

Assessment of ECMWF / NCEP Analysis and Forecast Data with GPS ZTD in China

Qinming Chen^{1,2}, Shuli Song¹, Wenyao Zhu¹, Weijing Qu^{1,2}

Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, China, 200030
 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, 100039
 Email: qmchen@shao.ac.cn

Abstract: The global positioning system (GPS) zenith tropospheric delay (ZTD) from Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) is compared with the ZTD derived from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the United States National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data and NCEP meteorological forecast data. The results show that: relative to GPS ZTD 1) the root mean square (RMS) and bias of ZTD deduced from ECMWF data is 2.43cm and -1.05cm; 3.30cm and -0.85cm for the ZTD deduced from NCEP data; 6.70cm and 2.59cm for the ZTD deduced from NCEP prediction data, the maximum value of the bias and RMS are 11.2 cm and 12.7cm respectively. 2) The ZTD series are calculated by integral with ECMWF/NCEP layered data and SAASTAMOINEN model with surface data, and the results show that the accuracy of the integral is better than that of the SAASTAMOINEN model method. These results provide the foundation of the accuracy and feasibility for establishing the ZTD prediction model over China area with ECMWF and NCEP data.

Keywords: GPS; tropospheric zenith delay; CMONOC; ECMWF; NCEP; SAASTAMOINEN

利用 GPS ZTD 检验 ECMWF/NCEP 分析和预报资料在中国地区的适用性

陈钦明^{1,2}, 宋淑丽¹, 朱文耀¹, 曲伟菁^{1,2} 1. 中国科学院上海天文台, 上海, 中国, 200030 2.中国科学院研究生院,北京, 中国, 100039 Emsil: gmchen@shao.ac.cn

摘 要:利用中国地壳运动观测网络(CMONOC)GPS 实测对流层天顶延迟(ZTD),与利用欧洲中 期气象预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)再分析(reanalysis)气象数据和NCEP 预报数据计算的ZTD进行比较,结果表明:1)与实测的ZTD相比,ECMWF计算ZTD的bias和RMS 分别为-1.05cm和2.43cm;NCEP计算ZTD的bias和RMS分别为-0.85cm和3.30cm;NCEP预报数据 计算的ZTD的bias和RMS分别为2.59cm和6.70cm,最大值为11.2 cm和12.7cm。2)在利用ECMWF 或NCEP数据计算ZTD时,分别采用分层积分法和SAASTAMOINEN模型计算法,计算结果显示, 分层积分法明显优于SAASTAMOINEN模型计算法。这些结果为研究应用ECMWF和NCEP数据模制 中国地区对流层天顶延迟预报模型的可行性和精度提供了一定的依据。

关键词: GPS,对流层天顶延迟,中国地壳运动监测网,ECMWF,NCEP,SAASTAMOINEN

1 引言

大气层由电离层和中性大气层组成,两者对 GPS 观测值都有较大的延迟影响。前者的影响在天顶方向

可以达到十几米,在高度角为5°时可超过50米,但 利用电离层的色散效应,可以采用双频改正方法计算 电离层延迟从而得到改正。中性大气分为平流层和对 流层,由于80%的延迟发生在对流层,因此常将发生 在中性大气中的信号延迟统称为对流层延迟,中性大 气对GPS信号的延迟从天顶方向到接近地面为2米到 20米左右,延迟改正不当对定位的影响大概为10米,

^{*}项目资助:国家自然基金青年基金项目(10603011),上海市启明星项目(05QMX1462),国家高技术研究发展计划863项目

⁽²⁰⁰⁹AA12Z307)和 2009 中国科学院上海天文台知识创新工程青年基金项目(5120090304)

Global Navigation Satellite System: Technology Innovation and Application



无法用双频观测来改正,因此需要研究中性大气对导航和定位的影响。^[1]

国内外很多研究人员曾采用气象数据计算出来的 ZTD 来验证用地基 GPS 实测的 ZTD,发现基本上吻合 ^[2,3,4,5],证明了 GPS 观测值计算 ZTD 的可行性和可 靠性。目前有研究开始采用高精度的 GPS 实测 ZTD 反过来验证一些气象观测系统所测气象资料的可靠性 ^[6, 7, 8]。如 H.Vedel, K.S.Mogensen 和 X.-Y.Huan 采用 International GPS Service (IGS) 的 150个 GPS 台站观 测值计算出来的 ZTD 进行了季节和气候方面的研究, 发现 GPS ZTD 和用气象参数计算出来的 ZTD 有较高 的相关性,特别是用无线电探空仪测的气象参数计算 出来的 ZTD。认为 GPS ZTD 是数值天气预报 (NWP) 的一个新的资料来源,可以用在 NWP 模型验证和预 报上^[2]。为了评估全球数据同化系统(GDAS)的数值 天气模型(NWM)在实时导航上的可行性, Constantin-Octavian Andrei 和 Ruizhi Chen 采用了全球 分布的 18个 IGS GPS 台站观测值计算出的 ZTD 对用 NWM 计算出的 ZTD 进行了验证,发现两者 ZTD 残 差值的 RMS 为 3 厘米, 偏差值最大达到 4.5 厘米。认 为 GDAS 系统中 NWM 模型计算的 ZTD 的精度能满 足 GPS 导航的需要^[6]。

