW 的平均偏差与均方根误差亦说明了这一点, Bevis  $T_m$  与 Mao  $T_m$  模型求解得到的散点基本对角线两侧分布集中。从图 1、图 2 还可以看出: Hopfield 和 Black 模型下与不同  $T_m$  模型结合求解得到的 GPS PW 整体上比 MODIS PW 偏小, 散点分布相对集中, 表 1、2、3 GPS PW 与 MODIS PW 的平均偏差和均方根误差亦能说明这一点, Saastamoinen 模型散点相对分散, Elgered 模型散点对角线两侧集中分布。

综上所述, 不同于对流层模型与湿对流层模型相组合求解得到的 GPS PW, 与 MODIS PW 相比, 其平均偏差、均方根误差与相关系数存在一定差异。Hopfield 模型与  $T_m$  为常数模型组合求解得到的 GPS PW 平均偏差最大, 大于 7.10 mm, 其均方根误差约为 4.30 mm, 初步判定其模型组合存在一定系统偏差, 未考虑气温等因素对水汽提取的影响;

Saastamoinen 模型与湿对流层模型组合求解的 GPS PW 平均偏差较小, 但均方根误差较大, 分布相对发散; Black 模型与湿对流层模型组合求解的 GPS PW 均方根误差较小, 分布相对集中, 但平均偏差较大; Elgered 模型与 Bevis 模型组合求解的 GPS PW 平均偏差较小, 其值小于 0.6 mm, 均方根误差约为 4.00 mm, 分布较为集中, 整体而言, 沿海 GPS 站点水汽含量提取宜这一模型组合。

## 4 结论与展望

利用我国东部沿海北茭与崇武海洋站 GPS 站 2013 年 6—10 月监测的天顶对流层延迟数据和气象数据等, 采用不同水汽含量提取方法求解 GPS PW, 并与 MODIS PW 进行比对分析, 检验了 GPS 不同水汽含量提取方法求解的 GPS PW 的可行性与有效性, 得到如下结论:

(1) 不同于对流层模型对 GPS PW 均方根误差影响不大, 但对 GPS PW 平均偏差具有较为显著影响。与 MODIS PW 相比, Hopfield 模型求解的 GPS PW 平均偏差最大, Black 模型平均偏差次之, Elgered 模型平均偏差最小;

(2) 不同湿对流层模型的 GPS PW 平均偏差存在一定差异, 但均方根误差区别不大, Bevis  $T_m$  模型与 Mao  $T_m$  模型 GPS PW 平均偏差较小;

(3) 不同水汽含量提取方法求解得到的 GPS PW 平均偏差、均方根误差存在一定差异, 整体而言, Elgered 模型与 Bevis 模型组合而成的水汽含量提取方法平均偏差、均方根误差均较小, 适于我国东部沿海 GPS 水汽提取;

在下一步研究中, 我们将开展湿对流层模型加权平均温度的本地化订正研究, 以进一步提高 GPS PW 的提取精度, 为 GPS 海洋气象研究、应用等提供参考。

## 参考文献:

- [1] Xu G R, Cui C G, Wan R, et al. Applicability of Methods for Estimating GPS Precipitable Water in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2012, 89: 76-82.
- [2] 张化疑, 刘焱雄, 周兴华, 等. 渤海区域对流层加权平均温度研究[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(4): 1-2.

- [3] 李国平. 地基GPS遥感大气可降水量及其在气象中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [4] 何平, 徐宝祥, 周秀骥, 等. 地基GPS反演大气水汽总量的初步试验[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 179-183.
- [5] 丁金才. GPS气象学及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 11-18.
- [6] 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.
- [7] 毛节泰, 李建国. 使用GPS系统遥感中国东部地区水汽分布——原理和回归分析[C]//全球定位系统——气象学(GPS / MET)研究论文汇编. 北京: 中国气象局国家卫星气象中心, 1997.
- [8] 刘焱雄, 陈永奇. 地基GPS技术遥感香港地区大气水汽含量[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(3): 245-248.
- [9] Saastamoinen J. Contributions to the Theory of Atmospheric Refraction. Part II. Refraction Corrections in Satellite Geodesy[J]. Bulletin G od sique (1946-1975), 1973, 107(1): 13-34.
- [10] Hopfield H S. Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range: Prediction from Surface Weather Data[J]. Radio Science, 1971, 6(3): 357-367.
- [11] Black H D, Eisner A. Correcting Satellite Doppler Data for tropospheric Effects[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(D2): 2616-2626.
- [12] Elgered G, Davis J L, Herring T A, et al. Geodesy by Radio Interferometry-Water Vapor Radiometry for Estimation of the Wet Delay[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(B4): 6541-6555.

## Extracting methods comparison of zenith precipitable water from China's coastal GPS station data

LU Yong-duo<sup>1</sup>, LIU Si-han<sup>1</sup>, WANG Zhao-yang<sup>2</sup>, ZHOU Dong-xu<sup>2</sup>, YAN Dan-chen<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China;

2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061 China)

**Abstract:** Based on GPS data and marine station meteorological data along China coastal sea, the dry tropospheric model and wet troposphere delay model, the zenith PW at Bei Jiao and Chong Wu GPS stations located in the East China Sea coast was extracted and compared with water vapor data from MODIS. The results showed that, assembly of Elgered's dry tropospheric delay model and Bevis' wet troposphere delay model could be better. The smallest Bias was less than 0.50 mm and RMS was less than 5.10 mm, which verified the extracting PW from China coastal GPS data.

**Key words:** ground-based GPS; marine station; precipitable water; Bernese