

引文格式: 邹进贵 程志新 张小溪. RTKLIB 支持下的基线相对定位研究[J]. 测绘通报, 2022(S2): 11-14. DOI: 10. 13474/j. cnki. 11-2246. 2022. 0546.

RTKLIB 支持下的基线相对定位研究

邹进贵 程志新 张小溪

(武汉大学测绘学院 湖北 武汉 430079)

摘要: 本文结合某大型调水工程,以基线相对定位为研究对象,对 GNSS 数据进行分析,并基于 RTKLIB 的后处理模块,通过试验不同的解算策略,得出最优解算策略。试验结果表明:①BDS 与 GPS 数据的质量都表现良好。数据完整率可达 80%,多路径误差最大为 0.6 m,信噪比均值在 40 dBHz 以上。②当基线长度小于 20 km 时,采用最佳解算策略可将定位精度稳定在毫米级。

关键词: 基线相对定位; RTKLIB; 最佳解算策略

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2022) S2-0011-04

Research on relative positioning of baselines based on RTKLIB

ZOU Jingui ,CHENG Zhixin ,ZHANG Xiaoxi

(School of Geodsy and Geomatics , Wuhan University , Wuhan 430079 , China)

Abstract: Combined with a large-scale water transfer project , this paper takes the baseline relative positioning as the research object , analyzes the GNSS data , and based on the post-processing module of RTKLIB , through testing different solution strategies , the optimal solution strategy is obtained. The experimental results show that: ① The quality of BDS and GPS data are both good. The data integrity rate can reach 80% , the maximum multipath error is 0.6 m , and the average signal-to-noise ratio is above 40 dBHz. ② When the baseline length is less than 20 km , the optimal solution strategy can stabilize the positioning accuracy at the millimeter level.

Key words: baseline relative positioning; RTKLIB; optimal solution strategy

随着我国经济的发展,出现了众多的特大型工程项目,例如港珠澳大桥、南水北调工程等。工程中基线长度更长,随着测站距离的增加,两测站处的电离层、对流层及轨道误差相关性逐渐减弱,误差影响随基线长度增加也愈发明显。通过对观测方程间的差分难以达到高精度,因此提高基线相对定位的精度是 GNSS 导航定位中一个重要的研究课题^[1-4]。

目前,GNSS 发展迅速,高精度定位应用越来越广泛。国际上广泛使用的相对定位软件有:美国麻省理工学院(MIT)和加州大学圣地亚哥分校 Scripps 海洋研究所(SIO)研制的 GAMIT/GLOBK、美国喷气推进实验室(JPL)研制的 GIPSY/OASIS 软件和瑞士 BERNE 大学研制的 Bernese 软件^[5-7]。但相比以上 3 种软件,由东京海洋大学的高须知二开发的开源软件 RTKLIB 有以下优点:①具有命令用户界面和图形用户界面,操作更加直观,过程清晰明了;②具有强大的图形输出能力,对处理数据进行图形化显示;③软件与代码完全开源,对代码可以进行修改与改进。

本文主要基于 RTKLIB 2.4.3,对 GNSS 基线的相对定位展开研究,通过数据分析各误差源、各解算模式等对定位精度的影响,总结一套定位精度最佳的解算策略。结合某大型调水工程,将实验结论运用于实际。

1 GNSS 相对定位原理

1.1 基本观测量

GNSS 观测方程可表示为

$$\tilde{\rho} = \rho - V_{\text{ion}} - V_{\text{trop}} + cV_{\text{ts}} - cV_{\text{tr}} + \delta\rho + \delta\rho_{\text{mul}} + \varepsilon \quad (1)$$

式中, $\tilde{\rho}$ 表示伪距观测值; ρ 表示卫星与接收机真正的几何距离; V_{ion} 表示电离层延迟改正; V_{trop} 表示对流层延迟改正; V_{ts} 表示卫星钟差; V_{tr} 表示接收机钟差; $\delta\rho$ 表示信号传播路径上的投影; $\delta\rho_{\text{mul}}$ 表示距离测量时受到的多路径误差影响; ε 表示测量噪声。