目前 ECMWF/NCEP 向全球提供高分辨率的格网 再分析(reanalysis)和预报的气象数据,评估它们在 卫星导航应用中模制 ZTD 和信号斜路径延迟的可行 性和所能达到的精度,特别是在中国地区给出合理地 评估,具有重要的实用意义。本文利用 CMONOC 中 的 28 个 GPS 基准站 2004 年实测 ZTD 来验证 ECMWF/NCEP 的再分析气象数据和 NCEP 预报气象 数据计算的 ZTD,评估了它们在中国地区模制卫星导 航定位中对流层天顶延迟改正的可行性和所能达到的 精度,为建立用于中国地区卫星导航定位的中性大气 天顶延迟改正模型打下基础。

2 数据介绍

本文中用到的 ECMWF 再分析数据有分层气象数 据和地面气象数据,数据的时间分辨率为 6 小时,每 天 0, 6, 12, 18 时有气象参数值,平面分辨率为 0.5 °×0.5°的格网。分层数据每个格网点上有 60 层的数 据,包括海拔高度、温度、比湿和气压等;地面数据 有地面气压,2 米露点温度,2 米温度。^[9]本文用到的 数据纬度范围是从北纬 15°到 54.5°,经度范围是东 经 70°到 139.5°。

NCEP 再分析数据平面分辨率为 2.5°×2.5°,时 间分辨率与 ECMWF 数据一致。分层数据包括各层的 气压、温度、位势高度、比湿和地面位势高度,分层 气压和分层位势高度有 17 层,比湿有 8 层。地面数据 包括地面温度、气压、相对湿度和地面位势高度。^[10] 本文用到的数据纬度范围是北纬 15°到 55°,经度范 围是东经 70°到 140°。NCEP 预报数据主要是地面 气象数据:平均海平面气压,地面 2 米露点温度和地 面位势高度。范围、时间分辨率和空间分辨率都和 NCEP 再分析数据一致。

CMONOC 是以全球定位系统观测技术为主,辅 之以甚长基线射电干涉测量(VLBI)和人卫激光测距 (SLR)等空间观测技术,结合精密重力和精密水准 测量构成的大范围、高精度、高时空分辨率的地壳运 动观测网络。它是一个综合性、多用途、开放型、数 据资源共享、全国同一的观测网络,具有连续动态监 测功能。观测网络有基准网、基本网、区域网、和数 据传输和分析系统四大部分组成^[11]。

中国地壳运动观测网络的 GPS 基准网由 30 个基 准站组成。包括: BJFS, BJSH, CHUN, DLHA, DXIN, GUAN, HLAR, JIXN, KUNM, KMIN, LHAS, LUZH, QION, SHAO, SUIY, TAIN, TASH, URUM, WHJF, WUHN, WUSH, XIAA, XIAG, XIAM, XNIN, YANC, YONG, CHAN, HRBN 和 ZHNZ。本文中用了 28 个基 准站的数据(CHAN, HRBN 两站没有获得观测数据)。 这些站的分布如图 1。



Figure 1. The distribution of CMONOC GPS sites 图 1. CMONOC GPS 基准站分布图

CMONOC 的 GPS 数据处理采用美国麻省理工学 院(MIT)和 Scripps 海洋研究所(SIO)研制的 GPS 综合分析软件包 GAMIT/GLOBK 完成。计算中采用 Piecewise Liner 模型进行对流层天顶延迟和水平梯度 估计,每2小时估计1个ZTD,每24小时观测时段 估计1个东西向梯度和1个南北向梯度。^[12]由此获得 每个 GPS 基准站多年的、时间分辨率为2小时的 ZTD



时间序列。图 2 给出了 28 个 GPS 基准站 2004 年 ZTD 的年平均值。



Figure 2. The mean ZTD of CMONOC GPS sites in the year 2004 图 2. CMONOC GPS 基准站 2004 年平均 ZTD

3 ECMWF/NCEP 气象数据计算 GPS 站点 ZTD 的方法

利用 ECMWF/NCEP 气象参数计算 GPS 站点 ZTD,分二步,第一步是用 ECMWF/NCEP 的气象数 据计算各格网点 ZTD;第二步由格网点 ZTD 计算 GPS 站点 ZTD。

