

北斗卫星导航系统单历元定向算法研究

唐卫明¹ 李 笛² 迟凤明³

(1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄市中山西路 589 号, 050081)

(3 中国石油天然气管道工程有限公司, 廊坊市和平路 146 号, 065000)

摘 要:首先对北斗定向中附有基线长度约束单频单历元模糊度确定方法和双频单历元模糊度确定方法进行了研究,并基于 LAMBDA 模糊度搜索方法,给出了相应的模糊度确定方案。然后利用多组实测数据,对北斗定向模糊度确定的成功率、定向精度进行了测试和分析,结果表明目前北斗在定向的性能和精度上略低于 GPS,但是处于一个数量级,已经可以满足多种应用的需求。

关键词:LAMBDA;北斗;单历元;整周模糊度;定向

中图分类号:P228.41

卫星导航定位系统具有全球覆盖、全天候、应用成本低等特点,在军民多个领域得到了广泛的应用。其中卫星导航定向技术,因其在轮船姿态测量、火炮定位定向以及精密机械控制等相关领域中的应用,成为卫星导航应用的一个重要研究方向。北斗卫星导航系统(以下简称北斗)是我国独立自主研制的新一代卫星导航定位系统,研究北斗定向算法,分析其定向精度、性能等指标,进而为研制北斗的定位定向设备提供技术支持,具有重要的应用价值。

在卫星定向中,一般具有基线长度等约束条件,因此,为了节约成本,通常采用单频接收机。在某些特殊的应用中,为了减少定向的初始化时间和增加可靠性等,而采用双频接收机。国内外许多学者对 GPS 单历元双频相位整周模糊度确定算法作过研究,并取得了可靠的成果^[1-9]。由于单频数据观测量少,特别是单历元确定模糊度比较困难,因而人们常常利用某种约束条件或其他外部的观测量来辅助确定整周模糊度^[10-13]。

虽然 GPS 定向算法比较成熟,而北斗定向算法与其基本一致,但北斗卫星导航系统实现了亚太地区覆盖,对北斗定向的算法进行研究同样具有非常重要的意义。因此,本文基于北斗卫星导

航系统定向中的附有基线长度限制的单频单历元模糊度确定方法和双频单历元模糊度确定方法进行研究,并采用 LAMBDA (the least-squares AMBiguity decorrelation adjustment) 搜索方法进行模糊度搜索和确定^[14-17],对北斗单双频单历元模糊度确定成功率和定向精度等指标进行了分析。

1 算法说明

定向解算的基本过程包括原始观测数据实时获取,单点定位解算获取初始位置,观测方程的线性化和组成双差观测值、模糊度固定、基线解算、方位角的计算等模块。模糊度确定是最为关键部分,本文只给出了北斗定向中模糊度确定方法。

1.1 附有基线长度约束单频单历元模糊度解算方法

1.1.1 附有约束条件的模糊度浮点解求解^[10]

联合基线长度观测方程和载波相位、伪距观测值的双差观测方程得到的联合方程:

$$\begin{bmatrix} l_{B_1} \\ l_{C_1} \\ l_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{I} \cdot \lambda_1 \\ \mathbf{B} & 0 \\ \mathbf{B}_S & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{B_1} \\ \mathbf{v}_{C_1} \\ \mathbf{v}_S \end{bmatrix}, \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{B_1} \\ \mathbf{P}_{C_1} \\ \mathbf{P}_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2013-04-12。

项目来源:长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2012312/KY);国家自然科学基金资助项目(41004014);国家 863 计划资助项目(2012AA12A202)。

式中, B 为北斗观测值的系数矩阵; B_s 为基线长度的系数阵; λ_1 为载波 B_1 的波长; b 为模糊度向量; a 为基线向量, I 为单位阵; v_{B_1} 、 v_{C_1} 、 v_s 分别为观测值 B_1 、 C_1 、基线长度的改正数; l_{B_1} 、 l_{CA} 为 B_1 、 C_1 观测值与几何距离之差; l_s 为基线长度与基线长度初值之差; P_{B_1} 、 P_{C_1} 、 P_B 为观测值 B_1 、 C_1 、基线长度的权矩阵。

