

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.01.014

联合地基 GNSS 及空基 GNSS 掩星探测水汽三维分布

吴昊¹, 鄂盛龙¹, 夏朋飞², 许海林¹, 罗颖婷¹, 谭理庆²

(1. 广东电力科学研究院, 广州 510080;
2. 武汉大学 GNSS 技术研究中心, 武汉 430072)

摘要: 研究了联合地基 GNSS 和空基 GNSS 掩星观测的大气水汽探测方法。首先, 利用 COSMIC(气象、电离层、气候星座观测系统)和 GRACE(重力恢复与气候实验)无线电掩星产品对对流层层析成像的几个关键技术进行了优化, 标定了对流层干延迟模型, 建立了新的大气加权平均温度模型, 提出了一种新方法用于确定水汽层层顶(即对流层层析模型的顶部边界)。选择香港地区 12 个连续 GNSS 气象监测站 2017 年 6 月份的数据反演计算了水汽的三维分布, 以探空站的水汽密度为真值, 统计层析反演结果与真值之间的偏差为: 偏差平均值优于 $1.36\text{g}/\text{m}^3$, RMS 值优于 $1.70\text{g}/\text{m}^3$ 。

关键词: GNSS; 无线电掩星; 水汽; 层析; 水汽层层顶

中图分类号: V19

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)01-0092-06



Remote Sensing the Atmospheric Water Vapor Using Observations from the Ground-based GNSS Network and Space-based Radio Occultation

WU Hao¹, E Sheng-long¹, XIA Peng-fei², XU Hai-lin¹, LUO Ying-ting¹, TAN Li-qin²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;
2. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: This study focus on the retrieval of atmospheric water vapor by jointly using ground-based GNSS and space-based occultation observations. First of all, several key techniques of tropospheric tomography are optimized using COSMIC (The Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) and GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) occultation products. The tropospheric hydrostatic delay model is calibrated, a new atmospheric weighted mean temperature model is built, and a new method is proposed to determine the top of water vapor, namely the top boundary of troposphere tomographic model. GPS datasets collected over June 2017 in Hong Kong are used to invert the 3D distribution of water vapor. And the water vapor density product of the 45004 sounding station is considered as the true value. Compared with the radiosonde, the Mean and RMS of differences between water vapor densities derived from tomography and radiosonde are better than $1.36\text{g}/\text{m}^3$ and $1.70\text{g}/\text{m}^3$, respectively.

收稿日期: 2018-11-27; 修订日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41904025); 国家 973 计划(2012CB957701); 广东电网公司科技项目(GDKJXM20173972)

作者简介: 吴昊(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事 GNSS 高精度数据处理以及电力设备在线监测与诊断方面的研究。

E-mail: wh_dky@163.com

Key words: GNSS; GNSS radio occultation; Water vapor; Tomography; Top of water vapor

0 引言

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)能够有效地服务于全球导航与定位,此外,GNSS 技术又扩展到全球气候监测与极端天气的预报^[1-3]。目前,利用 GNSS 技术探测地球大气已成为国内研究的热点之一^[1-5]。作为一种新的大气探测手段,GNSS 技术能够准实时、无需人为干扰、全天候地服务大气科学的研究^[6-10]。根据观测模式的不同,GNSS 探测技术可以分为空基 GNSS 技术和地基 GNSS 技术^[8-10]。空基 GNSS 掩星技术能够提供高垂直分辨率、高精度、全球覆盖的中性大气层到电离层的多级大气剖面产品。然而,受制于卫星星座的分布及数量,目前空基掩星技术还无法实时地服务于全球数值天气预报模式^[10]。

地基 GNSS 系统探测大气是利用平差的方法从观测数据中估算出天顶对流层延迟(Zenith Tropospheric Delay,ZTD),将其作为研究对流层大气的背景场。通常 ZTD 可以分为 2 个部分,即天顶对流层干延迟(Zenith Hydrostatic Delay,ZHD)和天顶对流层湿度延迟(Zenith Wet Delay,ZWD)。ZWD 中含有大气水汽的信息,因此,利用一定的数学模型可以从 ZWD 中反演出大气水汽的分布^[8-10]。