3.1 用 ECMWF/NCEP 气象数据计算 ZTD

采用了两种方法:一是积分法,二是模型计算法。

3.1.1 积分法

积分法主要是用于分层的气象数据,所用的公式^[1]如下:

$$N = k_1 (P - e) / T + k_2 \times e / T + k_3 \times e / T^2$$

$$N_W = 64.79 \times e / T + 377600.0 \times e / T^2$$

$$e = h \times P / 0.622$$
(1)

$$k_1 = 77.604 K / Pa$$
, $k_2 = 64.79 K / Pa$

$$k_3 = 377600.0K^2 / Pa$$

N 是总折射数, N_w 是水汽折射数, P 是大气压, e 是水汽压, h 是比湿。 计算出总折射数后, 就可以 采用下面的公式计算 ZTD:

$$ZTD = 10^{-6} \int_{S} Nds = 10^{-6} \sum_{i} N_{i} \Delta s_{i}$$
(2)

式中 N_i 为第i层的大气折射率, Δs_i 为第i层的高度。

3.1.2 SAASTAMOINEN 模型计算法

SAASTAMOINEN 模型主要用于地面气象数据, 其公式^[13]如下:

$$ZTD = 0.002277 \times \frac{\left[P_0 + (0.05 + \frac{1255}{T + 273.15})e_0\right]}{f(\varphi, \mathbf{H})}$$
$$e_0 = rh \times 6.11 \times 10$$
(3)

 $f(\varphi, H) = 1 - 0.00266 \cos 2\varphi - 0.00028 H$

 P_0 是地面气压, e_0 是水汽压, T_0 是温度, rh是相 对湿度, φ 是纬度, H高程。

3.1.3 在用 NCEP 气象数据计算 ZTD 时 应注意的事项

由于 NCEP 的数据里面没有海拔高度,只有位势 高度,因此要把后者转换海拔高度,其公式^[14, 15]如下:

$$g(\varphi, Z) = \frac{9.80665 \times (1 - 0.00265 \times \cos 2\varphi)}{1 + 2\frac{Z}{R}}$$

$$Z = \frac{9.8H}{g(\varphi, Z)}$$
(4)

g 是重力加速度,是纬度和海拔的函数, φ 是纬度, R 是地球近似半径,H 是位势高度,Z 是海拔高度。

在用积分法计算 ECMWF/NCEP 的 ZTD 时,由于 NCEP 的分层气象数据只有 17 层,大约 30km 的海拔 高度,而 ECMWF 的分层气象数据有 60 层,大约 65km 的海拔高度,因此,在用积分法算 NCEP 的 ZTD 时, 还要计算 NCEP 分层气象数据 17 层以上的对流层天顶 延迟,这样才能达到和 ECMWF 保持相当的高度,由 于 17 层以上已经没有分层气象数据,因此采用了 SAASTAMOINEN 模型来计算,将第 17 层的气象参 数值作为初值,然后将二者加起来作为 NCEP 再分析 分层气象数据的 ZTD。

3.2 由格网点 ZTD 计算 GPS 站点 ZTD

为了便于ECMWF和NCEP的比较,同取ECMWF 和NCEP的格网为2.5°×2.5°。因为GPS台站的位 置和ECMWF/NCEP格网点的位置通常不在同一个位 置,在利用ECMWF和NCEP格网点的ZTD计算GPS 台站点的ZTD时,分别采用了两种方法:一是直接选 用最接近格网点的ZTD值,加上GPS点与此格网点 高程偏差的改正;二是用GPS点邻近的四个格网点的 ZTD,加上GPS点与格网点高程偏差的改正,再按距 离加权算法内插出GPS点的ZTD值。

距离加权算法的原则是,距离越近,加权值越大, 距离越远,加权值越小,如图 3 所示。GPS 点的 ZTD



值ZTD_G的内插公式¹¹⁶¹为:

$$ZTD_G = \sum_{i=1}^{4} W_i(x, y) ZTD_i$$
(5)

$$W(A, B) = A^{2}B^{2}(9 - 6A - 6B + 4AB)$$

$$W_{1}(x, y) = W(x_{pp}, y_{pp})$$

$$W_{2}(x, y) = W(1 - x_{pp}, y_{pp})$$

$$W_{3}(x, y) = W(1 - x_{pp}, 1 - y_{pp})$$

$$W_{4}(x, y) = W(x_{pp}, 1 - y_{pp})$$

$$x_{pp} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{2} - \lambda_{1}}, y_{pp} = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{2} - \varphi_{1}}$$

(6)

其中 $W_i(x, y)$ 为权函数,可由下式计算:



Figure 3. The schematic diagram of distance-weighted method 图 3.距离加权法示意图

计算结果表明,两者差别不大。以下表 1 和表 2 均取自方法一的结果。

必须特别指出的是,上面提到的加上GPS点与格 网点高程偏差的改正是必要的。我国地势复杂,地形 高差变化很大,以本文的研究为例,GPS测站高程与 最近格网点高程间最大高差可达1-2km,这时 ZTD 的 偏差改正就超过 30cm。为此,我们研究了中国地区 ZTD 随高度变化的特征。利用 ECMWF 分层气象数 据,以积分方法计算了每层的天顶延迟值,从而获得 ZTD 随高度变化的规律。图 4 给出了海拉尔 (HLAR)、绥阳(SUIY)、琼中(QION)和塔什库 尔干(TASH)等地区对流层天顶延迟随高度升高而 衰减的情况。经用二阶多项式初步拟合,得到全国 10km 以下天顶延迟随高度的衰减率约为 25-30cm/km 左右,二次项约为 1.1-1.5cm/km²,而且变化较有规 律,衰减率和二次项基本上均是随纬度的增加轻微的 减小。利用天顶延迟随高度的衰减率和二次项,可实现 ZTD 的高差改正。