1.2 误差源

GNSS 定位中出现的误差按误差源分类有以下 3 类(如图 1 所示):与接收机和测站有关的误差、与

基金项目: 国家自然科学基金(41871373)

作者简介: 邹进贵(1972—),男,教授,主要研究方向为精密工程测量。E-mail: jgzou@sgg.whu.edu.cn

卫星有关的误差和与传播路径有关的误差^[8]。

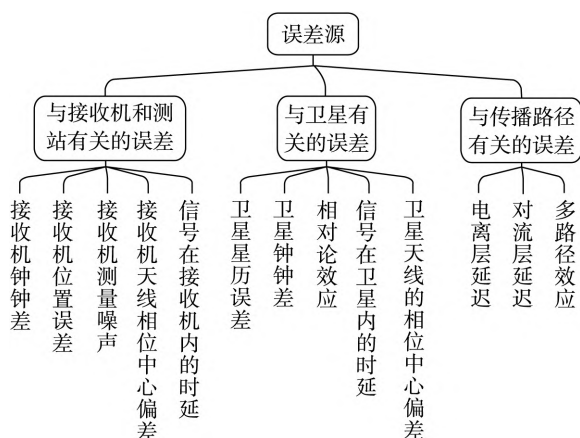


图1 误差按误差源分类

上述误差对测距的影响可达数十米,甚至可达数百米,因此必须设法加以消除。常见的消除或削弱这些误差造成的影响的主要方法有:建立误差改正模型、求差法、选择较好的硬件和较好的观测条件等。

2 数据质量分析

2.1 试验数据

实验数据采集于某长距离调水工程。结合研究

主题,选取基线最长的两个基站 JZ1 和 JZ2,对其 2022 年 4 月 1 日—2022 年 4 月 30 日共 30 天的数据进行分析,并对 BDS 与 GPS 单系统各项指标进行对比。

2.2 试验方法

实验中主要采用 TEQC 和 gfmrx 集成软件对原始数据进行处理,并通过 VisualStudio2017 平台编写代码,实现脚本文件的生成与批处理。

2.3 质量分析

在相对定位中,观测数据的质量直接影响到参数估计的收敛时间和定位精度。因此在进行相对定位之前,首先要对观测数据的质量进行分析,其主要内容包括:数据完整率、多路径误差和信噪比等。

2.3.1 数据完整率

数据完整率是指在一定截止高度角以上,实际观测量总数与理论观测量总数的比值。确保数据完整率占优是 GNSS 测量的基础。

由数据完整率统计(如图 2 所示)可知:①年积日比较,除个别年积日外,数据完整率都在 80% 以上,表示测站选取条件优良,满足实验与工程要求;②测站间对比,JZ1 与 JZ2 旗鼓相当,数据完整率基本吻合;③系统间比较,BDS 与 GPS 的数据完整率基本想同。

