

Numerical Weather Models Applied In GNSS Precise Point Positioning

Meng Chen^{1,2}, Junping Chen², Congwei Hu¹

1. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

1. cmkxf@sina.com, 2. junping.chen@shao.ac.cn

Abstract : The tropospheric delay is one of the most important error source in GNSS positioning, which is often corrected by troposphere model. In this paper, meteorological data measured in GPS station and highly precise Numerical Weather Models (NWMs) data of ECMWF are used to calculate zenith tropospheric delay (ZTD) with methods troposphere model and integration, and the ZTD measured by Water Vapor Radiometer (WVR) was used as reference. On this basis, the correction value of delay was used to precise point positioning (PPP) in single station to analysis its effect on the PPP accuracy, evaluating the applicability of ECMWF layered data in Shanghai. Result show that: (1) Compared to ZTD measured by WVR, resolution of 0.125° of the ECMWF layered data bias is 0.60 cm and RMS is 2.64 cm, better than the observed meteorological data whose bias and RMS is -4.85cm and 8.23cm. (2) Applying the precise ZTD observed by ECMWF to kinematic PPP, compared to SAAS model position accuracy is improved by 53% in up direction. We conclusion that WVR and ECMWF layered data can assist in GNSS precision positioning, it's also mean ECMWF meteorological data has a good performance when used to correct troposphere delay in GNSS navigation and position in Shanghai.

Key Words: Zenith Tropospheric Delay ; Water Vapor Radiometer ; Numerical Weather Models ; ECMWF ; Precise Point Positioning

气象数值模型应用于 GNSS 精密单点定位

陈猛^{1,2}, 陈俊平², 胡丛玮¹

1. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海, 中国, 200092

2. 中国科学院上海天文台, 上海, 中国, 200030

1. cmkxf@sina.com, 2. junping.chen@shao.ac.cn

摘要 : 对流层延迟是 GNSS 高精度定位中的重要误差源之一, 通常使用对流层经验模型进行改正。本文结合 GPS 台站实测气象数据、欧洲中尺度天气预报中心 (ECMWF) 的高分辨率数值气象模型 (NWMs) 资料, 分别使用经验模型与分层积分法计算出上海地区对流层天顶延迟 (ZTD), 并以台站并址的水汽辐射计 (WVR) 实测 ZTD 为参考, 评估以上两种延迟的精度。在此基础上, 将延迟值应用于单站精密单点定位 (PPP), 分析其对 PPP 定位精度的影响, 评估了 ECMWF 分层资料在上海地区的适用性。结果表明: (1) 与 WVR 实测天顶延迟相比, 分辨率为 0.125° 的 ECMWF 数据计算 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为 0.60cm 和 2.64cm, 分辨率为 0.25° 的资料计算 ZTD 的 bias 与 RMS 分别为 -0.10cm 和 3.58cm, 优于实测气象数据 ZTD 的 bias 和 RMS, 结果分别为 -4.85cm 和 8.23cm。 (2) 将延迟结果应用于动态精密单点定位, 在 U 方向上, ECMWF 定位精度比 SAAS 模型精度平均提高 53%。以上结论验证了水汽辐射计及 ECMWF 资料对 GNSS 精密定位的辅助作用, 也表明 ECMWF 资料可应用于上海地区 GNSS 导航定位中的高精度对流层延迟改正。

关键词 : 对流层天顶延迟 ; 水汽辐射计 ; 气象数值模型 ; 欧洲中尺度天气预报中心; 精密单点定位

1 引言

GNSS 导航定位中的对流层延迟通常是泛指电磁波信号在通过高度为 50km 以下的未被电离的中性大气层时所产生的信号延迟。在中性大气层中, 影响

GNSS 信号的 80% 的延迟量是由对流层折射产生的, 因此将发生在中性大气的信号延迟通称为对流层延迟^[1], 通常使用对流层模型进行改正, 其依赖于气象数据, 对流层的折射也与地面大气压力、温度和湿度变化密切相关, 因此, 实测气象数据或者气象数值预报

项目资助: 中国科学院百人计划; 国家 863 计划 (2013AA122402, 2014AA123102); 国家自然科学基金 (11273046, 41174024); 上海市科学技术委员会 (12DZ2273300, 13PJ1409900)。