由分块求逆和矩阵反演知识可知,在加上基线长度条件后,对模糊度浮点解有了明显改善,这说明在基线长度条件融合在北斗观测信息中时,增加了北斗的观测信息量,在很大程度上提高了模糊度浮点解的精度,降低了其相关性^[10]。利用式(1)可以求解出模糊度的浮点解和协方差矩阵,然后利用 LAMBDA 方法进行模糊度确定。

1.1.2 单频模糊度搜索方法

由于初始基线向量的精度不高,基线长度条件在列方程的时候有一定的误差损失,导致浮点解精度不高,搜索满足式(1)的模糊度组合并不一定满足基线长度条件。为了解决这一问题,本文采用以下两步搜索算法^[10]。

1) 用 LAMBDA 搜索方法搜索出多组模糊度组合。搜索的方法与 LAMBDA 搜索方法一致,只是此处搜索出不是唯一的一组模糊度,而是依次按 LABMDA 方法的搜索原则最优的多组模糊度组合组成的模糊度空间,模糊度组合的数量与浮点解精度成反比,一般取 5~100 不等。

2) 在多组模糊度组合组成的模糊度空间中,利用已知基线长 S 作为限制条件,用最小二乘的方法解求出各组模糊度的基线,求出解的基线长备选值 S^0 。利用已知基线长搜索最佳整周模糊度有两种方案:① 把已知的基线长作为必要条件;② 已知的基线长作为最佳条件。必要条件是计算基线长和已知基线长差值在一定范围内的所有整周模糊度备选值中,搜索最小的 $V^T P V$ 。

$$\begin{cases} |S - S^0| < \delta_s \\ V^T P V = \min \end{cases} \quad (2)$$

式中, S 为已知的基线长; S^0 为计算基线长; δ_s 为一个常量,大小根据载波相位的精度和基线长度来定,一般对于短基线,如果模糊度正确,利用载波相位观测值计算的基线是 mm 级的,计算基线长度与实际基线长度之差不会超过 1 cm,因此, δ_s 常取 1 cm。

1.2 双频单历元模糊度解算方法

双频单历元模糊度确定方法分为以下两步来实现:① 单历元宽巷模糊度确定;② 利用宽巷观测值,确定 B_1 、 B_2 模糊度。 P 码伪距和宽巷观测

值组成的联合方程可以得出宽巷观测值的模糊度浮点解及其协因数阵,然后就可以用 LAMBDA 方法进行模糊度确定。利用固定模糊度后的宽巷观测值求解 B_1 、 B_2 观测值的模糊度。宽巷观测值的模糊度与 B_1 、 B_2 观测值的模糊度关系为:

$$N_1 = N_{WL} + N_2 \quad (3)$$

宽巷伪距和 B_1 、 B_2 观测值组成联合方程消除 B_2 观测值的模糊度,剩下 B_1 观测值的模糊度参数和三维坐标参数。用类似于确定宽巷模糊度的方法,确定 B_1 的模糊度,然后由式(3)计算 B_2 的模糊度。

2 算法性能测试

为了测试北斗定向算法的可靠性和成功率,本文选取了以下算例进行测试分析,算例信息如表 1 所示,所有接收机均为和芯星通生产的 UB240 北斗/GPS 双模双频接收机,采样间隔为 1 s。

表 1 算例数据信息

Tab. 1 Information of Test Data

基线	地点	基线长度/m	时间	状态	历元数
基线 1	北河	0.8	2011	静态	3 410
基线 2	仙桃	0.8	2011	静态	9 849
基线 3	武汉	3.5	2012	静态	10 076
基线 4	武汉	9.6	2012	静态	7 200
基线 5	潜江	0.8	2011	动态	1 235
基线 6	北河	0.8	2011	动态	959

2.1 单频单历元模糊度解算结果

在无约束和基线长度约束的情况下,仅利用算例中的单频数据进行单历元模糊度确定,为了比较北斗与 GPS 单频模糊度解算,同时对北斗和 GPS 进行数据处理。把 Bernese 5.0 解算的 GPS 基线数据结果作为参考值,将北斗和 GPS 得到的模糊度确定结果分别与其进行比较,判断是否正确。其成功率对比如表 2 所示。

