

基于 BDS 精密星历产品的水汽探测性能分析

吴旭祥, 郭秋英, 侯建辉

(山东建筑大学 测绘地理信息学院, 山东 济南 250101)

摘要: 研究北斗卫星导航系统(BDS)反演大气可降水量的性能有利于推动 BDS 在数值天气预报、气象学研究等方面的应用。基于武汉大学发布的 BDS 最终精密星历产品(WUM)、快速精密星历产品(WHR)和超快速精密星历产品(WHU),利用 MGEX 站和单基站连续运行参考站(CORS)提供的全球卫星导航系统(GNSS)多模观测数据,在验证三种 BDS 精密星历产品解算对流层天顶延迟的精度达到要求后,将基于三种 BDS 精密星历产品解算的大气可降水量分别与 GPS 水汽探测结果、ERA-5 再分析资料和探空站数据进行对比,分析基于三种精密星历产品的 BDS 水汽探测性能。实验结果表明:基于 BDS 最终精密星历产品的大气水汽探测精度高于快速星历产品和超快速星历产品,三种 BDS 星历产品反演大气可降水量的相对精度和可靠性与 GPS 相当,满足中小尺度数值天气预报和气象学研究等要求。

关键词: 北斗;精密星历;大气可降水量;MGEX;ERA-5 再分析资料

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)05-0091-09

0 引言

水汽是大气的重要组成部分,在天气及气候变化中起重要作用,在气象学中通常以大气可降水量(PWV)来表示空气柱中的水汽总量,其值反映了大气中水汽含量的丰富程度。实时获取 PWV 对于中小尺度天气预报、气象学研究等有重要意义。

近年来,随着我国北斗卫星导航系统(BDS)的发展和完善,国内外众多学者开始结合气象学领域对 BDS 的水汽探测性能进行评估分析,基于地基 BDS 的大气水汽探测技术也初步应用于气象监测、数值天气预报等领域,实现对大气水汽的低成本、全天候、稳定和实时监测,为改善中小尺度数值天气预报和气象学研究提供重要的、较为理想的大气水汽观测数据,具有良好的应用和发展前景^[1]。

本文基于全球卫星导航系统(GNSS)双差定位技术,利用多模 GNSS 实验项目(MGEX)和单基站连续运行参考站(CORS)提供的多星座观测

数据,采用武汉大学发布的 BDS 最终精密星历产品(WUM)、快速精密星历产品(WHR)和超快速精密星历产品(WHU),利用 GAMIT 软件解算获得大气水汽结果,分别与 IGS 对流层延迟产品、GPS 水汽探测结果、欧洲中期气象预报中心(ECMWF)的 ERA-5 再分析资料产品和美国怀俄明州立大学(UW)提供的探空站数据进行对比,分析验证当前三种星历产品应用于 BDS 卫星水汽探测的精度及可靠性,为进一步提高 BDS 卫星的水汽探测性能提供一定的参考。

1 地基 GNSS 水汽探测原理

卫星信号在中性大气层传播时受大气成分的影响,其传播速度减慢,传播路径发生弯曲,从而产生信号延迟,称为对流层延迟^[2]。处理对流层延迟通常是将斜路径方向的对流层延迟转化到天顶方向上,其公式表示为

$$ZTD = ZHD + ZWD, \quad (1)$$

收稿日期: 2019-06-03

资助项目: 山东省自然科学基金(ZR2017MD029);山东省住房城乡建设科技项目(2017-R1-004)

通信作者: 郭秋英 E-mail: qyguo@sdjuz.edu.cn

式中: ZTD 为与卫星仰角 θ 有关的对流层总延迟量; ZHD 为对流层天顶静力延迟, 也称为对流层天顶干延迟; ZWD 为对流层天顶湿延迟。

干燥空气引起的 ZHD 较为稳定, 存在一定规律性, 可以通过萨斯塔莫宁 (Saastamoinen) 模型^[3]、霍普菲尔德 (Hopfield) 模型^[4] 等较好地推算得到, 本文选择萨斯塔莫宁模型计算静力学延迟, 即

$$\begin{cases} ZHD = (2.279 \pm 0.0024) \times P_s / F(\lambda, H), \\ ZWD = 0.002277 \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e_0 / F(\lambda, H), \\ F(\lambda, H) = 1 - 0.0026 \cos 2\lambda - 0.0028H. \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_s 为测站地表气压, hPa; e_0 为水汽压, mbar; T 为温度, K; λ 为测站地理纬度; H 为测站大地高, km。

水汽的时空变化较为剧烈, ZWD 通过数学模型计算会产生 cm 级误差^[5]。因此一般不用模型表达 ZWD , 而是从 ZTD 中减去 ZHD 得到 ZWD 。 PWV 与 ZWD 存在以下比例关系:

$$PWV = \Pi \times ZWD, \quad (3)$$

式中, Π 为与对流层温度有关的转换系数, 有

$$\Pi = 10^6 \left[\rho \cdot R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