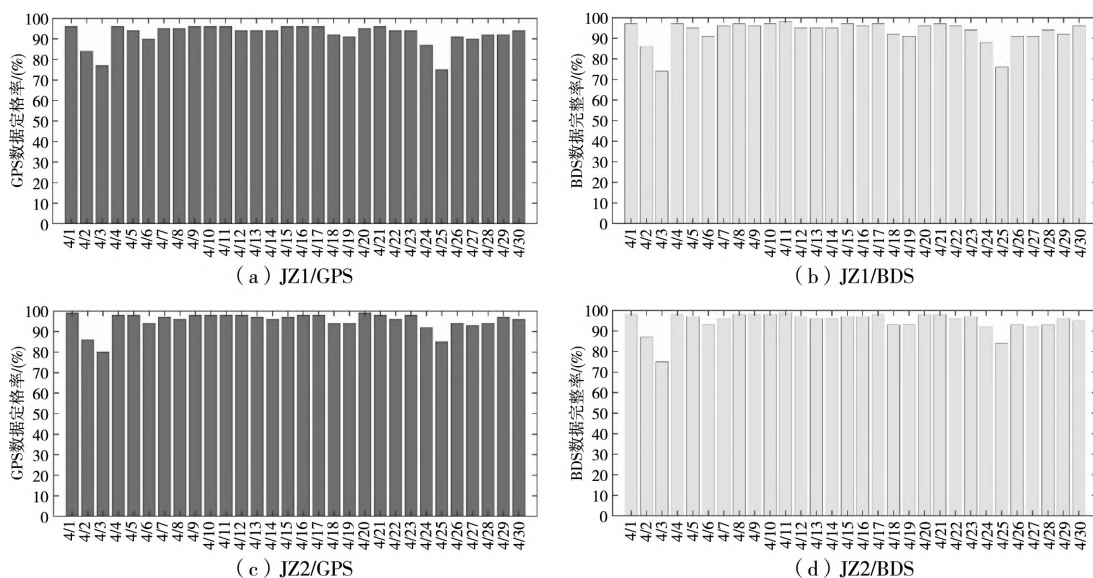


图2 数据完整率统计

2.3.2 多路径误差

在 GNSS 测量中,如果接收机天线接收到被测站附件的反射物所反射的卫星信号,反射信号就将和直接来自卫星的信号产生干涉,从而使观测值偏离真值,由此产生的误差称为多路径误差。

由多路径统计(如图 3 所示)可知:①年积日间

比较,除个别年积日个别频率有突起(doy95 L1 频率)整体起伏不大;②测站间比较,JZ1 受多路径影响较 JZ2 小,猜测测站 JZ1 观测环境较好;③频率间比较,GPS 的 L1 与 L5 的多路径误差明显要小于 L2 的多路径误差,BDS 的 B1 的多路径误差要明显大于 B2 与 B3 的多路径误差;④系统间比较,BDS 多

路径误差整体优于 GPS 猜测 BDS 系统在高度角较

高时,卫星数较多。

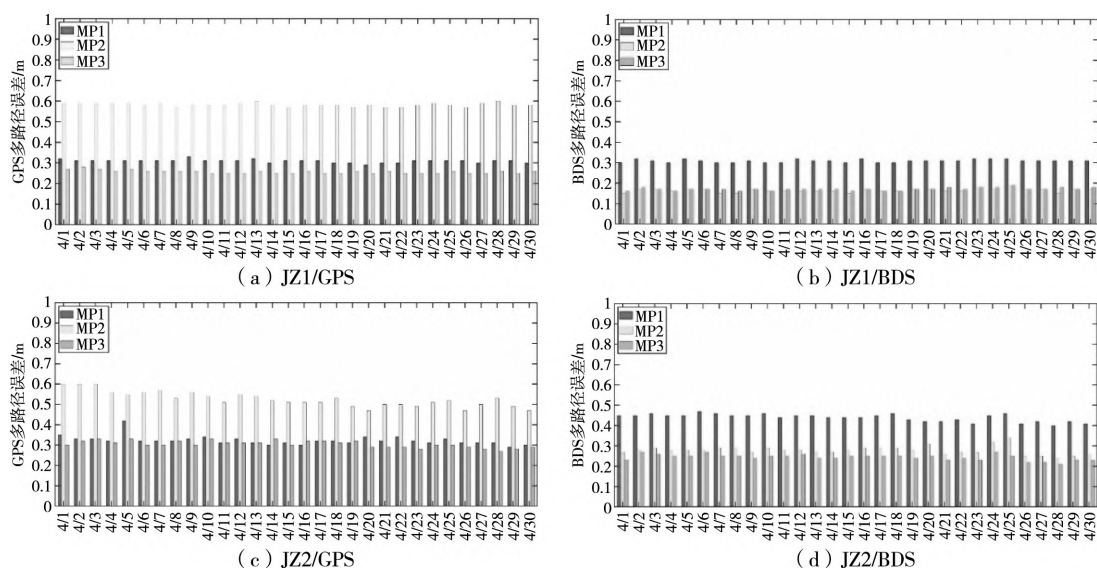


图3 多路径统计

2.3.3 信噪比

信噪比通常是通过测量噪声信号的幅度换算出来的。GNSS 接收机的输出信噪比通常是载波功率与噪声密度比的近似,即 C/N 。在无干扰的环境中,利用性能良好的接收机天线测量产生的信噪比一般能够达到 42 dBHz。但在实际观测环境中,接收到的信号是由直接信号与间接信号(如多路径、其他干扰信号等)组成的叠加信号。因此