模型资料被广泛应用于对流层延迟改正。欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 向全球用户提供了最新的全球大气数值预报再分析资料 (ERA-Interim), 北美和欧盟已将其用于导航定位中对流层延迟改正的研究, 并建立了一些适用于北美和欧盟地区的对流层延迟改正模型^[2]。Balsamo G 等人^[3]2010 年对 ERA-Interim 降雨量资料在美国地区的精度进行了首次评估, C. Szczypta 等人^[4]2011 年对 ERA-Interim 降雨量, 温度和湿度资料在法国地区的适用性进行了分析验证, 发现总体精度较好, 但在山区和近海等地区精度有待提高。陈钦明^[5]等人研究发现, 相对于 GPS 实测 ZTD, 用 2.5° 分辨率 ECMWF 资料计算出 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为 -1.0cm 和 2.7cm; 马志泉^[6]等人 2012 年使用 ECMWF 资料在中国地区计算的 ZTD 的总体平均偏差和中误差分别约为 -1cm 和 2 cm。

本文结合水汽辐射计 2014 年 6 月至 12 月的观测数据, 使用不同分辨率的 ECMWF 气象数值模型资料计算对流层延迟, 并分析了不同的拟合函数对高程改正的延迟结果影响, 最终将计算的延迟值应用于精密单点定位, 评估了 ECMWF 资料在上海地区的适用性。

2 计算方法

本文中计算对流层延迟的方法分为两种: 对流层经验模型与气象数值模型延迟改正。第一种方法中选择对流层模型为应用最广泛的 Saastamoinen 模型, 结合实测的地面气象参数, 可以得到天顶方向延迟量; 第二种方法使用 ECMWF 的 37 层等压面资料, 分别对 0.125° 与 0.25° 两种分辨率数据计算多层大气的延迟量。下面分别对两种计算延迟的方法进行简单介绍。

2.1 Saastamoinen 模型

Saastamoinen 模型 (简称 SAAS) 主要采用三角函数进行展开并逐项积分得到对流层天顶总延迟 ZTD^[7]:

$$\begin{cases} ZTD = \frac{0.002277}{f(\phi, h)} \times [P_s + (\frac{1255}{T_s} + 0.05) \times e_s] \\ ZHD = \frac{0.002277 \times P_s}{f(\phi, h)} \end{cases} \quad (1)$$

$$e_s = rh 6.11 \times 10^{\frac{7.5(T_s - 273.15)}{T_s}} \quad (2)$$

$$f(\phi, h) = 1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00028h \quad (3)$$

式中, ZTD 单位为 m, T_s 为地面温度 (K), P_s

为地面气压 (mbar), e_s 为地面水汽压, rh 为地面相对湿度 (0~1 之间)。 $f(\phi, h)$ 是纬度和高度的函数, 反映了重力加速度随地理位置和海拔高度的变化, ϕ 为测站的地心大地纬度 (rad), h 为测站大地高 (km)。 本文通过 WVR 的气象传感器, 获取实测地面温度、气压、相对湿度等气象参数, 结合 SAAS 模型即可得到实测气象数据的对流层天顶延迟量。

2.2 ECMWF 气象数值模型

2.2.1 ECMWF 简介

ECMWF 通过同化和预测系统 (Integrated Forecasting System, IFS) 对多年的航海观测 (Marine observations)、飞机观测 (Aircraft observations)、高空探测 (upper air soundings) 以及卫星资料在内的观测资料进行处理, 将这些不同来源、不同误差信息与时空分辨率的观测资料融合到数值动力模式中, 依据严格的数学理论, 实现数据同化, 可提供全球 UTC 时间 0, 6, 12, 18 时、最大平面分辨率 0.125°×0.125°、最小平面分辨率 3°×3°、垂直方向高度 80km 左右的分层气象资料。数据以 GRIB 和 NetCDF (Network Common Data Format) 两种格式存储, 用户可通过登陆 <http://apps.ecmwf.int/datasets/> 注册下载, 本文使用的是 ERA-Interim (Jan 1979-present) 的 NetCDF 格式 37 层等压面 (press level) 资料, 是 ECMWF 研制的最新全球大气再分析产品, 所用气象参数为每个等压面每天 4 个时刻的位势、温度、气压、相对湿度、比湿, 在 MATLAB 平台上实现数据的读取以及相关计算^[8,9]。

2.2.2 积分延迟计算方法

对流层延迟折射与介质中大气的折射指数有关, 是温度、气压、水汽压的函数, 近似表达公式如下^[10]:

$$N = k_1 \frac{P_d}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

式中, P_d 表示干空气的分压, e 表示湿空气的分压 (水汽压), 两者之和为总气压值 P , 单位均是 mbar, $k_1 = 77.604 \text{ K/mbar}$, $k_2 = 64.79 \text{ K/mbar}$, $k_3 = 377600.0 \text{ K}^2/\text{mbar}$, 均为物理常数, T 表示绝对温度 (K)。一般的数值气象模型可以提供总的气压值, 将上式写为^[11]:

$$N = k_1 \frac{P}{T} + (k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}) = N_{dry} + N_{wet} \quad (5)$$