式中: k_3 、 k'_2 为大气折射系数; R_v 为水汽的气体常数; T_m 为加权平均温度, 是指根据水汽压加权的大气温度平均值。加权平均温度是影响 PWV 反演精度的一个重要参数, 在没有实测气象数据的情况下, 可以使用全球大地测量观测系统 (GGOS) 发布的 GPT2 模型计算出对应时间对应地点的 P_s 和 T_m ^[6-7]。

2 数据处理及分析

2.1 数据来源

2011 年起国际 GNSS 服务中心 (IGS) 开展了跟踪、收集和分析全球可用的 GNSS 信号的 MGEX 项目, 对外提供多模 GNSS 观测数据和星历等产品^[8]。

本次实验利用单基站 CORS 和 MGEX 站 2018 年年积日 120~150 d 共 31 天的观测数据, 其测站分布位置如图 1 所示。其中, 山东建筑大学卫星导航定位实验室提供单基站 CORS 多模观测数据, 测站点名标记为 JZDX。亚太地区选取 8 个提

供多模观测数据的 MGEX 测站, 测站点名分别是 BRUN、CMUM、GMSD、HKWS、JFNG、KARR、KIRI、MCHL。以上观测数据均包含 BDS 和 GPS 观测量, 采样间隔为 30 s。

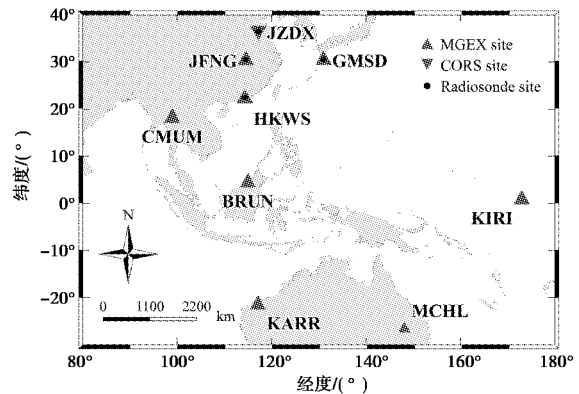


图 1 测站分布图

武汉大学针对 BDS 发布了三种不同时效性需求的 BDS 星历轨道产品, 分别为 WUM、WHR、WHU。其中 WUM、WHR 常用于事后数据处理, WHU 常用于实时性数据处理。

2.2 数据分析

为分析 BDS 卫星水汽探测的性能, 评价 BDS 反演 PWV 的外符合精度, 将基于三种 BDS 精密星历解算的 BDS/ PWV 分别与 IGS 对流层延迟产品、GPS 水汽探测结果、ERA-5 再分析资料产品和探空站数据进行对比。

2.2.1 BDS 反演 ZTD 精度分析

ZTD 是反演大气水汽含量的重要影响因素, 其精度在很大程度上影响到 PWV 的解算精度, IGS 提供采样间隔 5 min, 精度优于 4 mm 的对流层天顶延迟产品, 该产品具有较高的精度和可靠性, 可以作为评定大气水汽解算精度和可靠性的外符合手段之一^[9]。

本次实验获取到 GMSD、HKWS、JFNG、KARR、KIRI 和 MCHL 共 6 个测站的 IGS 对流层天顶延迟产品, 上述 6 个测站的 BDS ZTD 解算值和 GPS 基于最终精密星历 (IGF) 解算的 ZTD 与对应的 IGS 对流层天顶延迟产品的 RMS 统计情况如图 2 所示, 由于篇幅原因限制, 图 3 示出了只取 HKWS 站 BDS/ ZTD 和 IGS/ ZTD 的时间序列。

