

一种用于中国地区的对流层天顶延迟实时修正模型

杜晓燕^{①②} 乔江^{*①} 卫佩佩^①

^①(信息工程大学信息工程学院 郑州 450001)

^②(郑州大学信息工程学院 郑州 450001)

摘要: 针对目前对流层延迟修正受限于探空数据不足导致修正效率低的问题, 该文结合Saastamoinen和GPT2w模型构建形成组合模型Sa+GPT2w模型, 通过利用GPT2w模型提供的高精度气象数据, 实现中国地区对流层天顶延迟(ZTD)的实时修正, 克服对探空数据的依赖, 并用实测数据对计算结果进行验证。以IGS提供的中国地区2015至2017年ZTD时间序列为评估标准时, Sa+GPT2w模型(bias: 1.661 cm, RMS: 4.711 cm)的精度较同等条件下的Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Hop+GPT2w模型分别提升50.5%, 41.9%和37.1%; 以GGOS Atmosphere 2017年ZTD数据为标准时, Sa+GPT2w模型(bias: 1.551 cm, RMS: 4.859 cm)的精度相对同等条件下的另3种模型分别提升49.5%, 38.5%和46.8%; 最后对Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Sa+GPT2w模型在ZTD修正中误差结果的时空分布特征进行分析。研究结果可为在中国地区的导航定位、大气折射研究中, 应用不同气象参数模型进行ZTD修正的有效性和可能达到的精度提供参考。

关键词: 对流层天顶延迟; Saastamoinen模型; GPT2w模型; EGNOS模型; UNB3m模型

中图分类号: TN011.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0156-09

DOI: [10.11999/JEIT180353](https://doi.org/10.11999/JEIT180353)

Real-time Correction Model for Zenith Tropospheric Delay Applied to the Chinese Region

DU Xiaoyan^{①②} QIAO Jiang^① WEI Peipei^①

^①(Institute of Information Systems Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

^②(School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the correction for tropospheric delay is limited by the shortage of sounding data, which leads to the problem that the low correction efficiency, this paper proposes a model named Sa+GPT2w, combining Saastamoinen model with GPT2w model. In this paper, the real-time correction for Zenith Tropospheric Delay (ZTD) over China is realized by using the high-precision meteorological values provided by the GPT2w model, and the results are verified by the measured data. Taking the ZTD in 2015-2017 of International GNSS Service(IGS) as a reference, the accuracy of the Sa+GPT2w model (bias: 1.661 cm, RMS: 4.711 cm) rises by 50.5%, 41.9% and 37.1%, respectively, relative to the Sa+EGNOS, Sa+UNB3m and the Hop+GPT2w models. Moreover, using the ZTD from Global Geodetic Observing System (GGOS) in 2017 as a standard, the Sa+GPT2w model (bias: 1.551 cm, RMS: 4.859 cm) improves the accuracy by 49.5%, 38.5% and 46.8% relative to other three models, respectively. Finally, this paper analyzes the temporal and spatial distribution characteristics of the bias and RMS of the above three models. The results provide a significant reference for the effectiveness of correction for ZTD by using different meteorological models in the research of navigation and atmospheric refraction over China.

Key words: Zenith Tropospheric Delay (ZTD); Saastamoinen model; GPT2w model; EGNOS model; UNB3m model

1 引言

无线电波在中性大气层中传播时受到不均匀介

质的影响而产生折射, 使得信号的传播路径和速度发生变化, 即中性大气延迟。中性大气层包括对流层和平流层, 其中平流层的水汽等分子含量少, 对信号延迟的影响相对较小, 因此一般将中性大气延迟统称为对流层延迟^[1]。对流层延迟是卫星导航定

位技术的主要误差源之一,对于GNSS(Global Navigation Satellite System)的高精度导航定位有较大影响,在天顶方向对流层延迟量为2.35 m左右,而电波传播方向接近地面时可达20 m以上^[2]。

目前常用的对流层天顶延迟(Zenith Tropospheric Delay, ZTD)模型主要是Hopfield和Saastamoinen两种经典模型^[3,4],在已知实际气象参数时这两种模型的修正精度可达厘米级,其中Saastamoinen模型(在后文中简称为“Sa模型”)由于形式相对简便,在一般研究中应用较多。然而实际工作中大多数测站并不具备进行实时高空气象观测的条件,使得空间折射率分布很难准确实时预估,导致利用Saastamoinen等经典模型无法细致地刻画对流层延迟。考虑到这一局限性,选择与实际气象值最符合的气象模型参数进行计算已成为提高ZTD修正精度的一种手段,并在近些年得到广泛应用。杨祥等人^[5]利用GPT和UNB3m模型提供的气象参数作为Sa模型的输入构建了对流层延迟模型,有效提高了Sa模型的适用性;姚宜斌等人^[6]结合GPT2模型提供的气象参数和Sa模型计算ZTD,据此建立了适用于全球范围的精化模型;刘继业等人^[7]利用GPT2w模型计算得到的日本地区测站的气象数据,代入Hopfield模型和CFA2.2映射函数开展计算,有效克服了对流层散射双向时间比对中的斜延迟估计对实时气象数据的依赖。

总结前人的研究可以发现,不同气象参数模型在不同区域均具有一定适用性,但对于不同气象模型在中国地区ZTD修正中的有效性鲜有公开文献。本文基于以上基础,将目前最新且在其他领域的应用中取得较好效果的GPT2w(Global Pressure and Temperature 2 wet)模型与Sa模型相结合^[8,9],构建形成Sa+GPT2w组合模型,并以IGS(International GNSS Service)和GGOS(Global Geodetic Observing System) Atmosphere提供的中国地区高精度ZTD数据为精度评估标准值,对比分析了新模型与同等条件下的Sa+EGNOS, Sa+UNB3m模型以及Hop+GPT2w模型(Hop即Hopfield模型,后同)用于中国地区ZTD修正的精度,同时分析了误差的时空分布特征。