为了提高 GNSS 技术探测大气水汽分布的质量,文中试图利用无线电掩星产品辅助地基 GNSS 技术反演水汽三维分布信息。对流层天顶干延迟模型、湿度转换因子以及层析模型上边界的高度是影响层析结果的 3 个关键的参数。首先,根据无线电掩星提供的高垂直分辨率的大气产品标定了对流层干延迟模型;然后,建立新的区域性大气加权平均温度模型,提高了湿度转换因子的精度;最后,根据掩星提供的大气产品确定了水汽层层顶,将其作为层析模型的上边界层。利用香港地区 2017 年 6 月份的数据进行试算和分析,反演结果验证了上述方法的可行性。

1 标定对流层干项延迟及湿度转换因子

与对流层湿项延迟相比,对流层干项变化较为平稳,通过建立经验模型可以较为精确的估算。国

内外研究者建立了许多全球或区域性的天顶对流层干延迟经验模型。其中,较为常用的主要包括如下 3 个:Saastamoinen 模型、Hopfield 模型和 Black 模型^[11-13]。然而,经典的对流层干延迟模型存在着系统性的偏差,可以利用高精度的气象产品对其进行修正,如探空和掩星产品。利用高精度气象产品估算 ZHD 的数学公式如下^[9]

$$\text{ZHD} = \frac{10^{-6} \cdot \sum_{i=0}^{i=n-1} (N_{h_i}^d + N_{h_{i+1}}^d)}{2} \quad (1)$$

$$N^d = k_1 R_d \cdot \rho = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + \frac{k_1 \cdot R_d}{R_w} \cdot \frac{P_w}{T} \quad (2)$$

其中, k_1 为常数,其经验值通常取为 $k_1 = 77.6 \text{K/mbar}$; P_d 为大气干压强; P_w 为大气水汽压; T 为温度; R_d 和 R_w 分别为干普适气体常数和湿普适气体常数。

选取 2007—2016 年中六月份与香港地区共址的 COSMIC (The Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 和 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 掩星事件,将 wetPrf 产品利用式(1)和式(2)的计算结果分别与三种经典 ZHD 模型的计算结果进行了比较,其统计结果如表 1 所示。

表 1 掩星产品计算的 ZHD 与经典 ZHD 模型计算的 ZHD 的差

Tab. 1 Bias of ZHD between radio occultation-derived and ZHD models-derived cm

	Max	Min	Mean	RMS
SAAS-ROZHD	1.97	-0.35	0.76	0.93
HOPF-ROZHD	0.64	-5.39	-2.79	2.96
BLA-ROZHD	4.91	3.34	3.86	4.07

从表 1 可以看出,将无线电掩星产品估算的 ZHD(ROZHD) 视为参考值,三种经验模型与参考值之间都存在一定的偏差。其中,Sasstamoinen 模型估算的 ZHD (SAAS) 与参考值之间的偏差优于 0.93cm,这个精度远远高于 Hopfield 模型和 Black 模型估算的 ZHD(HOPE 和 BLA)。此外,HOPF 的精度要优于 BLA。为了提高 ZHD 的估算精度,文中试图利用 Hopfield 模型的表达形式来修正 Sasstamoinen 模型。

$$\Delta \text{ZHD} = a \cdot (b + c \cdot (T - 273.16) - h_0) \cdot \frac{P}{T} \quad (3)$$

这里, a 、 b 和 c 为区域性标定模型的系数。通过 2007—2016 年 6 月份与香港地区共址的 COSMIC 和 GRACE 掩星产品来估算这 3 个参数。精确获取 ZHD 后, 便可从 ZTD 中分离出 ZWD, 利用湿度转换因子便可得到大气水汽含量, 而湿度转换因子是关于大气加权平均温度的函数^[14-15]