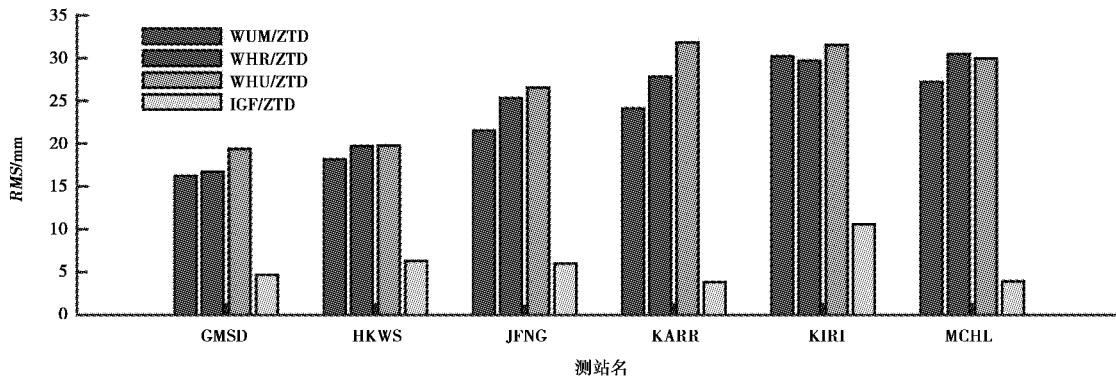


图 2 BDS、GPS 的 ZTD 解算值与 IGS/ZTD 偏差的 RMS

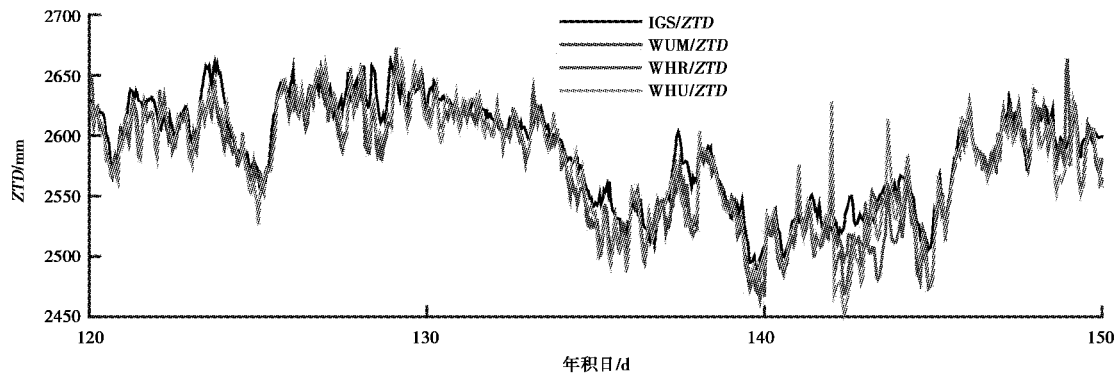


图 3 HKWS 站 ZTD 时间序列

从图 2~3 看出,三种 BDS 星历中 WUM 解算 ZTD 的精度最高, WHR 解算 ZTD 的精度次之, WHU 解算 ZTD 精度稍逊于前两者. BDS 整体与 GPS 基于 IGF 解算的 ZTD 相比存在 1~2 cm 左右的差异, BDS 解算 ZTD 的变化趋势较为一致, 但精度要低于 GPS.

表 1 示出了根据三种 BDS 星历产品进行分类,统计 BDS/ZTD 与 IGS 对流层天顶延迟产品

的数值差异情况.从表 1 可以看出,三种 BDS 星历的 ZTD 解算值分别有 4464、4326 和 4464 个,与 IGS/ZTD 的平均偏差(Bias)均大于 7 mm,标准差(S_{td})大于 22.09 mm,均方根值(RMS)大于 23.37 mm.结合图 3 可以发现 BDS 解算 ZTD 的结果中存在较多的异常值,考虑到粗差影响,在将大于三倍中误差的数值剔除掉后, BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的 S_{td} 大于 19.80 mm, RMS 大于 21.15 mm.

表 1 BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的差异统计

星历	总计数	偏差/mm	S_{td} /mm	RMS/mm	剔除 $>3\sigma$ 后 S_{td} /mm	剔除 $>3\sigma$ 后 RMS/mm	相关系数
WUM	4464	7.64	22.09	23.37	19.80	21.15	0.985
WHR	4326	7.36	24.35	25.44	22.00	23.05	0.982
WHU	4464	7.62	25.88	26.97	23.63	24.82	0.980

获取可用的、高精度的大气水汽含量的重要因素是卫星的轨道精度,段晓梅等^[9-10]研究发现对于 1000 km 的长基线,10 cm 的卫星轨道误差会引起 1.3 mm 的 ZWD 误差,0.2 mm 的 PWV 误差.通过了解 BDS 卫星的轨道设计可知,BDS 按轨道有地球静止轨道卫星(GEO)、倾斜同步轨道卫星(IGSO)和中圆轨道卫星(MEO)三种卫星共同组

成空间部分.但 GEO 卫星分布的几何结构较差,轨道、钟差和模糊度等参数相关性较高,定轨法方程呈病态,导致 GEO 卫星切向存在 1~4 m 的常偏量误差^[11],轨道误差远高于 IGSO 和 MEO 卫星.

考虑到参与解算的观测站均位于亚太地区, BDS 卫星观测条件较好,测站每日可观测 BDS 卫

星的总数在 12 颗左右,每日可观测 IGSO 和 MEO 卫星总数在 8 颗左右.张婧宇^[12]等通过实验发现对可见 BDS 卫星数大于 8 颗的测站而言,解算的 ZTD 具有与 GPS/ZTD 相当的精度.因此在 BDS

卫星观测条件较好的区域,解算策略上采取只使用轨道精度较高的 IGSO 和 MEO 卫星的方法,在一定程度上能提高 BDS 水汽反演精度.

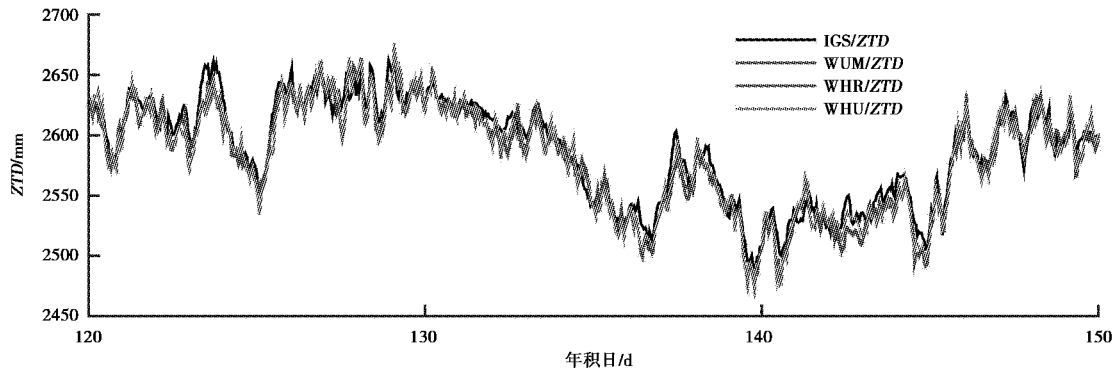


图 4 HKWS 站 ZTD 时间序列(不含 GEO 卫星)