图 5 给出了拉萨(LHAS)和塔什(TASH)两站 在进行高差改正前后 ZTD 的计算值和 GPS 实测值的 比较。上面两张是高差改正前的比较,下面两张是高 差改正后的比较。这充分显示了在 GPS 实测 ZTD 和 ECMWF/NCEP 数据计算 ZTD 进行比较时,对后者进 行 ZTD 高差改正的重要性。



Figure 4. The ZTD variation of the GPS sites (HLAR, SUIY, QION, and TASH) with the altitude

图 4. 海拉尔、绥阳、琼中和塔什库尔干地区附近上空天顶延迟随 高度的变化



Figure 5. The comparison of the GPS sites (LHAS, TASH) measured ZTD and the ZTD from ECMWF

图 5. 拉萨和塔什站在 ZTD 高差改正前后 GPS 实测值和 ECMWF 计算值的对比图

4 GPS 实测 ZTD 和 ECMWF/NCEP 数据 计算 ZTD 的比较

通过以上处理,全国 28 个 GPS 基准站实测 ZTD



Table 1. The bias and RMS between the GPS ZTD and the ZTD deduced from ECMWF / NCEP data with height deviation correction at the nearest grid point. "lat" means the latitude, "rea" on behalf of the re-analysis data, "ana" means the analysis data, "int" means the integration method, "saas" is the abbreviation of SAASTAMOINEN model method, "gps-ncep rea jf + saas "means that GPS ZTD subtract the ZTD which include the integration of NCEP 17 layers data and the SAASTAMOINEN model calculation value of the 17th layer data.

表 1. 比较各个 GPS 基准站与 ECMWF/NCEP 最近格网点的 ZTD 的 bias 和 RMS, "lat" 是纬度, "rea"代表再分析数据, "int"是积分, "saas" 是 SAASTAMOINEN 计算, "gps-ncep rea jf+saas" 含义是 NCEP 的积分值再加上第 17 层上的 saas 模型计算值后得到的 ZTD 与 GPS ZTD 相比较的值.