研究结果表明,在忽略Sa模型的系统偏差时,Sa+GPT2w模型用于计算ZTD的精度整体表现最优,GPT2w模型的气象参数相对更符合中国大部分地区的实际情况,该模型可用于中国地区的ZTD实时修正,同时具有使用参数少、操作简便的优点。

2 一种新的ZTD实时修正模型

在对流层天顶延迟修正中,Sa模型是一种应用

广泛的经验模型,但也会受限于部分地区由于布站限制而导致实测探空资料不足,从而造成ZTD计算结果出现较大偏差,这在很大程度上限制了Sa模型在ZTD实时修正中的应用。GPT2w模型可以提供全球范围内高分辨率的气象参数值,2017年,施宏凯等人^[9]基于我国29个探空站2015-03~2016-02期间的实测气象数据,验证了该模型在中国地区具有较高的精度。基于以上分析,同时考虑到GPT2w模型在中国地区的ZTD修正中应用较少,本文利用该模型解算得到的气象参数,代入Sa模型形成Sa+GPT2w组合模型,在保证精度的同时实现中国地区的ZTD实时修正。

2.1 Saastamoinen模型

Sa模型将ZTD分为干、湿延迟两项分量,同时考虑到干、湿项延迟的层顶高度并不一致,将对流层分为两层进行计算,该模型的表达式为

$$\begin{aligned} ZTD &= ZHD + ZWD \\ &= \frac{0.002277P}{f(\text{Lat.}, H)} + \frac{0.002277e}{f(\text{Lat.}, H)} \times \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, P 为测站处的气压(mbar), T 为测站处的温度(K), e 为测站处的水汽压(mbar), $f(\text{Lat.}, H)$ 是关于测站纬度Lat.和高程 H 的函数,其函数关系式为

$$\begin{aligned} f(\text{Lat.}, H) &= 1 - 0.0026 \cos(2 \times \text{Lat.}) \\ &\quad - 0.00028H \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 GPT2w模型

2013年,Lagler等人^[10]利用ERA-Interim提供的2001-2010年全球月均气象资料建立了GPT2模型,该模型可提供任意地点的气压、温度、比湿等信息,在全球范围内得到广泛应用。随后Böhm等人^[11]在此基础上提出了性能更高的GPT2w模型,相比GPT2模型新增了水汽垂直梯度等参数,并同时提供更高分辨率($1^\circ \times 1^\circ$)的产品。该模型中各气象参数的计算方法为

$$\begin{aligned} \xi &= A_0 + A_1 \cos\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 2\pi\right) + B_1 \sin\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 2\pi\right) \\ &\quad + A_2 \cos\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 4\pi\right) + B_2 \sin\left(\frac{\text{doy}}{365.25} 4\pi\right) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, ξ 表示格网点的气压和气温等气象参数,doy为年积日, A_0 为气象参数的平均值, A_1 和 B_1 为气象参数的年周期振幅, A_2 和 B_2 为气象参数的半年周期振幅。

2.3 ZTD实时修正模型

针对Sa模型在一些特殊地区计算ZTD时受限于探空数据不足造成修正精度过低的问题,本文提

出一种新的适用于中国地区的ZTD实时修正模型Sa+GPT2w模型,该模型利用GPT2w模型提供高精度的气象参数来优化Sa模型的输入信息,从而达到提高修正精度的目的,所提模型的具体实施步骤如下:

步骤1 确定研究测站(即图1中P点)相关信息(经纬度、高程、年积日)。

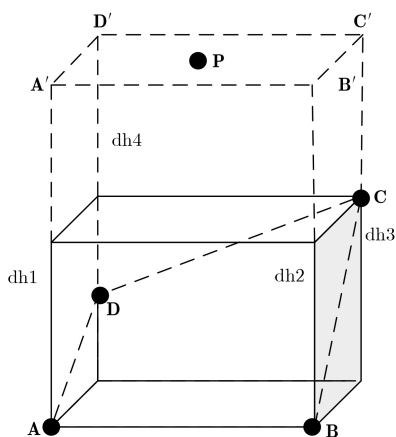


图1 利用GPT2w模型获取测站气象参数示意图

步骤2 利用式(3)求得距离测站最近的4个水平格网点(即图1中A, B, C和D点)的气象参数。

步骤3 根据式(4)分别将步骤2中所得4个水平格网点的气象参数进行高程修正(图1中dh1-4表示高程修正量),得到映射到测站所在平面高度上的格点(即图1中A', B', C'和D'点)参数。

$$\left. \begin{aligned} T_v &= T_0 \times (1 + 0.6077Q) \\ P &= P_0 \times \exp(-g_m \times dMtr / R_g / T_v) \times dh / 100 \\ T &= T_0 + dT \cdot dh \\ e_0 &= Q \cdot P / (0.622 + 0.378Q) / 100 \\ e &= e_0 \cdot (100P / P_0)^{de+1} \end{aligned} \right\} (4)$$

其中, P_0 , T_0 和 e_0 分别是水平格网点处的气压、温度和水汽压, Q 为比湿(g/kg), dT 为温度垂直梯度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$), dh 为高程修正量(m), de 为水汽压垂直梯度(mbar/m), T_v 为虚温(K), $dMtr$ 和 R_g 分别是大气摩尔质量和气体常数, g_m 为重力加速度。