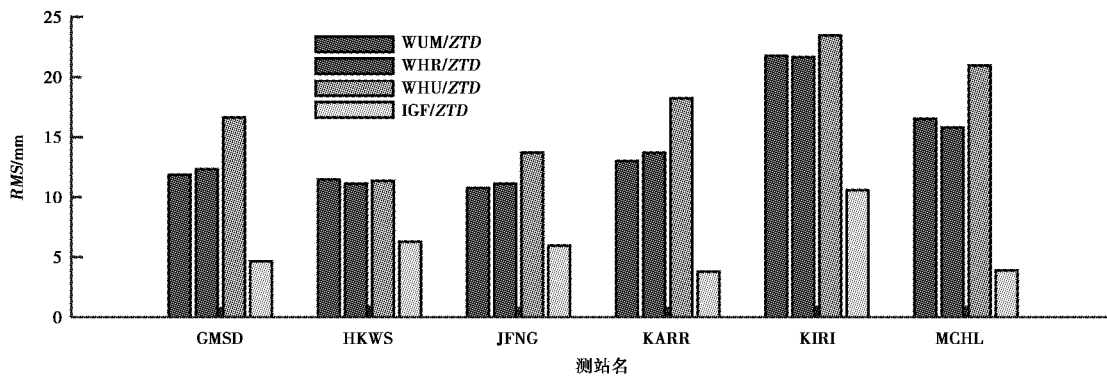


图 5 BDS、GPS 的 ZTD 解算值与 IGS/ZTD 偏差的 RMS(不含 GEO 卫星)

采取只使用 IGSO 和 MEO 卫星的解算策略后重新解算 ZTD, HKWS 站 BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 时间序列如图 4 所示,两者吻合程度与一致性较之前明显提高,异常值数量较图 3 有明显减少.图 5 示出了 6 个测站 ZTD 的 RMS 统计情况,可以看出各测站的 RMS 数值较图 2 有明显的减小.表 2 示出了 BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的数值差异情况再次分类统计, BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的偏差降低到 5 mm 左右, S_{id} 小于 17.01 mm, RMS

小于 17.84 mm.在剔除三倍中误差后, S_{id} 最小为 11.95 mm, RMS 最小为 13.16 mm, BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的相关系数均高于 0.99, 表现为正相关且强相关. WUM、WHR 和 WHU 解算 ZTD 的 RMS 分别为 13.16 mm、13.21 mm 和 16.40 mm, 较之前分别减小 37.8%、42.7% 和 33.9%, 整体精度与使用 GEO 卫星解算 ZTD 相比有明显提高.因此在后续的实验中也采取只使用 IGSO 和 MEO 卫星的解算策略进行解算.

表 2 BDS/ZTD 与 IGS/ZTD 的差异统计(不含 GEO 卫星)

星历	总计数	偏差/mm	S_{id} /mm	RMS/mm	剔除 $>3\sigma$ 后 S_{id} /mm	剔除 $>3\sigma$ 后 RMS/mm	相关系数
WUM	4464	5.26	13.72	14.69	11.95	13.16	0.994
WHR	4326	5.20	13.74	14.69	12.05	13.21	0.994
WHU	4464	5.39	17.01	17.84	15.48	16.40	0.991

2.2.2 BDS/PWV 与 GPS/PWV 对比分析

1993 年 Rocken^[13] 等通过 GPS/SRTOM 实

验,将 GPS 解算的 PWV 与水汽辐射计结果进行对比,结果显示两者偏差小于 0.5 mm, RMS 达到

1.5 mm,验证了 GPS 反演 PWV 的精度.为评价 BDS 使用三种星历产品反演 PWV 的外符合精度,将三种 BDS 星历产品解算的 PWV 与 GPS 使用 IGF 解算的 PWV 进行对比分析.篇幅限制原因,图 6 示出了 HKWS 站应用三种 BDS 星历解算的 PWV 与 IGF/ PWV 的数值差异情况.图 7 示出了

9 个测站使用三种 BDS 星历解算的 PWV 与 IGF/ PWV 的整体相关性拟合情况.从图 6、图 7 可以看出三种 BDS 星历产品的解算 PWV 与 IGF/ PWV 相比,BDS 与 GPS 的整体偏差在 5 mm 以内,稳定性较好. R^2 大于 0.97,表现为较高的拟合优度. P 值为 0,表示差异具有高度统计意义.

