

文章编号 1004-924X(2010)11-2461-06

# 应用延长基线法实现北斗双星的快速定向

张晓安, 逯亮清, 杨 彪

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为验证北斗双星定向中所提出的通过延长基线确定模糊度的方法, 利用双天线北斗载波相位接收机系统构建了实验平台, 设计了延长基线北斗定向物理实验方案, 通过事先在实验场地确定同一方向不同基线长度的若干天线放置位置实现了该方案。实验结果表明, 用延长基线法确定北斗定向载波相位单差模糊度是可行的, 在延长基线期间无周跳发生时成功率可达 100%。此外, 辅助验证了影响北斗定向精度的若干确定性影响因素, 包括基线长度、定向时长以及基线指向等, 提出为提高定向精度, 应适当增加基线长度, 延长定向时间, 并尽可能令基线指向接近南北方向。该项研究将进一步促进北斗定向技术的实际工程应用。

**关键词:** 北斗一号系统; 卫星定向; 载波相位; 模糊度; 延长基线

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2461

## Fast orientation of Beidou bi-satellite by extending baseline

ZHANG Xiao-an, LU Liang-qing, YANG Biao

(*College of Mechatronics and Automation, National University of  
Defense Technology, Changsha 410073, China*)

**Abstract:** To verify the feasibility of an ambiguity resolution method for Beidou bi-satellite orientation by extending baseline, an experimental platform was established by using a Beidou carrier phase receiver with two-antennas. A physical experiment scheme was proposed for the extending baseline, which was realized by determining different positions of several antennae with different baseline lengths in the same direction in advance. The results show that it is feasible to determine the ambiguity of a Beidou single difference carrier phase by extending baseline, and the success rate can reach 100% without cycle slips during extending baseline. Moreover, some deterministic factors such as baseline length, orientation duration, and baseline direction on Beidou orientation were verified by the way. It suggests that the baseline length and orientation duration should be prolonged, and the baseline direction should be as near south-north as possible in order to improve the orientation precision. The research work will greatly improve the practical engineering application of Beidou orientation technology.

**Key words:** Beidou No. 1 system; satellite orientation; carrier phase; ambiguity; extending baseline

收稿日期: 2010-08-18; 修订日期: 2010-09-06.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA12Z319)

## 1 引言

2000 年 10 月 31 日、12 月 21 日、2003 年 5 月 25 日北斗一号 01、02 及备份星在西昌卫星发射中心相继发射升空,标志着我国成功建立了自主的卫星导航系统。作为一种全天候、区域性的有源定位系统,北斗双星系统可为用户提供定位、简短数字报文通信和授时服务。此外,利用双星载波相位差分测量技术可实现定向功能,以便用于各种需要精确方位方向信息的场合,如车辆、船舶的航向测量,辅助惯导系统快速方位对准,以及火炮姿态测量等,完善和拓宽了北斗系统的应用领域,具有较高的工程应用价值。

基于北斗双星系统的方向测量是北斗系统的重要应用,与 GPS 定向一样,核心问题都是整周模糊度的求解。但北斗双星系统与 GPS 等全球卫星导航系统在工作原理上有很大区别:一是双星定向必须已知基线长度,这使得双星定向技术难以采用自由基线模式,而应采用固定基线模式;二是信息无任何冗余,这一点令无任何辅助设备的双星单基线定向瞬时解模糊的可能性几乎为零;三是有限时间内双星系统的观测几何几乎无变化,这些区别使得适用于全球导航系统的经典静态相对定位法不适于双星定向。为此不少学者提出了若干方案,如基于特殊操作的旋转基线法<sup>[2]</sup>、基于辅助的模糊度函数搜索法<sup>[3-5]</sup>、基于天线特殊布局的长短基线法<sup>[6]</sup>等,并取得了一定研究成果。

上述方法均存在某些不足之处,如旋转基线法要求基线与旋转轴正交,而基线旋转需精确定位;模糊度函数搜索法只利用了相位小数部分,没有充分利用相邻历元间相位观测整数部分的变化信息,搜索效率低;长短基线法中基线不易同向等;另外,天线及接收模块数量的增加也提高了系统成本。2006 年康国华等<sup>[1]</sup>提出了延长基线解模糊度的方法,该方法将原来通过基线角度变化改为利用基线长度变化求解整周模糊度,避免安装旋转机构复杂装置或其它辅助设备。本文基于双天线北斗载波相位接收机系统构建实验平台,利用自主开发的定向软件进行实际实验,充分验