步骤4 将4个格点处高程修正后的气象参数进行双线性内插处理,最终得到测站P处的气象参数。

步骤5 将所得研究测站位置P处的气象参数代入式(1),计算得到对流层天顶延迟值。

3 精度评估方法及标准

本文选用中国地区11个IGS测站2015-2017年度实测ZTD时间序列和GGOS Atmosphere提供的

2017年ZTD格网数据作为评估新模型计算ZTD精度的标准。同时为进一步客观地验证新模型的有效性,本文引入目前通用的EGNOS, UNB3m模型和天顶延迟计算经典模型Hopfield模型,分别构建形成Sa+EGNOS, Sa+UNB3m模型和Hop+GPT2w模型,在同一标准下同步进行精度评估分析。

3.1 天顶延迟标准数据

3.1.1 IGS测站ZTD时间序列

IGS综合全球多个分析中心的结果发布的全球对流层天顶延迟产品,是目前国际上公认精度最高的实测数据,可作为评估其他ZTD产品的标准^[12,13]。本文开展研究时所选用的IGS测站信息如表1所示。

表1 中国地区IGS测站信息(按纬度升序排列)

ID	测站	纬度($^{\circ}\text{N}$)	经度($^{\circ}\text{E}$)	高程(m)
A	TCMS	24.80	120.99	77.3
B	TWTF	24.95	121.16	184.0
C	KUNM	25.03	102.80	2019.1
D	LHAZ	29.66	91.10	3622.0
E	WUHN	30.53	114.36	42.6
F	SHAO	31.10	121.20	22.1
G	XIAN	34.37	109.22	498.5
H	BJFS	39.61	115.89	98.3
I	GUAO	43.47	87.17	2049.2
J	URUM	43.59	87.63	917.9
K	CHAN	43.79	125.44	253.7

3.1.2 GGOS Atmosphere ZTD格网数据

GGOS Atmosphere数据是维也纳科技大学基于ECMWF的数值气象资料,并结合Marini映射函数发布的全球ZTD产品,所提供的对流层干、湿项天顶延迟的空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2^{\circ}$ (经度 \times 纬度),时间分辨率为6 h。2017年,文献^[13,14]以分布于全球的343个IGS测站2015全年的ZTD资料为基准,对比分析了GGOS数据的精度,结果表明该数据足以满足一般导航定位中对流层延迟修正的需要。

3.2 同等条件下的组合模型精度对比

3.2.1 固定Sa模型

为准确研究GPT2w模型在中国地区的适用性,本文选用目前通用的EGNOS和UNB3m模型,在固定Sa模型的条件下构建形成Sa+EGNOS和Sa+UNB3m两种模型,与新模型共同参与精度评估^[15,16]。这两种模型在使用时首先应利用经验系数和相关公式将格网点数值进行内插和高程修正,获得测站位置的气象参数后再根据实际需求开展计算。

3.2.2 固定GPT2w模型

为确保对新模型进行精度评估时的客观性, 选用另一种天顶延迟经典计算模型Hopfield模型, 结合GPT2w模型构建形成Hop+GPT2w模型, 与Sa+GPT2w模型同步进行精度评估。

Hopfield模型认为对流层大气折射率在对流层中天顶方向上随海拔高度的变化特征如式(5)所示。

$$N_i(h) = \frac{N_i(H_i - h)^4}{(H_i - h_s)^4}, i = d, w \quad (5)$$

其中, h_s 为测站高程, N_d, N_w 分别为测站处折射率干、湿分量, H_d, H_w 分别为干、湿项等效高度。由此该模型将ZTD分为不受水汽影响的干延迟分量与与水汽变化相关的湿延迟分量, 其表达式为

$$\begin{aligned} ZTD &= ZHD + ZWD \\ &= 10^{-6} \times \frac{N_d(H_d - h_s)}{5} \\ &\quad + 10^{-6} \times \frac{N_w(H_w - h_s)}{5} \end{aligned} \quad (6)$$

3.3 数据预处理及精度评估

本文首先根据实际工程需求, 将研究区域内GGOS格网数据的分辨率由 $2.5^\circ \times 2^\circ$ 双线性内插值为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 然后利用Sa+GPT2w模型和2.2节中介绍的3种模型计算得到ZTD后, 分别以IGS和GGOS的数据为标准进行对比分析, 并按式(7)统计不同模型计算结果的平均偏差(bias)和均方根误差(RMS)。

$$\left. \begin{aligned} \text{bias} &= \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left(ZTD_d^{\text{IGS/GGOS}} - ZTD_d^{\text{Model}} \right) \\ \text{RMS} &= \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{d=1}^D \left(ZTD_d^{\text{IGS/GGOS}} - ZTD_d^{\text{Model}} \right)^2} \end{aligned} \right\} (7)$$

其中, D 为天顶延迟数据的样本数, $ZTD_d^{\text{IGS/GGOS}}$ 是标准值, ZTD_d^{Model} 是依据模型得到的理论计算值。

4 仿真算例

4.1 误差统计结果

4.1.1 以IGS数据为标准的误差统计结果

为了验证Sa+GPT2w模型计算ZTD的正确性和有效精度, 本文以中国地区11个IGS测站提供的2015年~2017年ZTD数据为标准值, 计算4种组合模型在各测站处的年均bias和RMS, 结果如表2所示。

4.1.2 以GGOS格网数据为标准的误差统计结果

由于中国地区IGS测站的数量较少且覆盖范围有限, 4.1.1节中的结果可能不能完全准确地反映各

组合模型在研究区域内的精度, 因此, 将研究区域内的2017年GGOS ZTD格网数据作为标准值, 数据内插处理后对以上4种组合模型重新进行检验, 误差统计结果如表3所示。