式中, N_{dry} 与 N_{wet} 分别表示流体静力与非流体静力折射率, 系数 k_2' 的表达式如下:

$$k_2' = k_2 - k_1 \frac{R_d}{R_w} \quad (6)$$

式中, R_d 、 R_w 分别为干空气与水汽的气体常

数。水汽压的值一般无法直接测定，可用以下公式计算^[12]：

$$e = \frac{qP}{(\varepsilon + (1 - \varepsilon)q)} \approx \frac{qP}{(0.622 + 0.378q)} \quad (7)$$

式中， q 表示比湿。由此可以得到对流层天顶总延迟（ ZTD ）、天顶流体静力学延迟（ ZD_{dry} ）、天顶非流体静力学延迟（ ZD_{wet} ）的计算公式分别为：

$$ZTD = 10^{-6} \int_S N d_s = 10^{-6} \sum_i N_i \Delta s_i \quad (8)$$

$$ZD_{dry} = 10^{-6} \int_S N_{dry} d_s = 10^{-6} \sum_i N_{dryi} \Delta s_i \quad (9)$$

$$ZD_{wet} = 10^{-6} \int_S N_{wet} d_s = 10^{-6} \sum_i N_{weti} \Delta s_i \quad (10)$$

卫星导航定位中的信号来自太空，传播路径上各处的气象元素有明显的差异，由积分公式可知，要求得对流层积分延迟就需要知道信号传播路径上各处的大气折射系数，大气折射系数是温度、气压、湿度的函数，因此需要知道传播路径各处的气象参数，ECMWF 等压面数据可提供不同高度处气象参数，在使用此数据计算时，需要注意以下问题：

(1) 时间转换：NC 数据是以格里高利历（也称公历）作为时间单位的，起算时间是 1900 年 1 月 1 日 00 时，在计算的过程，需要将时间转换为常用的儒略日或者 UTC 时间，通过 MATLAB 编程实现，具体转换方法参考文献[13]。

(2) 高度单位的统一：在流体静力学平衡的条件下，为了使数学表达形式简洁以及便于方程式解算，气象学中以位势高来表示高度的概念，大地测量学的框架中则使用大地高来表示高度，是一种几何高度。气象系统与大地参考系统高度基准不一致，因此，在使用 nc 文件中的高度数据之前，必须对这些不同系统间的高度做一个统一的转化^[14]。位势高和几何高意义完全不同，前者是能量的一种单位，后者仅为高度单位。两者在数学上虽有差别，但数值差别很小，可忽略不计，因此可将位势米近似等效为几何米。位势高度也称为动态高，其定义式如下：

$$\zeta = \zeta_0 + \frac{\Phi}{g_0} \quad (11)$$

式中， ζ 为位势高度（单位是位势米）， ζ_0 为位势高度的初始值， Φ 为位势（ m^2/s^2 ），是指单位质量的物体从海平面到达某高度处克服重力所做的功。 g_0 是由世界气象组织（World Meteorological Organization, WMO）定义的一个常值 $9.80665 m/s^2$ ，ECMWF 规定

在任意纬度与高度处，位势除以常数 g_0 即可得到以米

为单位的位势高度^[15]，故可将上式可简化为 $\zeta = \frac{\Phi}{g_0}$ 。

正高与位势的关系如下：

$$H_0 = \frac{\Phi}{g(\theta, \lambda, H_0)} = \frac{\zeta \cdot g_0}{g(\theta, \lambda, H_0)} \quad (12)$$

式中， H_0 为大地测量学中的正高（m）， $g(\theta, \lambda, H_0)$ 表示物体所在位置与大地水准面之间沿铅垂线方向的平均重力加速度。重力加速度随着纬度与高度的变化而变化，当物体所处高度远小于地球半径时，其所受重力变化可忽略不计，此外，Nieviski^[16]通过将标准重力、EGM96 模型推求的真实重力应用于上式，结果证明，在 35km 高度处与位势高产生的不符值达到 1m，不同的重力计算表达式对于总延迟的结果影响甚微，因此本文中正高与位势高在数值上视为等值。测站与 ECMWF 的格网点一般不在同一高度上，导致气象参数或者天顶延迟值差异，尤其是在高山地区差异更大，因此通过格网点的延迟计算测站位置延迟时，要进行高程方向上的改正。ECMWF 获取的是格网点的位势高，测站获取的是椭球高，本文中将高度基准统一为椭球高，并根据格网点与测站的高差进行延迟改正。