证了延长基线法解模糊度的可行性,并进一步验证了该方法可达到的实际定向精度。

## 2 北斗双星定向数学模型

北斗定向基本原理与 GPS 相似,都是利用卫星载波相位干涉测量原理来确定基线矢量在相应坐标系下的表示。如图 1 所示,地面 1,2 两天线同时观测卫星信号,相对于同一卫星的载波相位差反映了两天线与该卫星之间的距离差信息。同时测量两天线相对两颗卫星的距离差,并事先测得两天线中心间距,即可求出 1,2 两点间精确的相对位置,即基线矢量,进而求得 1~2 方向的方位角与俯仰角,这就是双星定向的基本原理。

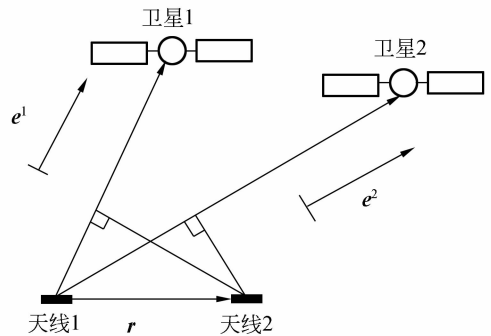


图 1 北斗双星定向示意图

Fig. 1 Diagram of Beidou bi-satellite orientation

北斗双星定向解算方程由两个载波相位单差方程与基线长度约束组成,具体如下:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12}^1 &= \frac{1}{\lambda} e^1 \cdot r + \Delta N_{12}^1 + \epsilon_{12}^1 \\ \Delta\phi_{12}^2 &= \frac{1}{\lambda} e^2 \cdot r + \Delta N_{12}^2 + \epsilon_{12}^2 \\ L &= \|r\| + \epsilon_l \end{aligned} \quad (1)$$

其中上标 1,2 表示卫星号,下标 1,2 表示天线号; $\Delta\phi$  为载波相位单差观测值; $L$  为基线长度测量值; $\lambda$  为载波波长; $e^j$  为 1 号天线至  $j$  号卫星方向单位矢量,由已知卫星位置和双星定位得出的 1 号天线位置计算; $r$  为基线矢量; $\Delta N$  为初始单差整周模糊度; $\epsilon$  为相应测量误差,包括载波相位单差测量误差和基线长度测量误差。

当模糊度参数  $\Delta N$  通过其他途径确定后,由式(1)可以得到基线矢量解在当地北天东坐标系中的表示  $r = [x \ y \ z]^T$ ,并进一步得到基线的

姿态角:

$$\psi = \arctan \frac{z}{x}, \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (3)$$

其中  $\psi$  为方位角,  $\theta$  为俯仰角。

一般情况下会有双解甚至复数解存在,此时可以根据基线的先验信息,比如概略水平或通过其它传感器测得的基线仰角等剔除错误解,最终得到基线的二维姿态。

### 3 延长基线模糊度确定方法

无论是旋转基线还是多基线,目的都是使基线——卫星相对几何发生变化进而改善观测矩阵来求得整周模糊度。本文所验证延长基线确定模糊度的方法,针对北斗卫星对地静止特性,将基线角度变化改成基线长度变化,以不同时间测量实现传统长短基线法同一时刻的等效测量,来求解整周模糊度。而且由于基线长度变化期间初始模糊度参数保持不变,彻底消除了传统长短基线法要求短基线长度小于卫星载波信号半波长的苛刻要求。

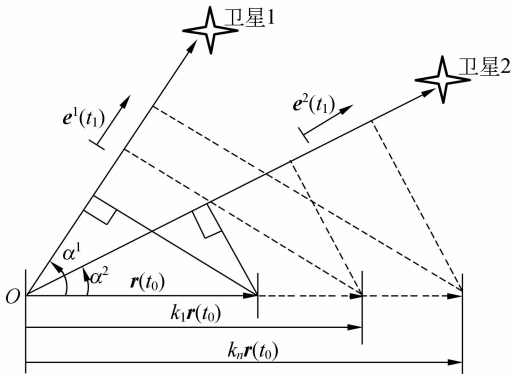


图 2 延长基线法确定整周模糊度示意图

Fig. 1 Determination of ambiguity resolution by extending baseline

如图 2 所示,设初始  $t_0$  时刻基线矢量为  $r(t_0)$ ,测得一组载波相位观测值;然后保持基线方向不变,延长基线长度为原来的  $k_1$  倍,得到新的基线矢量  $k_1 r(t_0)$ ,在  $t_1$  时刻测得第二组观测值;同样地,再延长基线为  $k_2 r(t_0)$ ,在  $t_2$  时刻测得第三组观测值...;这样通过延长基线,在  $t_n$  时刻可得  $n$  组观测值 ( $n \in \mathbf{N}$ ),相应的基线序列为  $r$