4.2 结果分析

表2和表3所列结果显示: 以IGS提供的ZTD数据为标准时, Sa+GPT2w模型在11个测站位置处计算ZTD的精度(RMS)较同等条件下的Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Hop+GPT2w模型分别提升50.5%, 41.9%和37.1%; 以GGOS ZTD数据为标准时, Sa+GPT2w模型的精度相对同等条件下的另3种模型分别提升49.5%, 38.5%和46.8%, Sa+GPT2w模型的ZTD修正效果明显。

Sa+EGNOS模型在4种组合模型中平均精度最差, 这与EGNOS模型气象参数的经验公式相对简单有关; Sa+UNB3m模型相对于IGS和GGOS数据的平均偏差分别为1.021 cm和1.393 cm, 均大于Leandro等人^[16]在研究中得出的0.5 cm的平均偏差, 这可能是由于UNB3m模型依托北美地区的探空数据建立而具有一定区域性, 另外本文引入Sa模型参与计算, 且选用的参考标准是中国地区的数据资料, 在一定程度上反映的仅是该模型在中国地区的精度; 同时该组合模型的平均偏差存在较多负值, 这使得Sa+GPT2w模型的平均偏差大于Sa+UNB3m模型。以IGS数据为标准时, Hop+GPT2w模型精度仅次于Sa+GPT2w模型, 在一定程度上也反映了GPT2w模型在中国地区的良好适用性, 但由于Hopfield模型计算ZTD的表达式的垂直梯度与高度无关, 而是温度的函数^[17], 使得Hop+GPT2w模型随测站高度增加精度降低, 相比于这一模型, Sa模型的梯度与高度这一变量具有相关性, 因而表现出较好的精度, 而采用GGOS数据为标准时由于地域范围广, 高程参量整体波动较大, 从而导致此种情况下Hop+GPT2w模型精度降低。

本文基于以上误差数值统计结果, 选择Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Sa+GPT2w 3种模型进行误差值的时空变化特征分析及后续验证研究。

4.2.1 平均偏差(bias)和均方根误差(RMS)的时间变化特征

为分析Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Sa+GPT2w 3种模型的ZTD计算值相对于IGS数据的两种误差值在时间上的变化特点, 把中国地区11个IGS测站处两种误差的平均值按月进行统计, 如图2所示。

图2中bias和RMS的年变化呈现稳定的周期性, 但2016年的数值大都高于另两年同期数值, 出

表2 相对IGS测站数据的误差统计结果(cm)

ID	年	Sa+EGNOS		Sa+UNB3m		Sa+GPT2w		Hop+GPT2w	
		bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS
A	2015	1.048	7.969	2.509	8.328	1.615	5.883	0.911	5.641
	2016	2.159	8.585	3.621	9.126	2.729	5.969	2.025	5.700
	2017	1.312	8.385	2.773	8.777	1.879	5.811	1.175	5.644
B	2015	0.214	7.736	2.622	8.148	1.497	5.768	1.951	5.906
	2016	1.100	8.216	3.508	8.854	2.386	5.743	2.839	5.956
	2017	0.316	8.102	2.724	8.519	1.600	5.649	2.053	5.804
C	2015	-6.939	9.817	3.631	7.251	0.530	3.595	10.546	11.207
	2016	-6.728	9.753	3.839	7.502	0.742	3.813	10.771	11.466
	2017	-6.756	9.977	3.814	7.634	0.713	3.732	10.735	11.417
D	2015	-10.197	11.839	1.494	4.427	0.355	1.667	12.816	12.938
	2016	-9.778	11.908	1.899	5.330	0.765	2.039	13.221	13.347
	2017	-10.007	12.117	1.626	5.224	0.486	1.906	12.95	13.055
E	2015	-2.216	10.376	-0.799	10.115	3.739	7.087	3.057	6.748
	2016	-1.250	11.535	0.160	11.381	4.710	8.061	4.028	7.673
	2017	-1.468	11.776	-0.060	11.577	4.485	7.843	3.803	7.465
F	2015	-2.810	11.278	-1.492	11.002	2.263	7.479	1.285	7.237
	2016	-1.591	11.837	-0.271	11.675	3.479	7.839	2.502	7.432
	2017	-2.531	12.166	-1.201	11.896	2.545	6.999	1.567	6.692
G	2015	-4.477	9.843	-0.053	8.354	1.763	5.257	3.966	6.345
	2016	-3.738	10.055	0.678	8.896	2.493	5.313	4.696	6.648
	2017	-4.066	10.106	0.358	8.816	2.172	5.314	4.375	6.526
H	2015	-3.988	9.464	-1.637	8.703	1.136	4.207	0.875	4.152
	2016	-3.576	10.227	-1.228	9.639	1.546	4.929	1.286	4.822
	2017	-4.088	10.626	-1.736	9.861	1.038	4.811	0.777	4.743
I	2015	-4.156	7.327	2.122	4.873	0.656	2.259	10.206	10.429
	2016	-3.727	7.334	2.541	5.408	1.073	2.727	10.615	10.906
	2017	-4.202	7.415	2.100	4.927	0.634	2.184	10.177	10.385
J	2015	-3.051	6.980	1.290	5.517	1.115	3.320	5.437	6.261
	2016	-2.440	7.308	1.890	6.324	1.711	4.069	6.033	7.064
	2017	-3.071	7.117	1.269	5.619	1.095	3.228	5.417	6.202
K	2015	-3.780	8.453	-1.401	7.474	0.640	3.447	1.282	3.654
	2016	-3.531	8.846	-1.155	8.008	0.882	3.712	1.524	3.907
	2017	-4.092	9.337	-1.716	8.323	0.327	3.815	0.969	3.922
平均		-3.397	9.509	1.021	8.106	1.661	4.711	5.026	7.494