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \cdot \frac{R}{m_w} \cdot \left[\frac{k_3}{T_m} + k_2 - \frac{m_w}{m_d} \cdot k_1 \right]} \quad (4)$$

$$T_m = \frac{\int_{h_0}^{\infty} \frac{P_w}{T} dh}{\int_{h_0}^{\infty} \frac{P_w}{T^2} dh} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n-1} \left(\frac{P_w^i}{T_i} + \frac{P_w^{i+1}}{T_{i+1}} \right) (h_{i+1} - h_i)}{\sum_{i=0}^{i=n-1} \left(\frac{P_w^i}{T_i^2} + \frac{P_w^{i+1}}{T_{i+1}^2} \right) (h_{i+1} - h_i)} \quad (5)$$

其中, ρ_w 为水的密度, 且 $\rho_w = 10^3 \text{ kg/m}^3$; k_1 、 k_2 、 k_3 都为常数, 取值分别为 $k_1 = 77.6 \text{ K/hPa}$, $k_2 = 70.4 \text{ K/hPa}$, $k_3 = 3.739 \times 10^5 \text{ K/hPa}$; m_d 和 m_w 分别为干和湿大气的摩尔质量, 取值分别为 $m_d = 28.96 \text{ kg/kmol}$, $m_w = 18.02 \text{ kg/kmol}$; R 表示普适气体常数, 取值为 $R = 8314 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$ 。

根据所选取的香港地区 2007—2016 年的 COSMIC 和 GRACE 无线电掩星产品 (RO), 利用式 (5) 便可估算出大气加权平均温度 T_m , 建立二阶拟合关系如图 1 所示。

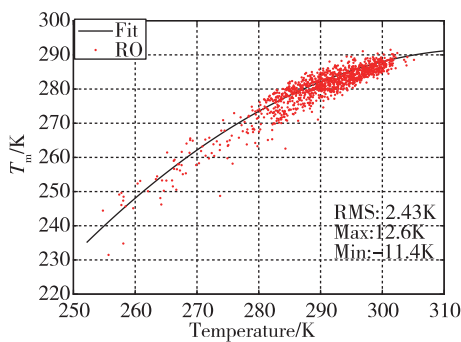


图 1 大气加权平均温度二阶拟合图

Fig. 1 Second-order fitting of atmospheric weighted average temperature

从图 1 可以看出, 利用二阶模型拟合的大气加权平均温度模型与掩星产品获得的 T_m 具有较好的一致性, 二者偏差的 RMS 值优于 2.43K。图 1 拟合出的结果便为相关地区大气加权平均温度的模型

$$T_m = -0.01364 \cdot T_s^2 + 8.639 \cdot T_s - 1076 \quad (6)$$

式中, T_s 表示地表处的大气温度。

为了检验新的 T_m 模型的精度, 文中将 45004

探空测站 2017 年的探空产品利用式 (5) 计算获得的 T_m 作为真值。此外, 文中又分别评估了 Bevis 模型^[16] ($T_m = 70.2 + 0.72T_s$) 及 Wang^[17] 等香港区域性模型 ($T_m = 113.29 + 0.5863T_s$) 计算的 T_m 与探空资料估算 T_m 的差值, 如表 2 所示。

表 2 模型估算的 T_m 与真值的差值

	Bias of T_m between models-derived and radiosonde-derived			K
	Max	Min	Mean	
NTm	7.19	-3.70	2.65	2.94
BTm	8.92	-4.86	3.24	3.88
WTm	8.66	-4.45	3.01	3.27

表 2 显示了新的模型 (NTm) 估算的结果要明显优于 Bevis 模型结果 (BTm) 和 Wang 模型结果 (WTm)。新的模型与真值之间的偏差的 RMS 值优于 2.94K, 偏差的变化幅度为 $[-3.70, 7.19]$ 。

2 新的确定水汽层层顶的方法

层析网格划分的上下限的高度是从地面到对流层顶。实际上, 从某个高度到对流层顶的区域中水汽密度接近于 0^[9]。由于其值太小, 在实际的反演过程中得到的反演结果通常出现负值或异常值。为了提高对流层层析的精度, 有学者定义了某个低于对流层顶的高度作为层析的上限高, 并命名为水汽层层顶^[9-10], 将其作为水汽反演的上限高度。为了精确地确定水汽层层顶的高度, 本文提出了一种新的方法确定水汽层层顶。