正。椭球高计算公式如下：

$$H = H_0 + \bar{N} \quad (13)$$

式中， \bar{N} 为大地水准面差距（m），只要获取了相应位置处的大地水准面差距值，结合以上公式即可求得任意经纬度处的海拔高。本文中采用以下方法计算任意位置处的 \bar{N} 值：根据 GPT^[17]模型中的椭球高与正高转换方法在 MATLAB 中实现程序的编写，输入年积日与测站经纬度即可用九阶球谐函数推求全球任意位置处的大地水准面差距，用户可登陆维也纳理工大学网站下载 GPT 模型参考程序 (<http://ggosatm.hg.tuwien.ac.at/DELAY/SOURCE/>)。

(3) 等压面间折射率计算：等压面分为 37 层，从最高至最低依次为 1, 2, 3...37，等压面上气压值处处相等，但是同一等压面上格网点位势高度不同，其形式如图 1 所示。由图 1 可知，两等压面间形成大气层，而气象参数是针对等压面而言的，直接使用等压面的气象数据计算大气层折射率，并分层积分延迟，会导致测站延迟结果与真值产生 10~20cm 的差异，经过比较发现，对相邻两等压面的气象参数取均值，用于计算两等压面间大气层的折射率，可有效解决这一问题。

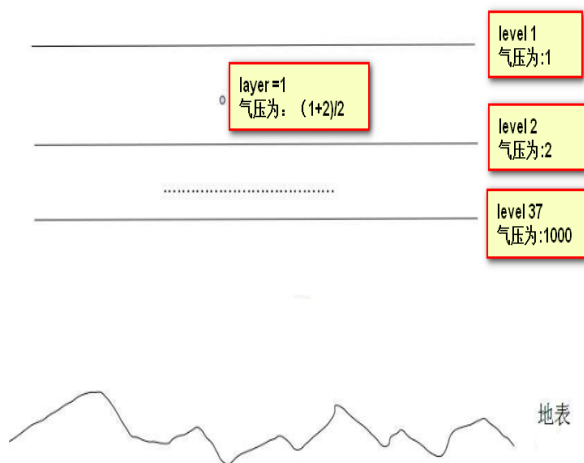


Figure 1.Press Level

图 1.等压面

(4)顶层高度以上大气延迟计算：等压面数据最高层一般在 47km 高度处，最高层以上不能获取气象数据，无法使用分层积分方法计算延迟，为解决这一问题，将第 37 层等压面的气象数据输入到 SAAS 模型中计算天顶延迟，并将结果与积分延迟相加得到任意层格网点所在高度处的天顶延迟。

根据以上方法计算出相应位置处的对流层延迟。结果见图 2。

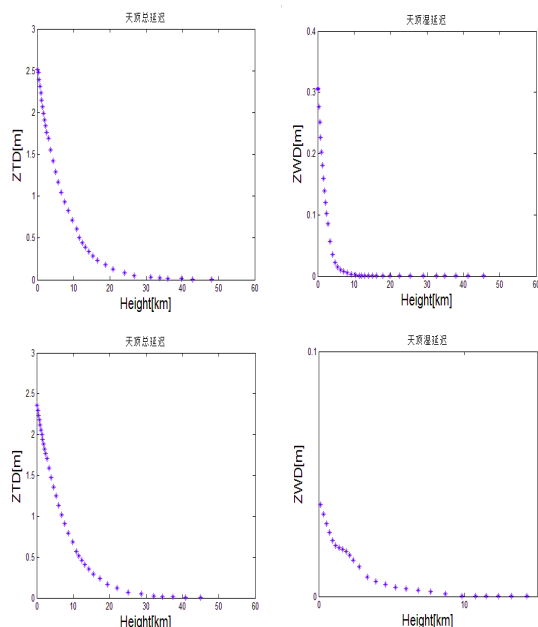


Figure 2.Zenith Troposphere Delay various with Height

图 2.格网点对流层天顶延迟随高度变化图

由图 2 可知，对流层天顶延迟随着高度呈现高次多项式或者指数形式变化，据此进行曲线拟合，

获取格网点延迟随高度变化的改正系数，将距离测站最近的四个格网点的天顶延迟改正到测站同一高度处，并使用反距离加权的方法求出测站天顶延迟。本文分别使用以上两种拟合函数，结合 ECMWF 两种分辨率资料实现了测站延迟的求取，以 WVR 实测天顶延迟作为参考，对两种拟合方法的结果进行了比较，并将拟合结果较好的延迟结果应用于动态精密单点定位，评估了 ECMWF 资料在上海地区的适用性。