现这一现象的原因是当年全国多地降水量突破历史极值,这一气候事件使得本就依靠平均数值预估气象参数的模型出现较大偏差^[18]。此外,bias和RMS值的变化具有明显的季节特性,其中RMS夏冬季较大,春秋季较小。同时,Sa+UNB3m模型的月均bias和RMS在冬季优于Sa+EGNOS模型,而后者在夏季则表现出较好的精度,这可能是因为冬季气候相对稳定,而夏季水汽变化复杂,使得UNB3m

模型对气象参数的估测出现较大的偏差。

为验证上述季节变化特征是否具有—般性,本文分别选用36°N和105°E(未覆盖任何IGS测站)格网线上的GGOS格点数据作为标准值,并对所有格点坐标处的bias和RMS进行统计,如图3所示(图中蓝、红、绿色分别对应Sa+EGNOS,Sa+UNB3m,Sa+GPT2w模型)。结果表明,3种模型误差结果的时间分布特性为:在夏季符合精度较差,春、秋季

表3 相对GGOS格网数据的误差统计结果(cm)

统计类型	Sa+EGNOS	Sa+UNB3m	Sa+GPT2w	Hop+GPT2w	
bias	Min	-6.961	-0.812	-0.086	2.716
	Max	1.932	3.461	3.445	9.473
	Mean	-3.605	1.393	1.551	6.581
RMS	Min	7.768	5.480	2.585	6.928
	Max	11.428	10.010	7.284	11.786
	Mean	9.631	7.899	4.859	9.135

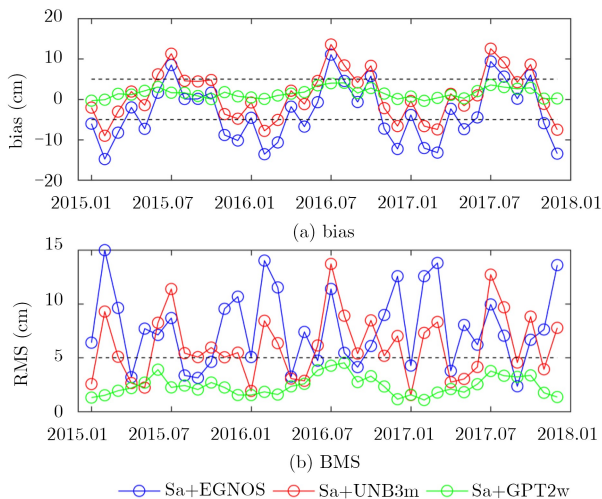


图2 IGS测站处的误差月均值变化示意图

符合精度较好; 同时, Sa+UNB3m模型的bias和RMS在冬季优于Sa+EGNOS模型, 在每年1月, 4月左右与Sa+GPT2w模型基本相当, 而Sa+EGNOS模型在夏季优于Sa+UNB3m模型, 但相比Sa+GPT2w模型精度较差。

4.2.2 平均偏差(bias)和均方根误差(RMS)的空间变化特征

为了分析bias和RMS在空间上的分布情况, 本文选择2017年两个年积日(doy = 1, 181)的GGOS ZTD数据为标准值, 统计3种气象模型参数用于计算ZTD的bias和RMS数值结果, 如图4所示。

结果显示: bias与RMS在高海拔以及水汽丰富

地区易出现较大偏差, 尤其是夏季表现明显, 但结合全年数据以及表3结果, bias的变化趋势与测站高程的变化并没有明显的相关性, 相反RMS易受高程影响(Sa+EGNOS模型表现出随测站高程增加而增加, Sa+GPT2w和Sa+UNB3m模型表现出随测站高程增加而减小), 这是由于ZTD本身分布与高度有密切关系, 同时气象参数在预处理过程中由于高程改正系数的精度不一, 也使得高程这一参量所带来的差异性进一步加大。而沿海地区易受海洋气候影响, 水汽变化复杂, 对水汽估测的精度不足可能是造成所有模型均出现较大误差的原因。除去特殊气候地区, bias与RMS随纬度的升高数值逐渐减小, 而在经度方向上没有明显的变化趋势。

从表3和图4分析可得: 3种模型在局部水汽丰富地区均会出现较大偏差(如TCMS, WUHN和SHAO等测站附近区域), 但Sa+GPT2w的精度相对最优。另外, Sa+UNB3m模型在高海拔地区精度一般, 而Sa+EGNOS模型随测站高程增加精度降低。

4.3 精度复验

综合上述分析, 可认为Sa+GPT2w的精度整体上优于Sa+EGNOS和Sa+UNB3m模型, GPT2w模型的气象参数更符合中国地区的实际情况, 可用于高精度ZTD修正的研究。在此基础上, 选择TWTF, XIAN和GUAO 3个IGS测站2012年全年和2018.01.01~2018.03.15(季节划分上主要为冬季)的实测ZTD数据, 进一步验证GPT2w模型的精度, 以确定其在时间上的一般性, 结果如表4所示。

根据上述内容可得: Sa+EGNOS, Sa+UNB3m模型分别在夏季的沿海和冬季的高海拔地区精度较好, Sa+GPT2w模型在不同地域、不同时间段内均保持较高精度, 以上结果符合前述结论。另外各测站2018年的bias为负值, 仅反映该模型在前3个月的误差结果, 且在其他年份的同一时期有着相同的特征。