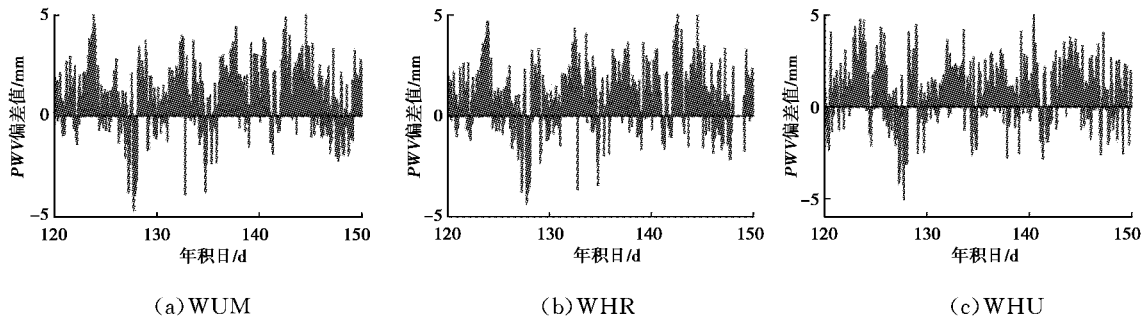


图 6 HKWS 站 BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 数值偏差序列

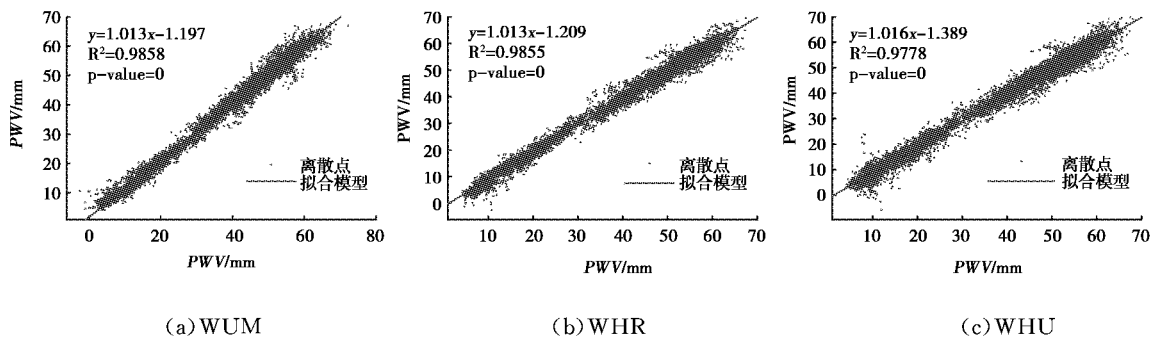


图 7 BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 相关性分析

表 3 示出了 BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 之间的差异统计,从表 3 可以看出:BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 的偏差在 0.7 mm 左右, S_{td} 小于 2.76 mm, RMS 小于 2.81 mm,在剔除掉大于三倍中误差的

数值之后 S_{td} 小于 2.50 mm, RMS 小于 2.61 mm. BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 相关系数高于 0.98,表现为强相关性.综上可以认为,BDS 与 GPS 吻合程度较高,具有很好的一致性.

表 3 BDS/ PWV 与 IGF/ PWV 的差异统计

星历	总计数	偏差/mm	S_{td} /mm	RMS /mm	剔除 $>3\sigma$ 后 S_{td} /mm	剔除 $>3\sigma$ 后 RMS /mm	相关系数
WUM	6665	0.66	2.35	2.26	1.99	2.11	0.993
WHR	6458	0.69	2.21	2.27	2.03	2.14	0.993
WHU	6665	0.74	2.76	2.81	2.50	2.61	0.989

2.2.3 BDS/ PWV 与 ERA-5/ PWV 对比分析

ECMWF 是国际上权威的天气预报研究和业务机构,对外发布高精度的再分析模式和预报产品.ERA-5 是 ECMWF 发布的第 5 代全球气候再分析资料产品,ERA-5 提供分析场水平分辨率为 31 km 的逐小时格点气候数据记录^[14],通过与测

站点相邻的 4 个格网点到测站的距离,采用双线性内插的方法得到对应测站点的 PWV 时间序列 (ERA-5/ PWV).

图 8 示出了 9 个测站 BDS、GPS 解算的 PWV 和对应的 ERA-5/ PWV 数值差异的 RMS 统计情况,可以看出三种北斗星历解算的 PWV 与 ERA-

5/PWV相比,RMS在3 mm左右,WUM星历整体的精度要高于WHR和WHU,稍低于GPS.图9示出HKWS站BDS/PWV和ERA-5/PWV的

数值序列,序列表现出较高的一致性,无明显系统性偏差.