3 结果验证

3.1 对流层延迟比较

1、指数函数拟合测站延迟

通过指数函数法拟合了 0.125° 与 0.25° ECMWF 天顶延迟高度改正的系数，并求出测站的 ZHD、ZWD、ZTD，以 WVR 观测值为参考与实测气象数据的 SAAS 模型一起进行了比较。

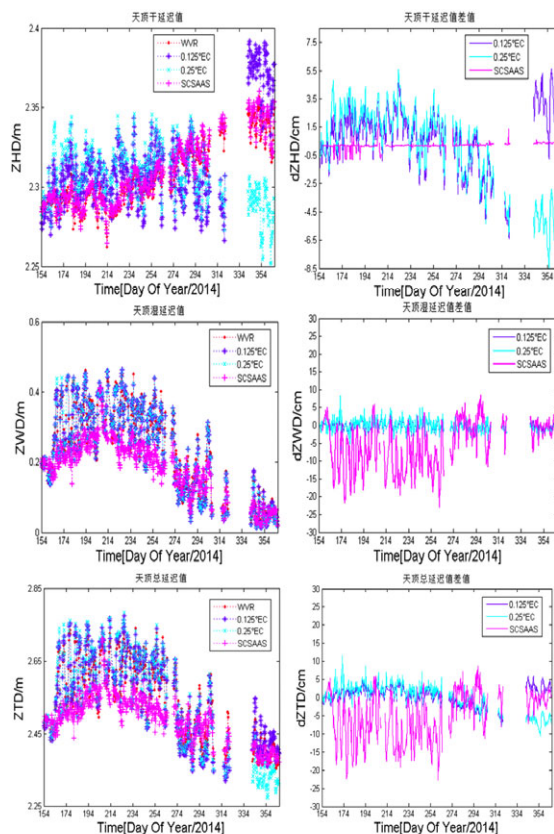


Figure 3.Zenith Delay of ECMWF,SAAS model and bias compared to WVR

图 3. ECMWF、SAAS 模型天顶延迟及与 WVR 的偏差

Table 1.Mean Bias and RMS of ZTD for ECMWF data and SAAS model compared to WVR

表 1.ECMWF、SAAS 模型天顶延迟平均偏差和中误差统计

		Δ ZHD	Δ ZWD	Δ ZTD
0.125°×0.125° ECMWF	Bias/cm	0.75	0.14	0.60
	RMS/cm	2.30	1.39	2.64
	Max/cm	5.63	4.95	7.98
	Min/cm	6.39	4.22	-8.05
0.25°×0.25° ECMWF	Bias/cm	0.04	-0.14	-0.10
	RMS/cm	2.95	1.57	3.58
	Max/cm	5.59	8.42	11.68
	Min/cm	-8.95	-6.94	-10.64
SCSAAS	Bias/cm	0.21	-5.06	-4.85
	RMS/cm	0.31	8.30	8.23
	Max/cm	1.83	8.47	8.72
	Min/cm	-0.87	-22.95	-22.71

2、高次多项式函数拟合测站延迟

经过比对分析，用 5 次多项式拟合 0.125°与 0.25° ECMWF 气象数值资料的效果最好。以 WVR 观测值为参考，将求出的测站天顶延迟、实测气象数据计算的延迟进行比较分析。天顶延迟及差值结果见图 4，平均偏差与中误差结果见表 2。