在某个高度 h 上的大气可降水量 PWV_h 可以表示为水汽密度的积分

$$PWV_h = \frac{1}{\rho_w} \int_0^{\infty} \rho_k(h) dh$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \rho_w} \sum_{i=0}^{i=n-1} (\rho_k^i + \rho_k^{i+1}) (h_{i+1} - h_i) \quad (7)$$

其中, ρ_w 表示液态水密度; ρ_k 表示水汽密度。

则在垂直方向上, PWV 呈现近似高斯指数函数分布

$$PWV_h = PWV_0 \cdot e^{-\left(\frac{h-h_0}{H}\right)^2} \quad (8)$$

其中, PWV_0 为地表处的 PWV ; H 为大气层等效高度。

通过对式 (8) 求导, 便可得到不同高度处的斜率 K_h

$$K_h = \tan(\alpha) = \frac{-2 \cdot PWV_0 \cdot (h - h_0)}{H^2} \cdot e^{-\left(\frac{h-h_0}{H}\right)^2} \quad (9)$$

理论上,当 K_h 接近为 0 时,便对应为水汽层层顶的高度。为了确定水汽层层顶的高度,需要找到合适的 K_h 。本文定义当 $\alpha = 179.9^\circ$ 时对应的高度为水汽层层顶。通过香港地区 2007—2016 年 6 月份的掩星反演产品计算出香港地区水汽层层顶高度的变化,如图 2 所示。

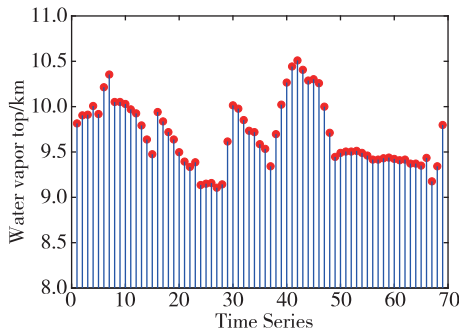


图 2 利用掩星产品定义的香港地区水汽层层顶高度随时间变化的规律

Fig. 2 Determining the water vapor top using radio occultation products in Hong Kong

从图 2 可以看出,香港地区 6 月份水汽层层顶变化范围为 9.0km~10.6km。为了方便计算,文中求取水汽层层顶的平均值 9.5km 作为香港地区 6 月份的水汽层层顶。

3 试验分析

选取香港地区 12 个连续气象监测站 2017 年 6 月份的观测数据进行试算。利用 Bernese 5.2 软件进行处理获取天顶对流层延迟 ZTD,基于式(3)对 Sasstamoinen 模型进行改正后得到 ZHD,然后从 ZTD 中分离出 ZWD。根据式(6)估算的大气加权平均温度代入式(4)中来获取湿度转换因子。选用 Niell 投影函数将 ZWD 投影到斜路径方向上 SWD 后,利用湿度转化因子将 SWD 转换为斜路径水汽含量 SWV。把研究的香港地区在水平方向上划分 $5 \times 5 = 25$ 个网格,如图 3 所示。在垂直方向上,0.8km 以下每 400m 划分一层,共 2 层;在 0.8km~8.6km 以上每 600m 划分一层,共 13 层;8.6km~9.5km 划分一层,故垂直网格共划分成 16 个网格,则总网格为 $16 \times 5 \times 5 = 400$ 个。选取 Flores 提出的经典的对流层层析方法,便可反演出水汽的三维