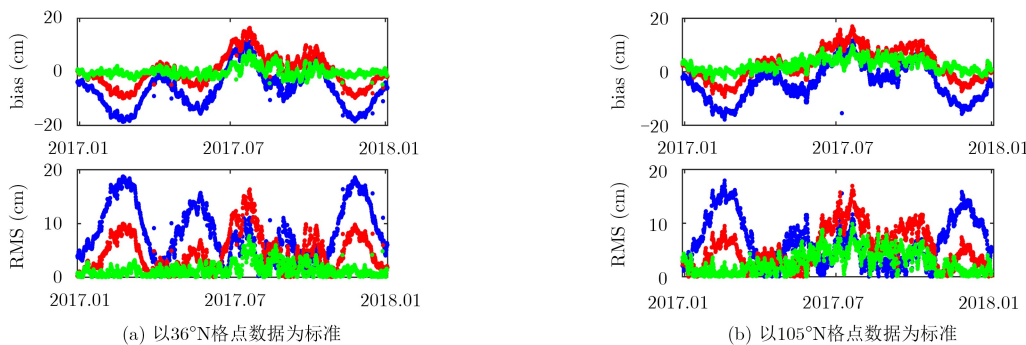


图3 以中国地区GGOS格点数据为标准的误差变化示意图

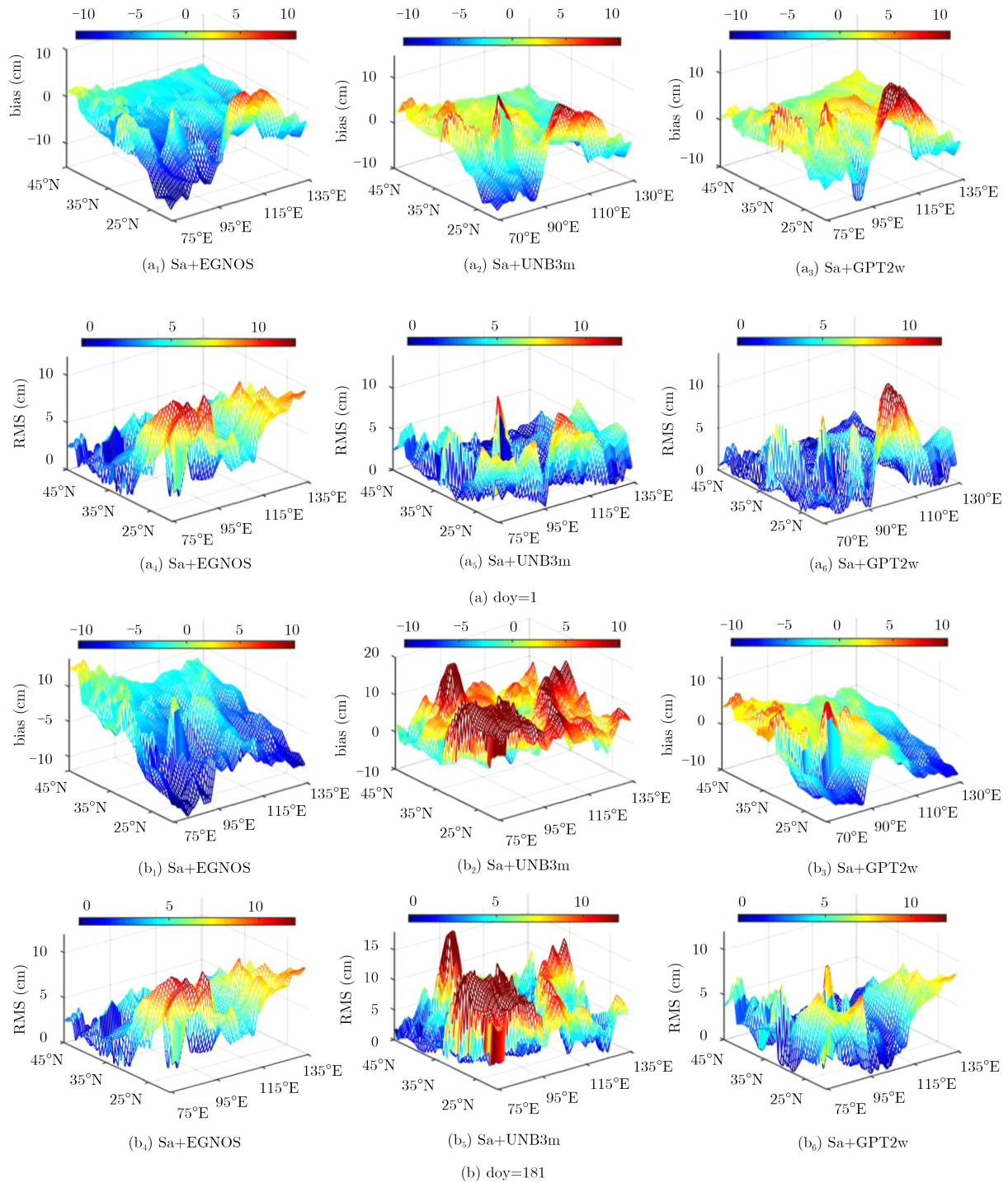


图4 以2017年GGOS数据为标准时不同年积日的bias和RMS空间变化示意图

表4 相对IGS数据的误差统计结果(cm)

ID	年份	Sa+EGNOS		Sa+UNB3m		Sa+GPT2w	
		bias	RMS	bias	RMS	bias	RMS
B	2012	0.240	7.435	2.648	7.900	1.775	5.965
	2018	-7.218	9.611	-4.839	7.940	-0.058	5.082
G	2012	-4.849	10.676	-0.419	9.080	1.375	5.153
	2018	-11.801	13.128	-7.368	8.823	-0.069	2.302
I	2012	-4.717	7.863	1.564	4.861	0.086	2.005
	2018	-8.477	9.787	-1.877	3.303	-0.303	1.104