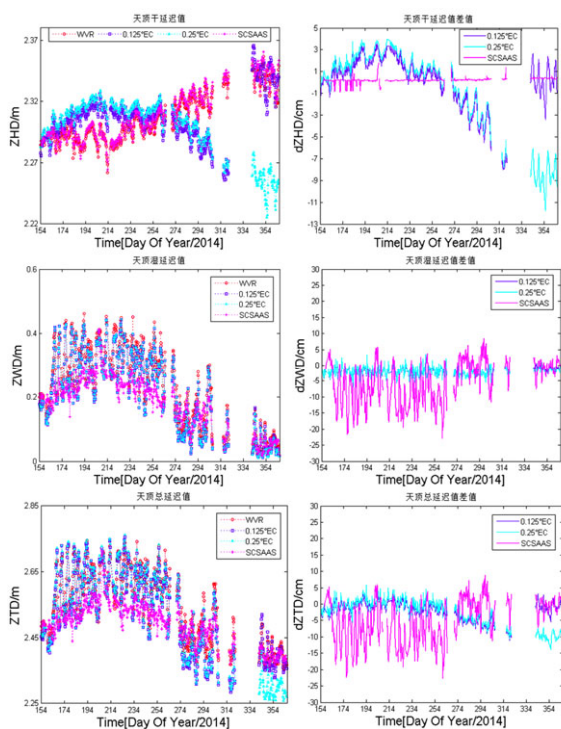


Figure 4.Zenith Delay of ECMWF,SAAS model and bias

图 4.ECMWF、SAAS 模型天顶延迟及与 WVR 的偏差

Table 2.Mean Bias and RMS of ZTD for ECMWF data and troposphere model

表 2.ECMWF、对流层模型天顶延迟平均偏差和中误差统计

		Δ ZHD	Δ ZWD	Δ ZTD
0.125°×0.125° ECMWF	Bias/cm	0.05	-1.96	-1.91
	RMS/cm	2.34	2.41	3.43
	Max/cm	3.75	3.46	5.06
	Min/cm	-8.04	-6.82	-11.10
0.25°×0.25° ECMWF	Bias/cm	-0.78	-1.97	-2.75
	RMS/cm	3.99	2.49	4.91
	Max/cm	3.98	3.56	5.73
	Min/cm	-11.81	-6.82	-13.98
SCSAAS	Bias/cm	0.21	-5.06	-4.85
	RMS/cm	0.31	8.30	8.23
	Max/cm	1.83	8.47	8.72
	Min/cm	-0.87	-22.95	-22.71

由图 3、图 4、表 1、表 2 结果可知，以 WVR 实测延迟为参考，对 ECMWF 相同分辨率的数据拟合时，指数函数拟合测站延迟结果优于多项式函数拟合结果，湿延迟中误差精度提高约 1cm；两种拟合方法得到的结果中，0.125°分辨率资料天顶延迟结果均优于 0.25°资料的结果，天顶总延迟精度提高约 1cm，湿延迟精度相当，说明上海地区水汽空间分辨率在 0.125°与 0.25°之间；ECMWF 两种分辨率资料分层积分延迟的精度高于实测气象数据的 SAAS 模型，指数函数法多层拟合 0.125°天顶湿延迟比实测气象数据 SAAS 模型的湿延迟精度提高了约 6cm。

3.2 延迟对 GNSS 精密定位的影响

为进一步考察不同分辨率的 ECMWF 资料在上海地区的适用性，采用精密单点定位的方法，将计算出的延迟值引入到 Bernese 软件中作为已知值固定，进行逐历元动态单点定位。由以上章节可知，指数函数拟合测站延迟结果优于多项式函数，因此将指数函数拟合的延迟结果用于动态精密单点定位，数据处理过程中对 Bernese 软件进行了修改，选用 NEILL 模型作为映射函数并固定对流层天顶干延迟，然后将每天 0、6、12、18 时刻的水汽辐射计、实测气象数据、气象数值模型计算的天顶湿延迟作为已知值引入到动态坐标解算过程中^[18]。采用 2014 年年积日为 223、258、278、305 的数据结果进行分析。将解算的动态坐标与测站精确坐标进

行比较，求取偏差并进行重复率统计，结果见图 5 和表 3，其中 EST 为软件解算的动态坐标结果，WVR 表示水汽辐射计延迟引入的定位结果，0.125 ° EC 与 0.25 ° EC 分别表示两种分辨率 ECMWF 资料的延迟引入定位的结果，SC 表示实测气象数据 SAAS 模型延迟引入定位的结果。

由图 5 与表 3 可知，与软件解算的结果相比，水汽辐射计每天 4 个时刻的湿延迟值应用于动态精密单点定位，其精度优于 ECMWF 资料，平均提高 26%，在 N、E 方向上相差不大，在 U 方向上中误差平均提高 3.87cm ;实测气象数据的 SAAS 模型湿延迟应用于动态精密单点定位 ,精度得到了降低，0.125 ° 资料比 0.25 ° 资料定位精度平均提高 6%，均优于实测 SAAS 模型，在 U 方向上，ECMWF 资料的定位精度比实测 SAAS 模型平均提高 53%。以上结果表明 ECMWF 分层数据资料在上海地区有较好的适用性，可用于上海地区 GNSS