分布信息。

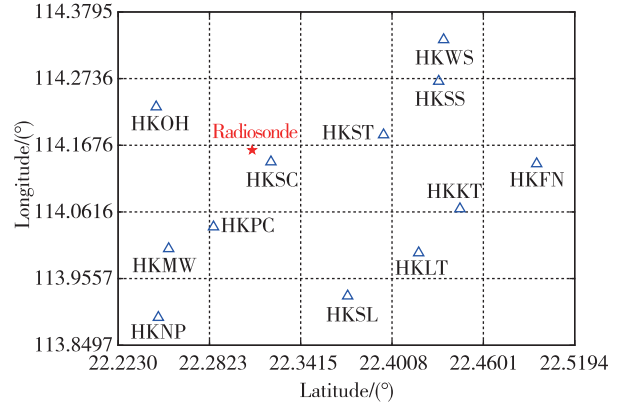


图 3 水平方向层析网格划分及测站的分布

Fig. 3 Horizontal distribution of GNSS stations and the division of voxels

根据上述的数据处理方式,每 0.5h 输出一次结果。限于篇幅,图 4 仅仅给出了第 160d 的处理结果。

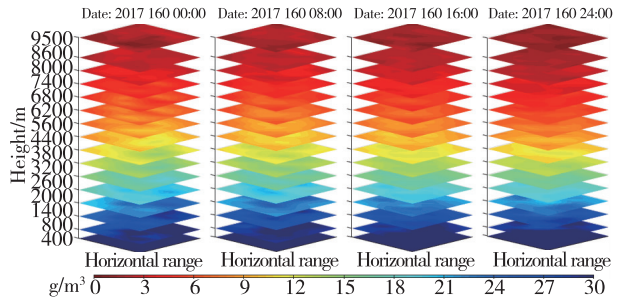


图 4 水汽的三维分布信息

Fig. 4 3D distribution of water vapor

由图 4 可以看出,2017 年第 160d 的水汽主要集中在 5km 以下,而在 5km 以上水汽含量较少。随着时间的变化,0.8km~5km 处的水汽密度发生较为明显的变化。为了检验优化后的层析结果,文中又利用传统的层析方法反演出对流层水汽密度值。将 45004 探测站的观测产品作为真值分别检验优化后的层析结果 (Opti) 和传统的层析结果 (Trad),如图 5 所示。

由图 5 可以看出,层析反演的水汽密度值与探空产品的变化趋于一致。当水汽密度在空间上存在逆增层的情况下,层析水汽技术不能很好地反演出这种情况;Opti 结果要稍好于 Trad。此外,从图 5 中还可以看出,Opti、Trad 与 Radiosonde 在 5km 以上符合性较好,在 5km 以下差距较大。为了统计

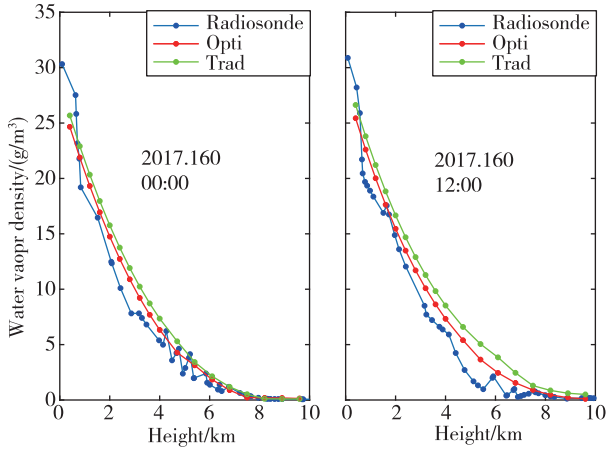


图5 层析结果与探空产品比较

Fig. 5 Statistical results between Opti & Trad and Radisonde

层析技术估算的水汽密度与探空水汽密度值之间的差距,文中分段分别统计了2017年6月份5km以下和5km以上的层析水汽值与探空水汽值的差值,如表3所示。

表3 Opti和Trad与Radiosonde偏差统计图

Tab. 3 The statistical results between Opti & Trad and Radisonde

高程/km		Below 5	Above 5
Mean/(g/m ³)	Radiosonde-Opti	2.18	0.54
	Radiosonde-Trad	3.47	0.73
RMS/(g/m ³)	Radiosonde-Opti	2.62	0.77
	Radiosonde-Trad	3.86	0.98

由表5可以看出,在5km以下由于存在递增层现象,故Opti、Trad与Radiosonde的偏差较大,而在5km以上偏差较小。Opti与Trad相比,在5km以下精度提高了1.24g/m³,在5km以上提高了0.22g/m³。