GPS name	GPS let	GPS alt(m)	gps- ecmwf dis(km)	gps- ecmwf rea alt dif(m)	gps−ncep alt dif(m)	gps- ecnwf rea int bias (mm)	gps- ecmwf rea int rms (mm)	gps- ecmwf fea saas bias (mm)	gps- ecmwf rea saas rms (mm)	gps-ncep rea int+saas bias (mm)	gps-ncep rea int+saas rms (mm)	gps-ncep réa saas bias (mm)	gps-ncep rea saas rms (mm)	gps-ncep forecast bias (mm)	gps-ncep forecast rms (mm)
yong	16.83	10.24	27.79	-26.28	28.24	2.7	19.6	-2.5	46.6	-3.7	29.6	53.9	76.0	31.7	57.2
gion	19.03	207.55	39.74	136.48	189.54	-18.1	31.7	3.2	49.2	-22.5	36.6	41.5	66.2	22.0	57.3
guan	23.18	30, 91	90,93	-104.95	-246.28	-7.4	23.1	21.6	54.5	12.0	30, 3	66, 8	85.6	72.3	96.2
ziam	24.45	106.04	63.91	-509.70	-233.66	11.5	26.9	34,0	59.2	6.1	28.4	53.1	77.3	76.4	96.7
kmin	25.03	1986.18	29.25	-53, 87	-28.02	-9.3	14.7	-6.4	32.0	9.6	22.7	9.0	36.4	40.7	61.9
kunm	25.03	1986.20	29.25	-53.85	-28.00	-22.0	24.6	-17.3	34.3	-2.5	20.3	-2.4	33.0	21.7	54.5
xiag	25.61	1974.25	38,36	32.37	-49, 98	-23.7	27.5	-18.5	35.7	1.6	24.1	3.5	37.0	28.6	57.1
luzh	28.87	298.14	73.40	-148.63	-318.81	-14.8	28.5	21.6	55.1	25.0	36.2	86.1	99.9	111.9	126.6
lhas	29.66	3622.00	107.74	-1683.84	-1618.20	7.0	22,7	1.1	20.0	6.9	24.0	7.2	25.4	31.7	48.4
whif	30.52	71.59	56.98	-64.35	10.61	-25.3	32.7	0.1	54.2	-33.3	41.3	27.0	62.2	33.4	74.8
wuhn	30.53	25.80	68.25	-110.14	-35.18	-28.6	35.4	-5,5	52,8	-34.5	42, 1	22.4	57.6	31.7	73.8
shao	31.10	22.04	130.62	-159.63	-223.91	-16.9	35.2	4,0	52.5	-14.5	34.8	21.0	60,0	39.3	72.2
xiaa	34.18	509.13	106.74	-183.77	-498.09	-11.8	23.8	7.3	39.3	19.5	29,6	53, 0	67.7	53.3	88.9
zhnz	34.52	443.64	63.48	-13.26	-121.72	-24.3	30.3	-11.8	43.3	-22.0	30.5	16.7	49.0	22.1	69.6
tain	36,21	338.83	85.52	148.42	289.04	-18.6	32.9	-13.6	41.6	-33.8	44.4	10.0	43.5	-6.4	61.4
xnin	36.60	2363.82	88.49	-495.52	-130.92	-7.8	16.4	-6.5	20.9	-11.0	19.3	5.3	24.9	14.5	43.3
dlha	37.38	2955.73	13.34	-754, 10	-1056.01	2,1	10.8	3.2	14.2	-50.9	52, 8	-41.0	45.7	-31.6	42, 9
tash	37.77	3048.62	27.31	-1407.16	-1032.43	9.0	15.3	3.5	14.2	-31.8	35.2	-30.3	34.5	-5.6	24.7
yanc	37.78	1303.51	19.73	-255.63	-98, 79	-20, 8	23.7	-16.9	30, 8	-23.9	29.0	8,3	32.7	-11,8	63.6
bjfs	39.61	87.41	80.92	-995.87	-865.54	5.2	25.1	5.5	35.7	43.5	50.9	67.6	80.2	65.6	87.0
jixn	40.07	38.87	5.62	-188, 53	-427.06	-7.2	15.4	0.2	31.2	17.3	28.2	47.8	63.7	34, 9	68.1
bjsh	40.25	155.37	105.25	-927.91	-797, 58	2.5	21.7	2.8	32.3	37.7	45,0	61.6	73.4	60.4	82.3
dxin	40,98	1017.88	72.74	-340, 45	-1074.38	-17.0	21.9	-1.6	19.2	-3.5	16.8	13.2	27.9	-3.2	55, 9
wush	41.20	1395.26	109.47	297.80	240.67	-27.1	35.3	-8.8	27.0	-48.4	53.6	-15.0	30.9	-48.3	89.2
chun	43.79	268.31	100.39	68.47	140.21	2,5	22.3	12.8	32, 3	-19.4	29.2	11.2	36.1	12.2	52,1
עני יננו	43.81	858.79	92.91	325.50	-59.13	-26.2	32.2	-12.0	26.2	-46.0	49.8	-12.9	34.3	-12.6	73.8
suiv	44.43	369 13	84.60	-117.08	-97.27	-0,6	16.8	4.9	26,1	-3.2	19,2	21.5	37.1	- 29.0	51.3
hlar	49.27	628.66	64.61	-109.51	-248.23	-9.1	14.7	-0.4	17.6	-13.0	19.6	13.9	31.5	10.5	46.8

Table 2. The bias and RMS statistics at GPS stations 表 2. 各个 GPS 基准站的 bias 和 RMS 的统计情况

	gps− ecnw£ dis(kon)	gps- ecmwf rea alt dif(m)	gps=ncep alt dif(m)	gps- ecmwf rea int bias (mm)	gps- ecmwf rea int rms (mm)	gps- ecnwf rea saas bias (mm)	gps- ecmwf rea saas rms (mm)	gps-ncep rea int†saas bias (mm)	gps-ncep réa int+saas rms (nm)	gps-ncep rea saas bias (mm)	gps-ncep rež saas rms (mm)	gps∹ncep forecast bias (mm)	gps-ncep forecast rms (nm)
mean	67.05	-274.82	-300.32	-10.5	24.3	0.1	35.6	-8.5	33.0	22.1	51.1	25.9	67.0
min	5.62	-1683.84	-1618.20	-28.6	10.8	-18.5	14.2	-50.9	16.8	-41.0	24.9	-46.3	24.7
max	130.62	325.50	269,04	11.5	35.4	34.0	59,2	43.5	53.6	86.1	99.9	111.9	126.6

和 ECMWF/NCEP 数据计算 ZTD 的详细比对结果在表 1 和表 2 列出

相对于 GPS 实测的 ZTD, ECMWF 再分析资料计 算 ZTD 的精度如下:

4.1 GPS 实测 ZTD 和用 ECMWF 再分析气象数 据计算 ZTD 的比较

1) ECMWF 用积分方法计算 ZTD 的平均 bias 和 RMS 如下:



=

 $ZTD_{GPS} - ZTD_{ECMWF}$ REANALYSIS INTEGRAL = -10.5 ± 24.3 mm.

bias 最小值是-28.6mm,最大值是 11.5mm; RMS 最小值是 10.8mm,最大值是 35.4mm。

2) ECMWF 用 SAASTAMOINEN 模型方法计算 ZTD 的平均 bias 和 RMS 如下

 $ZTD_{GPS} - ZTD_{ECMWF}$ REANALYSIS SAASTAMONIEN =-0.1+35.6mm.