导航定位中的高精度对流层延迟改正的研究。

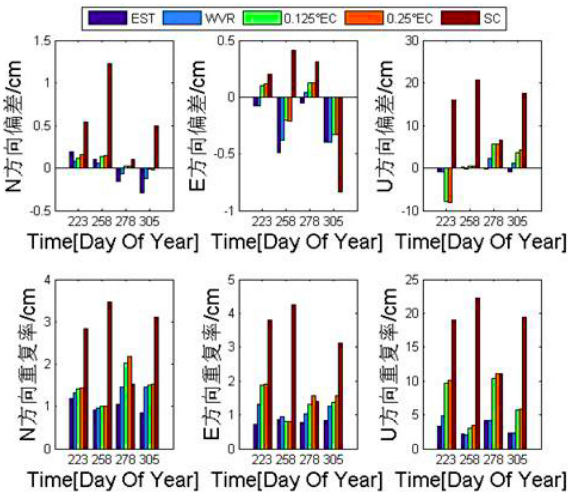


Figure 5.Comparison of kinematic PPP using different troposphere delay

图 5.固定不同延迟条件下的动态精密单点定位坐标比较

Table 3.Mean Bias and RMS of kinematic coordinates

表 3.动态坐标偏差均值与中误差

	DOY	EST/cm	WVR/cm	0.125 ° EC/cm	0.25 ° EC/cm	SCSAAS/cm
dN	223	0.20 ± 1.20	0.07 ± 1.32	0.11 ± 1.42	0.15 ± 1.44	0.54 ± 2.83
	258	0.10 ± 0.91	-0.05 ± 0.95	0.13 ± 1.00	0.14 ± 0.99	1.2 ± 3.46
	278	-0.16 ± 1.04	-0.06 ± 1.47	0.02 ± 2.03	0.30 ± 2.18	0.10 ± 1.53
	305	-0.30 ± 0.85	-0.13 ± 1.45	-0.01 ± 1.51	-0.02 ± 1.51	0.50 ± 3.11
dE	223	-0.08 ± 0.71	-0.08 ± 1.31	0.10 ± 1.87	0.11 ± 1.92	0.20 ± 3.80
	258	-0.49 ± 0.87	-0.38 ± 0.95	-0.20 ± 0.80	-0.21 ± 0.80	0.41 ± 4.25
	278	-0.05 ± 0.77	0.04 ± 1.03	0.12 ± 1.32	0.12 ± 1.58	0.31 ± 1.38
	305	-0.40 ± 0.82	-0.40 ± 1.25	-0.33 ± 1.38	-0.33 ± 1.56	16.06 ± 3.13
dU	223	-0.94 ± 3.38	-0.93 ± 4.86	-7.78 ± 9.74	-8.17 ± 10.06	15.42 ± 19.02
	258	0.31 ± 2.22	-0.25 ± 2.08	0.36 ± 3.02	0.40 ± 3.41	20.73 ± 22.21
	278	-0.32 ± 4.17	2.31 ± 4.11	5.61 ± 10.41	5.63 ± 11.10	6.44 ± 11.12
	305	-0.96 ± 2.31	1.20 ± 2.32	3.56 ± 5.66	4.33 ± 5.87	17.45 ± 19.45

4 结论

通过对不同分辨率的 ECMWF 实际算例进行比较分析，得出如下结论：

1)与 WVR 实测天顶路径延迟相比，分辨率为 0.125 ° 的 ECMWF 数据资料计算 ZTD 的 bias 和 RMS 分别为 0.60cm 和 2.64cm ,分辨率为 0.25 ° 时

ZTD 的 bias 与 RMS 分别为-0.10cm 和 3.58cm，优于实测气象数据 ZTD 的 bias 和 RMS ，结果分别为-4.85cm 和 8.23cm。

2)以 WVR 实测延迟值为参考，相同分辨率的 ECMWF 的数据使用指数函数拟合延迟结果更好，湿延迟中误差精度比多项式函数拟合结果提高约 1cm；两种拟合函数得到的结果中，0.125 ° 分辨率

资料的天顶延迟结果均优于 0.25° 资料的计算结果,天顶总延迟精度提高约 1cm,湿延迟精度相当,说明上海地区水汽空间分辨率在 0.125° 与 0.25° 之间。

3) 以 WVR 测定的 ZWD 为参考,ECMWF 两种分辨率资料多层面拟合延迟精度均高于实测气象数据的 SAAS 模型精度,指数函数法计算 0.125° 的 ECMWF37 层等压面资料 ZWD 的 bias 和 RMS 分别为 0.14cm 和 1.39cm,比实测气象数