4 结论

利用无线电掩星产品辅助地基GNSS探测大气水汽的空间分布。针对对流层层析过程中3个关键技术进行优化:1)利用无线电掩星历史资料标定传统的Sasstamoinen干延迟模型,并建立了区域性大气加权平均温度模型,提高湿度转换因子的精度;2)精确地估算了水汽层层顶的高度,将其作为层析网格的上边界层。选取了香港地区12个监测站2017年6月份的观测数据进行试算,将反演的结果与探空产品进行比较和统计,验证了优化后层析方法的可行性和有效性。

致谢 非常感谢香港特别行政区地政署测绘局提供的GNSS观测数据及气象观测数据。非常感谢UCAR提供的COSMIC和GRACE掩星观测产品。

参考文献

- [1] Flores A, Rius A, Ruffini G. 4D tropospheric tomography using GPS slant wet delays[J]. *Annales Geophysicae*, 2000, 18: 223-224.
- [2] 叶世榕, 江鹏, 刘炎炎. 地基GPS网层析水汽三维分布数值积分方法[J]. *测绘学报*, 2013, 45(5): 654-660.
- [3] Ye Shirong, Jiang Peng, Liu Yanyan. A water vapor tomographic numerical quadrature approach with ground-based GPS network [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5): 654-660 (in Chinese).
- [4] 于胜杰, 柳林涛. 利用选权拟合法进行GPS水汽层析解算[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2012, 37(2): 183-186.
- [5] Yu Shengjie, Liu Lintao. Application of fitting method by selection of parameter weights on GPS water vapor tomography [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(2): 183-186 (in Chinese).
- [6] Notarpietro R, Cucca M, Gabella M. Tomographic reconstruction of wet and total refractivity fields from GNSS receiver networks [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 898-912.
- [7] Notarpietro R, Gabella M, Perona G. Tomographic reconstruction of neutral atmospheres using slant and horizontal wet delays achievable through the processing of signal observed from small GPS networks [J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2008, 40(2): 63-74.
- [8] Nilsson T, Gradinarsky L. Water vapor tomography using GPS phase observation: simulation results [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2927-2941.
- [9] Champollion C, Masson F, Bouin M N, et al. GPS water vapor tomography: preliminary results from the ESCOMPTE field experiment [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 74(1-4): 253-274.
- [10] Ye S, Xia P, Cai C. Optimization of GPS water vapor tomography technique with radiosonde and COSMIC historical data [J]. *Annales of Geophysics*, 2016, 34(9): 1-11.

- [9] Xia Pengfei, Ye Shirong, Jiang Peng, et al. Assessing water vapor tomography in Hong Kong with improved vertical and horizontal constraints[J]. *Annales of Geophysics*, 2018, 36(4): 969-978.
- [10] Xia P, Cai C, Liu Z. GNSS troposphere tomography based on two-step reconstructions using GPS observations and COSMIC profiles[J]. *Annales of Geophysics*, 2013 31(10): 1805-1815.
- [11] Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites [M]// *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. American Geophysical Union (AGU). Monograph, 1972: 247-251.
- [12] Hopfield H S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range prediction from surface weather data[J]. *Radio Science*, 1971, 6(3): 357-367.
- [13] Black H D. An easily implemented algorithm for the tropospheric range correction[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1978, 83(B4): 1825-1828.
- [14] Liu Y, Chen Y. Improving accuracy of near real-time precipitable water vapor estimation with the IGS predicted orbits[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(16): 411-413.
- [15] 陈永奇, 刘焱雄, 王晓亚, 等. 香港实时 GPS 水汽监测系统的若干关键技术[J]. *测绘学报*, 2007, 36(1): 9-13.
Chen Yongqi, Liu Yanxiong, Wang Xiaoya, et al. GPS real-time estimation of precipitable water vapor Hong Kong experiences[J]. *Acta Geodaetica et Arthrographica Sinica*, 2007, 36(1): 9-13(in Chinese).
- [16] Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (D14): 15787-15801.
- [17] Wang X, Song L, Dai Z, et al. Feature analysis of weighted mean temperature T_m in Hong Kong[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2011(3): 47-52.