5 结束语

基于传统ZTD修正模型建模思路,本文引入GPT2w模型与Saastamoinen模型相结合,由此形成组合模型Sa+GPT2w模型,并将其应用于中国地区的ZTD修正。利用中国地区11个IGS测站ZTD时间序列和GGOS ZTD格网数据对模型进行了精度验证,确保了Sa+GPT2w模型用于ZTD实时修正的可靠性,同时与Sa+EGNOS, Sa+UNB3m模型和Hop+GPT2w模型进行了横向比较,并分析了Sa+EGNOS, Sa+UNB3m和Sa+GPT2w 3种组合模型计算ZTD的误差结果的时空分布特征。结果表明,无论是以IGS数据还是GGOS数据为参照标准, Sa+GPT2w模型计算ZTD的精度均优于同等条件下其他同类型组合模型,且Sa+GPT2w模型计算误差结果的时空分布变化趋势与Sa+EGNOS, Sa+UNB3m模型基本一致,同时其精度随测站纬度升高、高程增加而提高, Sa+GPT2w模型更符合中国地区的实际情况,该模型可在保证精度的情况下用于中国地区ZTD的实时性应用与研究。

目前国内绝大多数导航定位的用户都没有实测的气象数据,在这种情况下,为了获得具有一定精度的对流层天顶延迟值,采用经验模型获取测站处气象参数是比较理想的选择。但通过模型获取的大气参数毕竟不能反映真实电波传播路径上的环境信息,尤其在下垫面和空间环境复杂的地区误差会更大,希望将来可依靠更简便且分辨率更高的大气探测方法,为ZTD修正提供更加精确的大气环境参数。

参考文献

- [1] 赵静暘, 宋淑丽, 陈钦明, 等. 基于垂直剖面函数式的全球对流层天顶延迟模型的建立[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3140–3153. doi: [10.6038/cjg20141005](https://doi.org/10.6038/cjg20141005).
ZHAO Jingyang, SONG Shuli, CHEN Qinming, et al. Establishment of a new global model for zenith tropospheric delay based on functional expression for its vertical profile[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3140–3153. doi: [10.6038/cjg20141005](https://doi.org/10.6038/cjg20141005).
- [2] 姚宜斌, 何畅勇, 张豹, 等. 一种新的全球对流层天顶延迟模型GZTD[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2218–2227. doi: [10.6038/cjg20130709](https://doi.org/10.6038/cjg20130709).
YAO Yibin, HE Changyong, ZHANG Bao, et al. A new global zenith tropospheric delay model GZTD[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7): 2218–2227. doi: [10.6038/cjg20130709](https://doi.org/10.6038/cjg20130709).
- [3] HOPFIELD H S. Troposphere effect on electromagnetic measured range: Prediction from surface weather data[J]. *Radio Science*, 1971, 6(3): 357–367. doi: [10.1029/RS006i003p00357](https://doi.org/10.1029/RS006i003p00357).
- [4] SAASTAMOINEN J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites[J]. *Use of Artificial Satellites for Geodesy*, 1972, 15(6): 247–251. doi: [10.1029/GM015p0247](https://doi.org/10.1029/GM015p0247).
- [5] 杨祥, 喻国荣, 潘树国, 等. 一种综合的对流层延迟模型算法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(S2): 418–422. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.043](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.043).
YANG Yang, YU Guorong, PAN Shuguo, et al. A comprehensive algorithm using fusion of tropospheric delay models[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2013, 43(S2): 418–422. doi: [10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.043](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0505.2013.S2.043).
- [6] 姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型[J]. 地球物理学报, 2015, 58(5): 1492–1501. doi: [10.6038/cjg20150503](https://doi.org/10.6038/cjg20150503).
YAO Yibin, ZHANG Bao, YAN Feng, et al. Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1492–1501. doi: [10.6038/cjg20150503](https://doi.org/10.6038/cjg20150503).
- [7] 刘继业, 陈西宏, 刘赞. 对流层散射双向时间比中对对流层斜延迟实时估计[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(3): 587–593. doi: [10.11999/JEIT170581](https://doi.org/10.11999/JEIT170581).
LIU Jiye, CHEN Xihong, and LIU Zan. Real-time estimation of tropospheric slant delay in two-way troposphere time transfer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(3): 587–593. doi: [10.11999/JEIT170581](https://doi.org/10.11999/JEIT170581).
- [8] 滑中豪, 柳林涛, 梁星辉. GPT2w模型检验以及对流层模型的参数互融[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2017, 42(10): 1468–1473. doi: [10.13203/j.whugis20150758](https://doi.org/10.13203/j.whugis20150758).
HUA Zhonghao, LIU Lintao, and LIANG Xinghui. An assessment of GPT2w model and fusion of a troposphere model with in situ data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1468–1473. doi: [10.13203/j.whugis20150758](https://doi.org/10.13203/j.whugis20150758).
- [9] 施宏凯, 何秀凤, 王俊杰. 全球气压气温模型在中国地区的精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(8): 841–844. doi: [10.14075/j.jgg.2017.08.014](https://doi.org/10.14075/j.jgg.2017.08.014).
SHI Hongkai, HE Xiufeng, and WANG Junjie. Accuracy analyses of global pressure and temperature model in China[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(8): 841–844. doi: [10.14075/j.jgg.2017.08.014](https://doi.org/10.14075/j.jgg.2017.08.014).
- [10] LAGLER K, SCHINDELEGGGER M, and NILSSON T. GPT2: Empirical slant delay model for radio space geodetic techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(6): 1069–1073. doi: [10.1002/grl.50288](https://doi.org/10.1002/grl.50288).
- [11] BÖHM J, MÖLLER G, SCHINDELEGGGER M, et al. Development of an improved empirical model for slant delays in the troposphere (GPT2w)[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 433–441. doi: [10.1007/s10291-014-0403-7](https://doi.org/10.1007/s10291-014-0403-7).
- [12] BRAUN J, ROCKEN C, and WARE R. Validation of line-of-sight water vapor measurements with GPS[J]. *Radio*