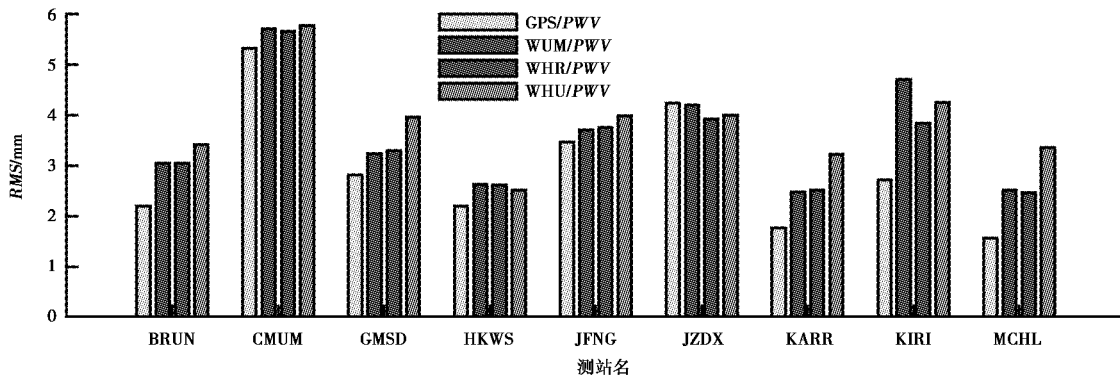


图8 PWV解算值与ERA-5/PWV偏差的RMS

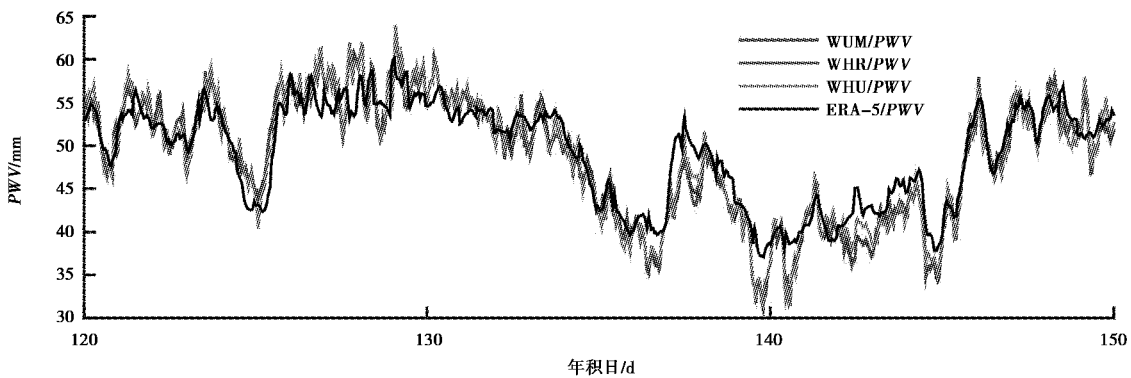


图9 HKWS站PWV时间序列

将BDS/PWV按星历进行分类后与ERA-5比较得到表4所示结果,三种星历的PWV解算值与ERA-5/PWV的偏差在0.3 mm左右, S_{id} 小于3.94 mm,RMS小于3.91 mm,在剔除掉大于三倍中误差的数值之后 S_{id} 小于3.74 mm,RMS小于3.74 mm. WUM、WHR和WHU三种星历解算PWV的RMS分别为3.44 mm、3.47 mm和3.74 mm,WUM精度优于WHR和WHU.三种星历解算的PWV与ERA-5/PWV相比较,相关系数均

高于0.97,相关性较强.

图10示出了9个测站基于BDS三种星历解算的PWV与ERA-5/PWV的整体相关性拟合情况,从图10可以看出三种BDS星历产品的解算PWV与ERA-5/PWV相比, R^2 均在0.95以上,与ERA-5再分析资料拟合程度较高,稳定性较好,具有较高的可靠性.P值均为0,差异具有高度统计意义.

表4 BDS/PWV与ERA-5/PWV的差异统计

星历	总计数	偏差/mm	S_{id} /mm	RMS/mm	剔除 $>3\sigma$ 后 S_{id} /mm	剔除 $>3\sigma$ 后 RMS/mm	相关系数
WUM	6322	0.30	3.58	3.56	3.44	3.44	0.978
WHR	6319	0.26	3.61	3.59	3.46	3.47	0.980
WHU	6322	0.22	3.94	3.91	3.74	3.74	0.976

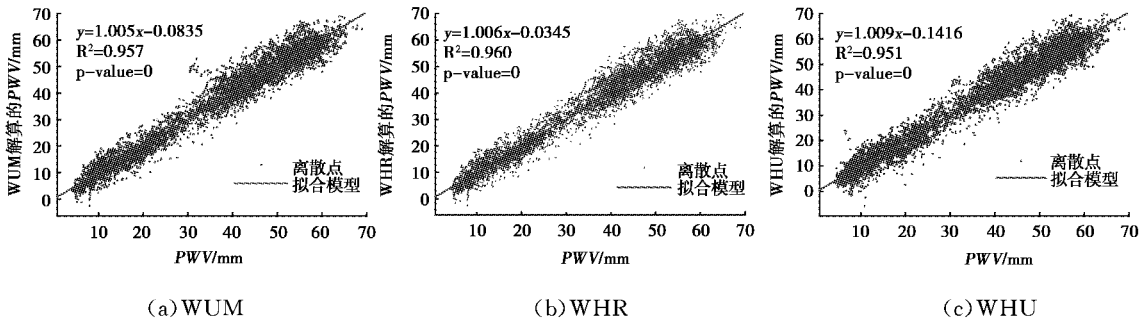


图 10 BDS/PWV 与 ERA-5/PWV 回归分析

2.2.4 BDS/PWV 与无线电探空数据对比分析

无线电探空法(RS)是目前公认较为可靠的 PWV 测量方法之一,通过探空气球携带无线电探空仪的方式采集气球上升路径各个高度的温度、气压、湿度等实测数据.无线电探空仪计算的 PWV 精度在 mm 级,逐 12 h 记录,可以作为独立验证 BDS 探测水汽精度的外部基准.通过美国怀俄明州立大学网站 (<http://weather.uwyo.edu/up-perair/sounding.html>) 下载相关测站的无线电探

空站数据.