信噪比是反映接收机伪距、载波观测值质量的重要指标。

由信噪比统计(如图4所示)可知:①年积日间比较,信噪比皆保持在 40 dBHz 以上;②测站间比较,JZ1 与 JZ2 的信噪比基本一致;③频率间比较,3 种频率的信噪比相差不大,L5(北斗为 B3)的信噪比略优于 L1 和 L2;④系统间比较,BDS 与 GPS 在该项指标上不相上下,皆满足实验与工程需求。

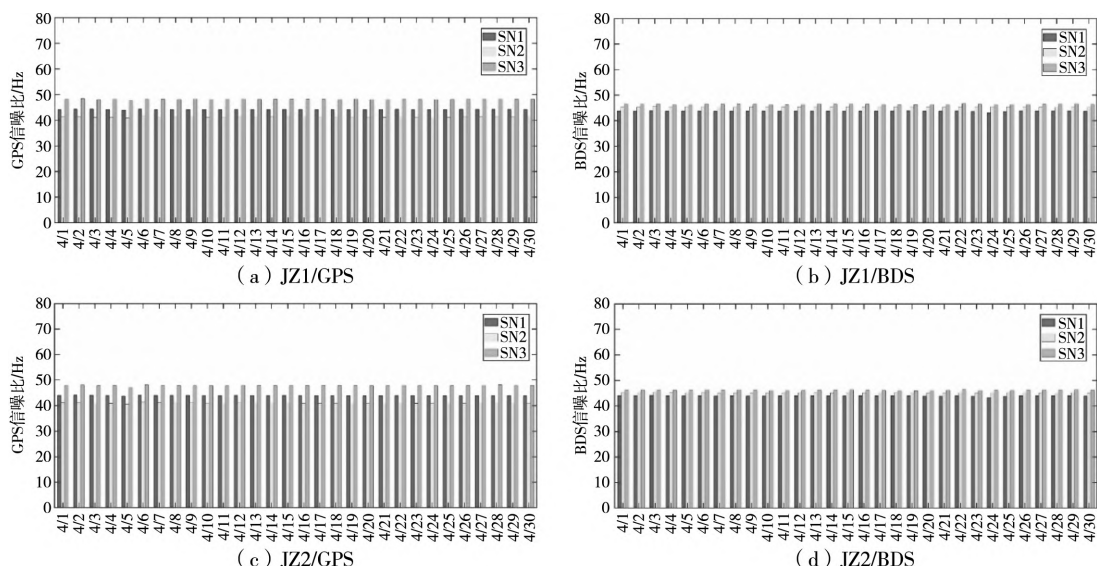


图4 信噪比统计

3 最佳解算策略探究试验

3.1 试验数据

试验数据采用该调水工程中 JZ1、JZ2 两个测

站年积日为 100 数据进行试验。

3.2 试验方法

使用的分析方法为控制变量法,以经验策略为基础,变换参数,将得出的试验结果与真值进行比

对,最终得到最适合该工程基线的解算策略。经验策略见表 1。

表 1 经验策略参数

参数	模型
Position Mode	Static
Frequencies	L1+L2
Filter Type	Forward
Elevation Mask	15
RecDynamics	OFF
Earth Tides Correction	OFF
Iono Correction	Broadcast
Tropo Correction	Saastamoinen
Satellite Ephemeris/Clock	Broadcast
Satellite System	GPS+BDS
Integer Ambiguity Res	Continuous