表 2 单频单历元模糊度确定结果

Tab. 2 Results of Single Frequency Single Epoch Ambiguity Resolution

类型	基线	北斗/%		GPS/%	
		固定率	正确率	固定率	正确率
无约束	基线 1	3.70	6.35	8.83	60.47
	基线 2	6.07	0.00	6.41	69.10
	基线 3	5.88	30.91	74.07	99.84
	基线 4	35.68	95.72	62.39	99.24
基线长度约束	基线 1	6.60	100.00	14.08	94.79
	基线 2	7.23	91.85	10.34	94.01
	基线 3	32.68	97.30	92.60	99.98
	基线 4	72.38	99.90	86.38	100.00

从表2可以看出,无约束条件下,北斗不同算例之间单频单历元模糊度确定的成功率从4%~36%不等,反映在无约束条件下仅仅使用单频单历元的伪距和载波相位观测值来确定模糊度的成功率非常低。在基线长度约束的条件下,北斗单频单历元模糊度的固定率及正确率比无约束条件下提高了1倍。另外,4组基线的北斗模糊度固定率以及成功率都略低于GPS。

2.2 双频单历元模糊度解算结果

在无约束和基线长度约束的情况下,进行单历元双频模糊度确定,并与GPS双频模糊度确定结果比较。把Bernese 5.0解算的GPS基线数据结果作为参考值,北斗和GPS模糊度确定结果如表3所示。

表3 双频单历元模糊度确定结果

Tab. 3 Results of Dual Frequency Single Epoch Ambiguity Resolution

类型	基线	北斗/%		GPS/%	
		固定率	正确率	固定率	正确率
无约束	基线1	100.00	100.00	100.00	100.00
	基线2	100.00	100.00	100.00	100.00
	基线3	100.00	99.98	100.00	100.00
	基线4	100.00	99.99	100.00	100.00
	基线5	99.84	100.00	99.84	99.92
	基线6	99.90	100.00	100.00	97.60
基线长度约束	基线1	100.00	100.00	100.00	100.00
	基线2	100.00	100.00	100.00	100.00
	基线3	100.00	99.98	100.00	100.00
	基线4	100.00	99.99	100.00	100.00
	基线5	99.84	100.00	100.00	100.00
	基线6	99.90	100.00	100.00	100.00

从表3可以看出,在无约束和基线长度约束的条件下,北斗不同算例之间双频单历元模糊度固定率都优于99.80%,而且数据的正确率优于99.98%。因此,利用双频载波单历元确定模糊度相当可靠。另外,6组基线北斗模糊度的固定率和正确率跟GPS基本一致。

2.3 单历元定向精度结果

在模糊度正确确定的基础上,对基线1~基线4的定向精度进行了统计,其结果如表4和表5所示。

从表4和表5中可以看出,定向精度与基线长度有明显相关性,基线越长定向精度越高,另外4组基线中GPS定向精度都略高于北斗。通过对卫星数和卫星几何分布进行比较发现,北斗卫星数和几何分布都不如GPS。

表4 单历元定向结果精度分布图

Tab. 4 Distribution of Precision of Single Epoch Orientation

类型	基线		比例/%			
			<0.01	0.01~0.1	0.1~1	>1
偏航角	基线1	北斗	0.53	3.11	96.16	0.21
		GPS	3.17	26.36	70.47	0.00
	基线2	北斗	0.51	5.33	83.06	11.10
		GPS	2.62	23.91	73.23	0.24
	基线3	北斗	9.09	65.84	25.06	0.01
		GPS	21.08	77.87	1.05	0.00
	基线4	北斗	47.79	52.19	0.00	0.01
		GPS	71.7	28.31	0.00	0.00

表5 单历元定向结果精度统计

Tab. 5 Statistics of Precision of Single Epoch Orientation

基线	基线长度/m	方位角精度 RMS/(°)	
		北斗	GPS
基线1	0.8	0.192	0.160
基线2	0.8	0.223	0.168
基线3	3.5	0.042	0.036
基线4	9.5	0.014	0.009

3 结 语

通过对北斗定向中单双频单历元模糊度确定方法的研究和多个算例测试,以及北斗与GPS定向中模糊度确定成功率及定向精度的比较分析,可以得到以下几个结论。

1) 单历元单频模糊度固定的成功率很低,难以满足实时动态应用需求,在实际应用中需要采用多个历元解算或者是增加其他的约束条件如基线长度和俯仰角等。

2) 单历元双频模糊度确定的可靠性高于99.8%,在成功率和可靠性上完全可以满足北斗动态定位定向的需要。

3) 北斗定向精度目前虽略低于GPS,但是处于同一数量级,已可以满足多种应用的需求。随着北斗卫星导航系统的发展,卫星数目会越来越多,其精度必然会取得长足的进步,甚至会赶超GPS。