- bias 最小值是-18.5mm, 最大值是 34mm; RMS 最小值 是 14.2mm, 最大值是 59.2mm。
- 4.2 GPS 实测 ZTD 和用 NCEP 再分析气象数据 计算 ZTD 的比较

相对于 GPS 实测的 ZTD, NCEP 再分析资料计算 ZTD 的精度如下:

1) NCEP用积分方法计算 ZTD 的平均 bias 和 RMS 如下:

 $ZTD_{GPS} - ZTD_{NCEP}$ REANALYSIS INGETAL = -8.5±33.0 mm

bias 最小值是-50.9mm, 最大值是 43.5mm; RMS 最小值是 16.8mm, 最大值是 53.6mm。

2) NCEP用 SAASTAMOINEN 模型方法计算 ZTD 的平均 bias 和 RMS 如下:

 $ZTD_{GPS} - ZTD_{NCEP}$ REANALYSIS SAASTAMONIEN = 22.1 ± 51.1 mm

bias 最小值是-41 mm, 最大值是 86.1 mm; RMS 最小值是 24.9mm, 最大值是 99.9mm。







Figure 7. The RMS of ZTD comparison at GPS stations 图7. 各GPS基准站的平均RMS

4.3 GPS 实测 ZTD 和用 NCEP 预报地面气象参数计算 ZTD 的比较

$$ZTD_{GPS} - ZTD_{NCEP}$$
 forecast SAASTAMONIEN

 $25.9 \pm 67.0 \text{ mm}$

bias 最小值是-46.3 mm, 最大值是111.9 mm; RMS 最小值是24.7mm, 最大值是126.6mm。

图 6,7给出了上面五种情况计算的全国 28个 GPS 基准站 ZTD 残差的 bias 和 RMS 的分布。

从以上的图表可看出:

1)以 GPS 实测的 ZTD 为准, ECMWF 计算的 ZTD 的 RMS 优于 NCEP;

2)从 ECMWF/NCEP 数据计算 ZTD 的两种方法 来看,即积分方法明显优于 SAASTAMOINEN 模型方 法,由 ECMWF 积分法计算的 ZTD 的 bias 和 RMS 均 不超过 4 cm;

3)利用 NCEP 预报地面气象参数预报我国上空 ZTD,除个别站(LUZH站)外,其 bias 和 RMS 均不 超过 10cm。LUZH 站地处四川盆地,周围地形复杂, 气象多变,而所用的格网点 2.5°×2.5°太稀,导致 其 bias 和 RMS 较大。

4.4 ECMWF/NCEP 计算 ZTD 精度的时空分布特 性分析

我们对 ECMWF/NCEP 计算 ZTD 的精度在我国的时空分布特征作了研究。

在时间分布特征方面,发现ECMWF/NCEP计算 ZTD相对于GPS实测ZTD的bias和RMS的大小具有明 显的季节性变化,图8,9,10,11分别给出了ECMWF 和NCEP积分计算ZTD相对于GPS实测ZTD各测站分 月统计的bias和RMS。

从这些图中可看到,偏差bias和RMS变化具有





Figure 8. The monthly bias of the ZTD integrated from ECMWF data compared to GPS measured ZTD 图 8. GPS 实测 ZTD 与 ECMWF 积分的 ZTD 分月统计的 bias



Figure 9. The monthly RMS of the ZTD integrated from ECMWF data compared to GPS measured ZTD 图 9. GPS 实测 ZTD 与 ECMWF 积分的 ZTD 分月统计的 RMS



Figure 10. The monthly bias of the ZTD integrated from NCEP data compared to GPS measured ZTD

图 10. GPS 实测 ZTD 与 NCEP 积分的 ZTD 分月统计的 bias



Figure 11. The monthly RMS of the ZTD integrated from NCEP data compared to GPS measured ZTD 图 11. GPS 实测 ZTD 与 NCEP 积分的 ZTD 分月统计的 RMS



Figure 12. The variation of bias with altitude 图 12.bias 随测站高度的变化



Figure 13. The variation of RMS with altitude 图 13.RMS 随测站高度的变化

明显的季节性,夏季月份的 bias 和 RMS 高于冬季(特别是 RMS),这与我国夏季的气象复杂多变有关。

在空间分布上,主要考证了 bias 和 RMS 随纬度 和高度变化的特征。



图 6,7 是 28 个 GPS 基准站按纬度自低到高排列,从 图中可看到 ECMWF/NCEP 数据计算 ZTD 的 bias 和 RMS 随纬度的变化并不明显。

为了分析 ECMWF/NCEP 计算的 ZTD 的 Bias 和 RMS 随高度的变化情况,把 GPS 基准站高度按照 0-100m, 100-500m, 500-1000m, 1000-2000m, 2000-3000m 和大于 3000m 的范围平均 bias 和 RMS 进行了对比,如图 12 和图 13 所示。