3.3 试验内容

在该试验中,以经验策略为基础,对同一组原始数据,依次改变同一参数类型的不同参数种类进行试验,再将度验结果与真值进行比对。不同测试组合与定位结果见表 2。

表 2 不同解算策略试验结果统计

参数类型	参数种类	模糊度 固定率/ (%)	AVE/mm		
			E	N	U
滤波类型	Forward	94.8	-9.8	-9.9	-3.1
	Backward	96.8	-15.0	-11.0	9.3
	Combined	97.3	-12.2	-10.0	4.8
精密星历与精密钟差	不采用	94.8	-9.8	-9.9	-3.1
	IGS	99.6	-11.5	6.3	-2.0
	CODE	97.7	-12.6	-9.1	1.8
	CNES	99.6	-11.4	-6.3	-2.0
	GFZ	95.8	-10.7	-9.4	3.5
高度截止角	WHU	95.8	-10.7	-9.5	3.5
	10°	99.6	-10.6	-5.7	-0.7
	15°	99.6	-11.5	-6.3	-2.0
电离层模型	20°	99.9	-12.3	-7.0	-2.1
	Broadcast	99.6	-10.6	-5.7	-0.7
	Ionosphere-Free-LC	21.1	-29.0	-104.9	35.7
对流层模型	Saastamoinen	99.6	-10.6	-5.7	-0.7
	Estimate	99.7	-15.7	-9.3	7.0
	ZTD+Grad	99.7	-15.7	-9.3	7.0
模糊度固定方法	Continuous	99.6	-10.6	-5.7	-0.7
导航系统	Fix and Hold	99.7	-8.8	-5.2	0.4
	Instantaneous	85.4	-19.6	-8.6	5.9
	BDS	99.8	-14.1	-12.8	11.8
	GPS	99.7	-8.8	-5.2	0.4

3.4 试验结论

试验结果表明:①基于 RTKLIB 的基线相对定位中,采用 IGS、CNED 分析中心精密钟差与精密星历产品能有效地提高定位的精度;②在测站观测条件良好,卫星数据质量较好时,适当地降低基线解算的截止高度角有利于提高基线解算的精度;③RTKLIB 的对流层模型、电离层模型改正较为简单,且相对定位模块缺乏其他模型做改正,该部分有待进一步研究。

4 总结与展望

4.1 总结

本文以基线相对定位为研究对象,结合某大型调水工程,对 GNSS 数据进行分析。基于 RTKLIB 的后处理模块,通过试验不同解算策略,得出适用于该大型调水工程的最优相对定位解算策略。具体结论总结如下。

(1) BDS 与 GPS 的数据质量不相上下。通过对某大型调水工程两个基站,一整个月的数据进行分析,得到以下几点结论:第一是 BDS 与 GPS 的数据完整率皆较高,一般都能达到 80% 以上,且 BDS 在基线长度小于 20 km 时,共视卫星数最多可达 18 颗,大量的 GNSS 原始数据,对于后续研究打下坚实基础。第二是 BDS 与 GPS 的数据多路径误差与信噪比指标较优,多路径误差最大为 0.6 m,信噪比均值在 40 dBHz 以上,也间接说明在该调水工程中,基站选址较优,接收数据条件较好。

(2) 不同的解算策略影响解算精度,不同的工程项目拥有特质的解算策略。利用同一组数据同一软件运用同一定位模式进行解算,因为解算策略的不同往往解算结果也会天差地别。每一个工程项目,因为其特有的地理环境与人为因素影响,都有不同的解算策略。在本文中,提供了一种查找最优解算策略的思路,可为类似工程项目提供参考。

4.2 展望

基线相对定位的研究远远不止于此。随着北斗组网成功,在当前国际形势下,时代要求我们朝着自主化与国产化方向发展,所以接下来的研究重点主要集中在以下几个方面:

(1) 基线相对定位的模糊度固定问题。在 RTKLIB 中,超过 50 km 的基线在进行相对定位时,模糊度往往难以固定,当滤波类型选择 Co 时,固定率有所优化,但是解算精度仍然不高,所以下一步的重点是研究 RTKLIB 处理中长基线的相对定位时,模糊度固定的方法。