参 考 文 献

- [1] Collier P A. Kinematics GPS for Deformation on Monitoring[J]. Geomatic, 1997, 51(2):157-168
- [2] Corbetts J C. GPS Single Epoch Ambiguity Resolution[J]. Survey Review, 1995, 257(33): 149-160
- [3] Joosten P, Tiberius C. LAMBDA: FAQs[J]. GPS Solutions, 2002(6): 109-114

- [4] Han S, Rizos C. Single-epoch Ambiguity Resolution for Real-time GPS Attitude Determination with the Aid of One-dimensional Optical Fiber Gyro[J]. GPS Solutions, 2003, 3(1):5-12
- [5] Zhou Yangmei. A New Approach to the Integer Transformation of GPS High-dimensional Ambiguity Vectors[C]. 2002 International Symposium on GPS/GNSS, Wuhan, 2002
- [6] 陈小明. 高精度 GPS 动态定位的理论与实践[D]. 武汉:武汉测绘科技大学, 1997
- [7] 李征航, 刘万科, 楼益栋, 等. 基于双频 GPS 数据的单历元定向算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(9):753-756
- [8] 孟领坡, 吴杰. 双频去相关单历元动态解算整周模糊度研究[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1):34-39
- [9] 唐卫明, 李笛, 孙红星. GPS 不定基线长动态定位定向算法研究[C]. 云南省测绘学会会议, 昆明, 2011
- [10] 唐卫明, 孙红星, 刘经南. 附有基线长度约束的单频数据单历元 LAMBDA 方法整周模糊度确定[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(5):444-446
- [11] 崔建勇, 杨力, 任锴, 等. 基于 GPS 的短基线定向测量及精度分析[J]. 测绘信息与工程, 2008, 33(2):12-14
- [12] 刘根友, 欧吉坤. GPS 单历元定向和测姿算法及其精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(6):732-735
- [13] Liu Genyou, Zhu Yaozhong, Zhu Cailian. Damped LAMBDA Algorithm for Single Epoch GPS Positioning[C]. 2002 International Symposium on GPS/GNSS, Wuhan, 2002
- [14] Teunissen P J G. Least-squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities[C]. 1993 IAG General Meeting, Beijing, 1993
- [15] Teunissen P J G. A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation[C]. Proceedings IEEE Position, Location and Navigation Symposium PLANS'94, Las Vegas, NV, 1994
- [16] Teunissen P J G. The Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. Journal of Geodesy, 1995, 70(1/2):65-82
- [17] Teunissen P J G, de Jonge P J, Tiberius C C J M. The LAMBDA Method for Fast GPS Surveying [C]. International Symposium GPS Technology Applications, Bucharest, Romania, 1995

第一作者简介:唐卫明,副教授,博士,现主要从事 GNSS 的实时动态定位应用开发和系统集成等教学科研工作。

E-mail:wmtang@whu.edu.cn

Research on Single Epoch Orientation Algorithm of BeiDou Navigation Satellite System

TANG Weiming¹ LI Di² CHI Fengming³

(1 GNSS Research Center, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 The Fifty-Fourth Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, 589 Zhongshan West Road, Shijiazhuang 050081, China)

(3 China National Petroleum Corporation, 146 Heping Road, Langfang 065000, China)

Abstract: This paper first proposes a method for the BeiDou orientation using single epoch single frequency ambiguity resolution with fixed baseline length and single epoch dual frequency ambiguity resolution based on LAMBDA algorithm. According to the results of multiple tests on BeiDou and GPS short baseline data, the BeiDou's ambiguity resolution success rate and the precision of orientation are found to be in common with the GPS's.

Key words: LAMBDA; BeiDou; single epoch; integer ambiguity; orientation

About the first author: TANG Weiming, associate professor, Ph.D. His research fields include application development and system integration of GNSS real-time kinematic positioning. He has obtained some research achievements in GNSS Network RTK, Precise Point Positioning, and kinematic positioning algorithm research and software development.

E-mail: wmtang@whu.edu.cn