从图 12,13 可看到,ECMWF/NCEP 计算的 ZTD 的 bias 和 RMS 随高度的变化的主要特征是:RMS 总体上有随高度增加而减小的趋势。其原因可能是测站高度较高的地区气象变化比较稳定所致。

4.5 气象资料格网分辨率对计算 ZTD 精度的影响 分析

采用第一种方法由格网点 ZTD 计算 GPS 台站 ZTD 时,格网点的 ZTD 没有做水平方向的改正,从 表 2 可以看出,最近点格网和 GPS 站的平均距离是 67.05km,最大达到了 130.62km。为了减小和 GPS 台 站水平位置差距,用 ECMWF0.5 度分辨率的气象参数 计算的 ZTD 和 GPS 实测 ZTD 进行了比较,其 bias 和 RMS 如图 14,图 15 和表 3:

0.5x0.5 度格网最近格网点和 GPS 距离的平均值为 16.29km,最大值为 26.05km,分层气象数据计算的 ZTD 和 GPS 实测 ZTD 残差的 bias 和 RMS 为-11.9mm 和 19.8mm, bias 比 2.5x2.5 度的 bias(-10.5mm)减少约 1.4mm, RMS 比 2.5x2.5 的 RMS(24.3mm),减小 4.5mm。 类 似 情 况 , ECMWF 地 面 气 象 数 据 用 SAASTAMOINEN 模型计算 ZTD 和 GPS 实测 ZTD 比



Figure 14. The bias of the GPS measured ZTD and ZTD derived from ECMWF with the resolution of 0.5x0.5 and 2.5x2.5 图 14.ECMWF0.5x0.5 与 2.5x2.5 气象数据计算的 ZTD 相对 GPS 实 测 ZTD 的 bias



Figure 15. The RMS of the GPS measured ZTD and ZTD derived from ECMWF with the resolution of 0.5x0.5 and 2.5x2.5 图 15.ECMWF0.5x0.5 与 2.5x2.5 气象数据计算的 ZTD 相对 GPS 实 测 ZTD 的 RMS

较, bias 减小 2.2mm, RMS 减小 0.5mm。说明用 ECMWF0.5 度分辨率的气象数据计算的对流层天顶延迟, 精度能有 1mm 到 5mm 的提高。

5 结 论

本文用 GPS 实测 ZTD 对 ECMWF/NCEP 的气象 数据计算的 ZTD 进行的评估,通过前面的比较和分 析,得到结论如下:

1)利用 ECMWF/NCEP 分层再分析气象参数计算 ZTD 时,采用积分法明显优于 SAASTAMOINEN 模型计算 法,ZTD 的计算精度可提高 1-3cm。今后在利用 ECMWF/NCEP 分层气象参数计算 ZTD 时,应考虑采 用本文提出的积分方法。

2) 与全国 28 个 GPS 基准站实测的 ZTD 相比, ECMWF 积分法计算的各测站的 ZTD,其 bias 的变化 范围为-28.6mm 到 11.5mm,平均值为-10.5mm;最大 RMS 为 35.4mm,平均值为 24.3mm。NCEP 积分法计 算的各测站的 ZTD,其 bias 的变化范围为-18.5mm 到 34mm,平均值为-10.5mm;最大 RMS 为 59.2mm,平 均值为 33.0 mm。从总体上讲 ECMWF 计算的 ZTD 优 于 NCEP。利用多年的 ECMWF/NCEP 分层再分析气 象参数生成的 ZTD,可用来作为我国 ZTD 四维变化 数字模型具有较高精度的背景场。

3) NCEP 地面预报数据预报的 ZTD 与 GPS 实测的 ZTD 相比,除了个别测站外,其 bias 和 RMS 均不超过 10cm。NCEP 地面预报数据预报的 ZTD 可用作大部分 GNSS 实时导航定位中的对流层延迟改正。

4)研究了ECMWF/NCEP计算ZTD的bias和RMS 在我国的时空分布特性,结果表明,bias和RMS的分



Table 3. the comparison of GPS measured ZTD and ZTD derived from ECMWF with the resolution of 0.5x0.5 and 2.5x2.5 表 3.ECMWF0.5 度格网和 2.5 度格网气象参数计算的 ZTD 和 GPS 实测 ZTD 比较

	2.5x2.5g ps- ecmwf. dis(km)	2.5x2.5gp s- ecmwf rea alt dif(m)	2.5x2.5gp s-ncep alt dif(m)	2.5x2.5g ps=ecmwf rea int bias (mm)	2.5x2.5 gps- ecmwf rea int rms (nm)	2.5x2.5g ps-ecmwf rea saas bias (mm)	2.5x2.5g ps=ecmwf rea saas rms (mm)	D.5xD.5g ps=ecmwf rea int bias (mm)	0.5x0.5g ps=ecmwf rea int rms (nm)	D.5xD.5gp s∸ecmwf rea saas bias (mm)	0.5x0.5gp s-ecmwf rea saas rms (mm)	0.5x0.5g ps=ecmwf dis(kam)	0.5x0.5gp s=ecmwf dif(m)
mean	67.05	-274.82	-300.32	-10.5	24.3	0.1	35.6	-11, 9	19,8	-2.1	35.1	16.29	-229.96
min	5.62	-1683.84	-1618.20	-28.6	10,8	-18.5	14.2	-36.7	10,8	-28.7	13.7	1,48	-1195.34
max	130.62	325.50	269.04	11.5	35.4	34.0	59.2	7.1	38.4	.26.7	57.2	26.05	144.31