据 SAAS 模型的湿延迟精度提高了约 6cm。

4) 实测气象数据的 SAAS 模型湿延迟应用于动态精密单点定位,精度得到了降低,ECMWF 0.125° 资料比 0.25° 资料定位精度平均提高 6%,均优于实测 SAAS 模型;在 U 方向上,ECMWF 资料的定位精度比实测 SAAS 模型精度平均提高 53%。表明 ECMWF 资料在上海地区有较好的适用性,可用于上海地区 GNSS 导航定位中高精度对流层延迟改正的研究。

参考文献

- [1] Bao Hai, Research on the Model of Troposphere Delay Correction in GPS Precision Point Position[D],2008.包海.GPS 精密单点定位中对流层延迟改正模型的研究与分析[D].中南大学,2008.
- [2] Pany T,Pesec P. Elimination of tropospheric path delays in GPS observation with the ECMWF numerical weather model[J].Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy,2001,26(6-8):487-492.
- [3] Balsamo G. Evaluation of ERA-Interim and ERA-Interim-GPCP-rescaled precipitation over the USA[R].ERA report series,5,2010.
- [4] Szczytal C. Verification of the new ECMWF ERA-Interim reanalysis over France[J]. Earth Syst.Sci,2011,15:647 -666.
- [5] Chen Qin-Ming,Song Shu-Li,Zhu Wen-Yao. An analysis of the accuracy of zenith tropospheric delay calculated from ECMWF/NCEP data over Asian area[J].Chinese J.Geophys.(in Chinese), 2012,55(5):1541-1548,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011.陈钦明,宋淑丽,朱文耀.亚洲地区 ECMWF/NCEP 资料计算 ZTD 的精度分析[J].地球物理学报,2012,55(5):1541-1548,doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.05.011.
- [6] Ma Zhiquan. Study On Accuracy Of ZTD And ZWD Calculated From ERA-Interim Data Over China[J].Journal Of Geodesy And Geodynamics,2012,32(2):100-104.马志泉.用中国地区 ERA-Interim 资料计算 ZTD 和 ZWD 的精度分析[J].大地测量与地球动力学,2012,32(2):100-104.
- [7] Li Yang. The theory and research of atmosphere affection to GPS surveying[D].The PLA Information Engineering University,2001.杨力.大气对 GPS 测量影响的理论与研究[D].解放军信息工程大学,2001.
- [8] The ERA-Interim archive Version 2.0.
- [9] Dan Bo,Feng Hanzhong. ECMWF $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ Latitude-longitude Grid Pattern Data Processing and Software Realization[J].Plateau and Mountain Meteorology Research,2013,33(3):92-96.但波,冯汉中. ECMWF $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 经纬网格模式资料处理及软件实现[J].高原山地气象研究,2013,33(3):92-96.
- [10] Wen You Tao, Near Real-time GPS PPP-inferred Water Vapor System Development and Evaluation[D]. Department of Geomatics engineering, University Of CAL-GARY,2008.
- [11] J. L. Davis, T. A. Herring. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling error on estimates of baseline length. Radio Sci, 1985, 20(6), pp.1593-1607.
- [12] J. M. Wallace and P. V. Hobbs, Atmospheric Science: An Introductory Survey, 2nd ed. New York: Academic, 2006, p. 483.
- [13] Zhuo Yan Hong, YANG Chun Tao. The Interchange of The Julian Date, Gregorian and Lunar-solar Calendar Date[J]. Academic exchange meeting of the China Aerospace Science accounting and testing professional committee in 2006,103-108.卓艳红,杨春涛.儒略日、格里高利历和农历日期的互换[J].中国宇航学会计量与测试专业委员会 2006 年学术交流会,103-108.
- [14] Vahab Nafisi. Comparison of Ray-Tracing Packages for Troposphere Delays[J]. IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING,2012,50(2):469-480.

- [15] <http://www.ecmwf.int/en/geopotential-defined-units-m2/s2-both-pressure-levels-and-surface-orography-how-can-height-metres>.
- [16] F. G. Nievinski, Ray-tracing options to mitigate the neutral atmosphere delay in GPS[J].Geodesy Geomatics Eng ,Univ. New Brunswick,Fredericton, NB, Canada, 2009,262: 232.
- [17] Johannes Böhm,Robert Heinkelmann. A Global Model of Pressure and Temperature for Geodetic Applications[M]. Journal of Geodesy,doi:10.1007/s00190-007-01353.
- [18] Rolf Dach. Bernese GPS Software Version 5.0[M].University of Bern January,2007.