以 HKWS 站为例,将 BDS/PWV 解算值与 RS/PWV 探测值进行比较,PWV 时间序列及所有测站的回归分析分别如图 11、图 12 所示.从中可以看出 HKWS 站的 BDS/PWV 解算值与 RS/PWV 一致性较高,变化趋势较为一致,无明显系统性偏差.WUM、WHR 和 WHU 星历产品解算的 PWV 与 RS/PWV 相比, R^2 均大于 0.91,整体拟合优度较高.P 值为 0,差异具有高度统计意义.



图 11 HKWS 站 BDS/PWV 与 RS/PWV 时间序列

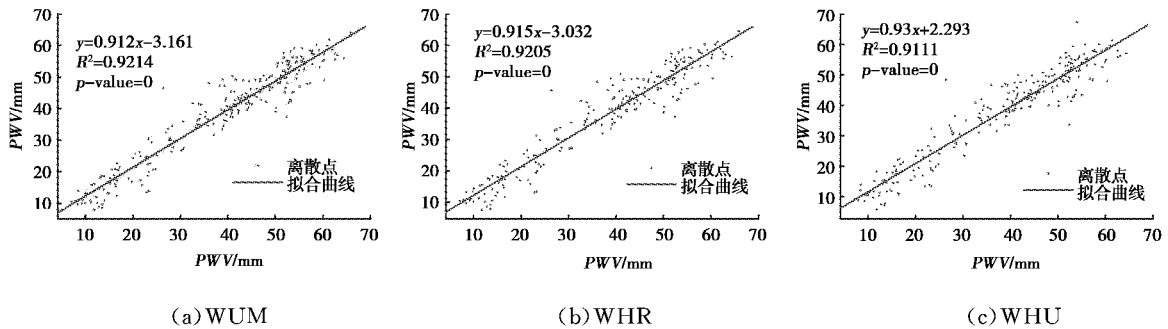


图 12 三种星历的 BDS/PWV 与 RS/PWV 拟合曲线

表 5 示出了 WUM、WHR 和 WHU 三种 BDS 星历解算的 PWV 与 RS/PWV 的差异统计情况.总体来说,BDS 解算的 PWV 与 RS/PWV 相比,偏差在 1 mm 左右,RMS 优于 5 mm,相关系数在 0.9 以上,两者表现为正相关且强相关,整体趋势

性较好.考虑到探空数据逐 12 h 记录一次,观测时间分辨率较低,样本总数量相对有限,少量偶然误差对整体精度产生较大的影响,通过 BDS/PWV 与 RS/PWV 的检核,可以认为 BDS 卫星水汽探测较好地反映了实际的 PWV 变化情况,与探空数据

实测值并无明显的系统性偏差,可靠性较强,满足地基 GNSS 反演 PWV 相对精度限值 5 mm 的要

求^[15],可以用于数值天气预报等应用要求。

表 5 BDS/PWV 与 RS/PWV 差值分析统计

星历	总计数	偏差/mm	S_{td} /mm	RMS/mm	Max/mm	Min/mm	相关系数
WUM	248	0.20	4.39	4.39	14.94	-19.99	0.960
WHR	245	0.20	4.41	5.32	15.13	-19.18	0.959
WHU	248	0.38	4.67	4.69	18.81	-21.90	0.954

3 结束语

本文利用武汉大学发布的 WUM、WHR 和 WHU BDS 星历产品,采用 MGEX 和单基站 CORS 提供的 BDS/GPS 多星座观测数据,借助 GAMIT 软件对 BDS 水汽探测能力的精度和可靠性进行分析,主要得出以下结论:

1)高精度的卫星轨道是保证水汽反演精度的关键,在 BDS 卫星可观测数目较多的区域,采取只使用轨道精度较高的 IGSO 和 MEO 卫星的解算策略,应用三种星历产品解算 ZTD 的 S_{td} 平均在 12 mm,较使用 GEO、IGSO 和 MEO 三种卫星的解算策略解算 ZTD 的精度提高 33.9%左右,一定程度上提高了 BDS 水汽探测精度,可以认为 BDS 的 ZTD 解算精度与 IGS 对流层延迟产品基本相当。

2)对比分析了 BDS、GPS 在大气水汽反演中的性能,与 GPS 相比,基于 BDS WUM、WHR 和 WHU 星历产品反演 PWV 的精度分别为 2.11 mm、2.14 mm 和 2.61 mm,与 GPS 解算的 PWV 的相关系数均高于 0.98,验证了 BDS 三种星历产品反演 PWV 的精度和可靠性,可以认为 BDS 卫星水汽探测的精度与 GPS 相当。