布在时间上具有明显的季节性变化特征,从分月统计 来看,夏季明显高于冬季,说明湿度场有随时间变化 的特点^[2]; bias 和 RMS 的分布在空间上, RMS 有随 高度增加而减小的趋势,而随纬度的变化并不明显, 表明随着高度增加,湿度减少,其变化也相对平稳^[2]。

5)把 ECMWF 气象数据格网分辨率从 2.5 度增大 到 0.5 度后,生成 ZTD 的精度仅提高 1-5mm,效果并 不显著。这也反映了 ECMWF 气象格网数据实际分辨 率并不高。

致 谢

感谢 ECMWF 和 NCEP/NCAR/NOAA 提供数据, 感谢 Keith Fielding 博士 (ECMWF)和 Don Hooper 博 士 (ESRL, PSD),对在研究中出现的问题给予的帮助 和建议。

References (参考文献)

- Li Zhenhang, Huang Jinsong. GPS surveying and data processing. Whuhan University Press. 2007.1, P52-69.
 李征航,黄劲松: GPS 测量与数据处理,武汉大学出版 社,2007.1, P52-69.
- [2] H.Vedel, K.S.Mogensen and X.-Y.Huang. Calculation of zenith delays from meteorological data comparison of NWP model, radiosonde and GPS delays. Phys.Chem,Earth(A), 2001, Vol.26,No.6~8,pp.497-502.
- [3] J.S.Haase, H.Vedel, M.Ge and E.Calais, GPS zenith troposphteric delay(ZTD) variability in the mediterranean, Phys. Chem. Earth (A), 2001, Vol. 26, No 6-8, pp.439-443.
- [4] Walpersdorf, A Bouin, MN Bock, O Doerflinger, E, Assessment of GPS data for meteorological application over Africa: study of error sources and analysis of positioning accuracy, Journal of

atmospheric and solar-terrestrial physics, 2007, Vol.69(No.12).

- [5] Memmo, A. Fionda, E. Paolucci, T. Cimini, D.Ferretti, S. Ciotti, P., Comparison of MM5 integrated water vapor with microwave radiometer, GPS, and radiosonde measurements, IEEE transsacions on geoscience and remote sensing, 2005, Vol.43(No.5).
- [6] Constantin-Octavian Andrei, Ruizhi Chen, Assessment of time-series of troposphere zenith delays derived from the Global Data Assimilation System numerical weather model. GPS Solut, 2008, DOI 10.1007/s10291-008-0104-1.
- [7] G. Guerova, E. Brockmann, J.Quiby and F.Schubiger, C.Matzler, Validation of NWP mesoscale models with swiss GPS network ANGENS, Journal of applied meteorology, 2003, pp141-150.
- [8] L. Cucurull, B. Navascues, G. Ruffini etl, P.ELosegui, A. Rius and J. Vila, The use of GPS to validate NWP systems: the HIR-LAM model, Journal of atmospheric and oceanic technology, 2000, pp. 773-787.
- [9] <u>www.ecmwf.int</u>
- [10] <u>http://www.cdc.noaa.gov/data/</u>
- [11] Niu Zhijun, Ma Zongjin, Chen Xinlian, etc. Crustal movement observation network of china. Journal of Geodesy and Geodynamic.2002,22(3),P89-93(Ch).
 牛之後,马宗晋,陈鑫连等:中国地壳运动观测网络,大地 测量与地球动力学,2002,22(3),P89-93.
- [12] T. A. Herring, R. W. King, S. C. McClusky. Document for the GAMIT GPS Analysis Software, release 10.3. 2006.
- [13] Saastamioinen J. Contributions to the Theory Atmospheric Refraction, Part II Refraction Corrections in Satellite Geodesy. Bulletion Geodesique, 10713-34.
- [14] Wang Yanming, Atmospheric Physics, Qingdao Ocean University Press, 1993.5, P179-186(Ch).
 王衍明,大气物理学,青岛海洋大学出版社, 1993.5, P179-186
- [15] Hu Mingcheng, Lu Fu, Modern Geodesy, Survey and Mapping Press, 1993.8, P383-489(Ch).
 胡明城,鲁福,现代大地测量学,测绘出版社, 1993.8, P383-489.
- [16] Chao Y. C. Real Time Implementation of the Wide Area Augmentation System for the Global Positioning System with an Emphasis on Ionospheric Modeling. Ph.D. dissertation, Stanford University, Stanford, CA.