- Science*, 2001, 36(3): 459–472. doi: [10.1029/2000RS002353](https://doi.org/10.1029/2000RS002353).
- [13] 姚宜斌, 徐星宇, 胡羽丰. GGOS对流层延迟产品精度分析及在PPP中的应用[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 278–287. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20160383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20160383).
YAO Yibin, XU Xingyu, and HU Yufeng. Precision analysis of GGOS tropospheric delay product and its application in PPP[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 278–287. doi: [10.11947/j.AGCS.2017.20160383](https://doi.org/10.11947/j.AGCS.2017.20160383).
- [14] ASKNE J and NORDIUS H. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data[J]. *Radio Science*, 1987, 22(3): 379–386. doi: [10.1029/RS022i003p00379](https://doi.org/10.1029/RS022i003p00379).
- [15] NIGEL P and ALAN D. Assessment of EGNOS tropospheric correction model[J]. *Journal of Navigation*, 1999, 54(1): 37–55.
- [16] LEANDRO R F, LANGLEY R B, and SANTOS M C. UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for radiometric space techniques[J]. *GPS Solutions*, 2008, 12(1): 65–70. doi: [10.1007/s10291-007-0077-5](https://doi.org/10.1007/s10291-007-0077-5).
- [17] QU Weijing, ZHU Wenyao, SONG Shuli, et al. Evaluation of the precision of three tropospheric delay correction models[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2008, 32(4): 429–438. doi: [10.1016/j.chin astron.2008.10.010](https://doi.org/10.1016/j.chin astron.2008.10.010).
- [18] 中国天气网. 2016年中国十大天气气候事件评选结果[OL]. <http://news.weather.com.cn/2016/12/2638475.shtml>. 2016. 12.

杜晓燕: 女, 1975年生, 副教授, 研究方向为电磁场、微波技术与天线等.

乔江: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为对流层电波传播.

卫佩佩: 女, 1990年生, 博士生, 研究方向为电波传播、电磁计算及反演问题等.

《稀疏微波成像导论》书荐

科学出版社 张艳芬

吴一戎院士及其团队长期从事微波成像和合成孔径雷达(SAR)等方面的研究,《稀疏微波成像导论》是吴院士团队的最新成果。

微波成像是我国“高分辨率对地观测系统”重大专项中的重要观测手段。合成孔径雷达是微波成像的一种重要形式,已成为遥感应用不可或缺的手段。现有基于奈奎斯特采样定理和经典数字信号处理理论的微波成像系统存在雷达规模庞大甚至无法实现、海量数据存储/传输难以实现、成像处理方法复杂且效率受限以及信息冗余和特征提取困难等瓶颈问题,迫切需要开展基于稀疏理论的微波成像基础性和前沿性研究。

稀疏微波成像是将稀疏信号处理理论引入微波成像,且两者有机结合形成微波成像新理论、新体制和新方法,即通过寻找被观测对象的稀疏表征域,在空间、时间、频谱或极化域稀疏采样获取被观测对象的稀疏微波信号,经信号处理和信息提取,获取被观测对象的空间位置、散射特征和运动特性等几何与物理特征。

如何将稀疏信号处理应用于SAR经历了长期的探索过程。由于在观测场景的稀疏表征、大场景海量数据重构的计算复杂性、系统与重构性能评估等方面存在挑战,在初始研究阶段,将稀疏信号处理应用于SAR系统及其成像在国际上存在一定争议。

在中华人民共和国科学技术部、国家自然科学基金委员会、中国科学院等相关部门的大力支持下,吴一戎院士带领团队系统深入地开展了稀疏微波成像研究。该团队在稀疏微波成像体制、稀疏微波成像非模糊重建方法、基于三维相变图的稀疏微波成像性能评估手段等方面取得了重要原创性成果,并成功开展了星载、机载、地基等原理性验证实验。研究表明,稀疏微波成像不仅具有实现更优性能指标SAR系统的潜力,而且可提升现有雷达系统的成像性能。科学出版社出版的《稀疏微波成像导论》系统地总结了吴一戎团队近十年的科研成果,它是稀疏信号处理应用于雷达领域研究方面不可多得资料。

该书系统地介绍了稀疏微波成像理论、体制、方法和实验,主要包括:建立稀疏微波成像模型,介绍其稀疏表征、观测约束和性能评估;详细阐述基于成像算子的SAR原始数据域快速重构方法,将其应用于ScanSAR、TOPSAR、滑动聚束等工作模式,并推广至基于偏置相位中心的一发多收SAR成像;给出机载原理性验证实验结果和初步星载雷达系统设计实例。

《稀疏微波成像导论》涵盖了稀疏微波成像的理论发展与实践成果,为从事雷达系统与信号处理应用领域研究的学者提供了详实的技术资料,为该技术未来的发展指明了方向。更多的稀疏微波成像技术在雷达领域的推广可参考《稀疏微波成像应用》一书。这些研究成果在理论和实践上具有开拓性和创新性;在侦察监视与预警、高精度测绘与资源调查、自然灾害与环境监测等国家重大需求领域具有广阔的应用前景。