3)在 BDS 与 ERA-5、RS 的大气水汽结果的对比分析中,应用 BDS WUM、WHR 和 WHU 星历产品解算的 PWV 与 ERA-5/PWV 的 RMS 分别为 3.44 mm、3.47 mm 和 3.74 mm,与 RS/PWV 的 RMS 为 4.39 mm、5.32 mm 和 4.69 mm,相关系数均高于 0.9,无明显系统性偏差,验证了 BDS 反演 PWV 的外符合精度与可靠性,相对精度满足中小尺度数值天气预报和气象学研究等要求。

参考文献

[1] 周茂盛,郭金运,姜英明,等.基于区域 CORS 的可降水汽含量反演及其精度分析[J].全球定位系统,2016,41(4):6-11,21.

[2] 王洪栋.气象模型偏差对 GPS 定位结果的影响[D].北京:中国地震局地质研究所,2015.

[3] SAASTAMOINEN J J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. Bulletin of Geodesy, 1972,105(1):279-298. DOI: 10.1007/BF02521844.

[4] HOPFIELD H S. Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data[J]. Radio Science, 1971,6(3):357-367. DOI: 10.1029/RS006i003p00357.

[5] 张洛恺.地基 GNSS 反演大气水汽含量方法研究[D].郑州:解放军信息工程大学,2014.

[6] 范士杰,臧建飞,刘焱雄,等. GPT/2 模型用于 GPS 大气可降水汽反演的精度分析[J].测绘工程,2016,25(3):1-5.

[7] 石灵璠,黎峻宇,刘立龙,等. GPT2_1w 中国区域大气加权平均温度的精度检验与分析[C]//哈尔滨:第九届中国卫星导航学术年会,2018.

[8] DOW J M, NEILAN R E, RIZOS C. The international GNSS service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. Journal of Geodesy, 2008, 83(3):191-198. DOI: 10.1007/s00190-008-0300-3.

[9] 段晓梅,曹云昌,马尚昌.超快速星历的实测信息和预报信息反演大气可降水量的误差分析[J].成都信息工程大学学报,2017,32(6):577-583.

[10] 金慧华,白征东,过静琨,等.地基 GPS 反演水汽影响因素分析[J].测绘科学,2008,33(4):65-67.

[11] 耿涛,苏醒,许小龙,等.北斗卫星导航系统精密定轨和广播星历轨道精度分析[J].中国科技论文,2015,10(9):1023-1032.

[12] 张婧宇,孙保琪,孔焱,等.基于 MGEX 跟踪网的北斗卫星观测对流层天顶延迟计算与分析[J].时间频率学报,2016,39(1):45-53.

[13] ROCKEN C, WARE R, VAN HOVE T, et al. Sensing atmospheric water vapor with the global positioning system[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(23):2631-2634. DOI: 10.1029/93GL02935.

[14] 申建华.地基 GPS 水汽反演方法及影响因素研究[D].合肥:安徽理工大学,2018.

[15] 孟宪贵,郭俊建,韩永清. ERA5 再分析数据适用

性初步评估[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(1):91-99.

作者简介

吴旭祥 (1992—),男,硕士研究生,主要从事 GNSS 卫星导航定位、GNSS 气象学等方面的研究.

郭秋英 (1970—),女,博士,副教授,主要从事卫星精密定位数据处理、GNSS 在气象灾害监测中的应用等方面的研究.

侯建辉 (1995—),男,硕士研究生,主要从事 GNSS 卫星导航定位、GNSS 气象学等方面的研究.

Performance analysis of water vapor detection based on BeiDou precise ephemeris products

WU Xuxiang, GUO Qiuying, HOU Jianhui

(College of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: Reserch on the performance of BeiDou satellite navigation system in retrieving atmospheric precipitable water is conducive to promoting the application of BeiDou in numerical weather forecasting and meteorology research. Based on BeiDou final precise ephemeris (WUM) products, rapid ephemeris products (WHR) and ultra rapid ephemeris (WHU) products released by Wuhan University, Using GNSS multimode observation data provided by MGEX station and single CORS station, after verifying that the accuracy of tropospheric zenith delay calculated by the three BeiDou precise ephemeris products meets the requirements, the atmospheric precipitable water vapor calculated by the three BeiDou precise ephemeris products is compared with GPS water vapor detection results, ERA-5 reanalysis data and sounding station data respectively, and the BeiDou water vapor detection performance based on the three precise ephemeris products is analyzed. The experimental results show that the precision of atmospheric water vapor detection based on BeiDou final precise ephemeris products is higher than that of fast ephemeris products and ultra rapid ephemeris products, and the relative accuracy and reliability of atmospheric precipitation inversion of the three kinds of BeiDou ephemeris products are equivalent to that of GPS, which meets the requirements of small and medium scale numerical weather forecasting and meteorology research.

Keywords: BDS; precise ephemeris; precipitable water vapor; MGEX; ERA-5 reanalysis datasets