(下转第 28 页)

以上结果证明 BDS-2+BDS-3 相比于 BDS-2 解算方案实时反演 ZTD 需要的收敛时间更短,精度更高。这是因为 BDS-3 的加入使得全球范围内的地面测站能够获得更多的北斗观测值,卫星的空间几何构型也更好,从而表现出了更好的性能。

4 结 论

本文利用全球分布的 IGS-MGEX 的观测数据,基于 GNSS PPP 模型进行对流层参数实时反演,详细介绍了北斗数据处理策略,并从收敛时间与精度两方面对反演参数结果进行了评估。试验结果表明,实时反演的 BDS ZTD 序列与后处理模式的 GREC ZTD 序列吻合情况较好。BDS-2、BDS-2+BDS-3 的平均收敛时间分别为 35 min22 s 和 25 min 4 s,平均 RMS 值分别为 22.04 和 10.82 mm,两种反演策略均不存在系统性偏差。

致谢:感谢 IGS-MGEX 提供的观测数据;感谢武汉大学 IGS 分析中心提供的精密星历和钟差产品。

参考文献:

- [1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using Global Positioning System [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D14): 15787-15801.
- [2] DOUSA J, VACLAVOVIC P. Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications [J]. Advances in Space Research, 2014, 53(9): 1347-1358.
- [3] THAYER G D. An improved equation for the radio refractive index of air [J]. Radio Science, 1974, 9(10): 803-807.
- [4] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global mapping function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L07304.
- [5] BOEHM J, WERI B, SCHUH H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from european centre for medium-range weather forecasts operational analysis data [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: B02406.
- [6] 张双成, 叶世榕, 刘经南, 等. 动态映射函数最新进展及其在 GNSS 遥感水汽中的应用研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(3): 280-283.
- [7] 曲建光, 魏旭东, 王泽民, 等. 在高海拔地区 saastamoinen 与 hopfield 模型推算水汽含量差异的研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(4): 397-399.
- [8] 葛茂荣, 刘经南. GPS 定位中对流层折射估计研究 [J]. 测绘学报, 1996, 125(4): 285-291.
- [9] XIAO W, LIU W, SUN G. Modernization milestone: BeiDou M2-S initial signal analysis [J]. GPS Solutions, 2016, 20(1): 125-133.
- [10] TAN B, YUAN Y, WEN M, et al. Initial results of the precise orbit determination for the New-Generation BeiDou Satellites (BeiDou-3) based on the iGMAS network [J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2016, 5(11): 196.

(责任编辑: 马保卫)

(上接第 14 页)

(2) RTKLIB 相对定位的电离层模型与对流层模型存在空缺。在 RTKLIB 中,有涉及无电离层组合模型,但该模型只适用于单点定位。经过试验,在利用无电离层组合模型改正相对定位时,确实存在问题。所以将无电离层组合模型优化,将其适用于相对定位,将会对 RTKLIB 相对定位的定位精度有较大提高。

参考文献:

- [1] 陈俊勇. GPS 技术进展及其现代化 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 1-4.
- [2] 高志钰, 郭进义, 刘杰. 北斗在地壳形变监测中的应用进展 [J]. 测绘通报, 2022(3): 32-35.
- [3] 赵祥伟. 中长基线下 GNSS 动态相对定位算法与实现 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [4] 高星伟, 刘经南, 葛茂荣. 网络 RTK 基准站间基线单历元模糊度搜索方法 [J]. 测绘学报, 2002, 31(4): 305-309.
- [5] 张彩红, 朱波, 张黎. 应用 Bernese 软件进行高精度 GPS 定位解算 [J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(3): 8-9.
- [6] 王国祥, 冯威, 陈豪, 等. GPS 长基线数据处理的软件实现 [J]. 测绘科学, 2012, 37(2): 194-196.
- [7] 李峰. GAMIT 与 Bernese 软件在高精度 GPS 数据处理中的应用分析 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2011.
- [8] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理 [M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.

(责任编辑: 金 君)