$(t_0), k_1 r(t_0), k_2 r(t_0) \cdots k_n r(t_0)$ ,其中  $k_j > 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。图 2 中  $\alpha^i$  为基线与单位矢量  $e^i(t_0)$  的夹角。假定在整个观测期间载波相位无周跳现象,可得如下单差观测方程:

$$\begin{cases} \Delta\phi_{12}^1(t_0) = \frac{1}{\lambda} e^1(t_0) \cdot r + \Delta N_{12}^1 + \epsilon_{12}^1(t_0) \\ \Delta\phi_{12}^2(t_0) = \frac{1}{\lambda} e^2(t_0) \cdot r + \Delta N_{12}^2 + \epsilon_{12}^2(t_0) \\ \Delta\phi_{12}^1(t_1) = \frac{1}{\lambda} e^1(t_1) \cdot k_1 r + \Delta N_{12}^1 + \epsilon_{12}^1(t_1) \\ \Delta\phi_{12}^2(t_1) = \frac{1}{\lambda} e^2(t_1) \cdot k_1 r + \Delta N_{12}^2 + \epsilon_{12}^2(t_1) \\ \vdots \\ \Delta\phi_{12}^1(t_n) = \frac{1}{\lambda} e^1(t_n) \cdot k_n r + \Delta N_{12}^1 + \epsilon_{12}^1(t_n) \\ \Delta\phi_{12}^2(t_n) = \frac{1}{\lambda} e^2(t_n) \cdot k_n r + \Delta N_{12}^2 + \epsilon_{12}^2(t_n) \end{cases} \quad (4)$$

由图 2 可知,在基线延长过程中天线 1 相对卫星 1, 2 视线方向的单位矢量是保持不变的,即

$$\begin{cases} e^1(t_0) = e^1(t_1) = \dots = e^1(t_n) \\ e^2(t_0) = e^2(t_1) = \dots = e^2(t_n) \end{cases} \quad (5)$$

忽略测量噪声影响,将式(5)代入式(4),可解得  $n$  组初始整周模糊度结果,如式(6)所示

$$\begin{cases} \Delta N_{12}^1 = \text{int} \left[ \frac{k_1 \Delta\phi_{12}^1(t_0) - \Delta\phi_{12}^1(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ \Delta N_{12}^2 = \text{int} \left[ \frac{k_1 \Delta\phi_{12}^2(t_0) - \Delta\phi_{12}^2(t_1)}{k_1 - 1} \right] \\ \vdots \\ \Delta N_{12}^1 = \text{int} \left[ \frac{k_n \Delta\phi_{12}^1(t_0) - \Delta\phi_{12}^1(t_n)}{k_n - 1} \right] \\ \Delta N_{12}^2 = \text{int} \left[ \frac{k_n \Delta\phi_{12}^2(t_0) - \Delta\phi_{12}^2(t_n)}{k_n - 1} \right] \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\text{int}[\ ]$  为四舍五入的取整函数。

从式(6)可以看出,理想情况下只要延长一次基线就可以求得初始整周模糊度。但为了检测延长过程中是否出现周跳,可以适当增加延长次数,获得多个模糊度候选值,验证求解的正确性。在获得  $\Delta N_{12}^1, \Delta N_{12}^2$  后,代入式(1)并忽略测量噪声,就可以求得基线矢量初始值  $r(t_0)$ ,再根据式(2), (3)即可得出方位角和俯仰角。

### 4 实验环境构建

本文所构建的北斗定向系统如图 3 所示,主要包括一台并行 4 通道载波相位接收机、2 个圆

形测量天线及 2 根 15 m 馈线、外接直流电源等附件。其中接收机主机通过 RS232 串口与上位机通讯,输出的主要观测数据包括每分钟更新一次的卫星三维位置与速度信息(BJ-54 坐标)、北斗时间以及 4 个通道的 10 Hz 载波相位观测信息。数据采集程序以及定向软件均在上位机中运行,先采集数据然后离线进行模糊度确定及定向解算。

2010 年 4 月 9 日进行了北斗静态定向实验,实验地点位于长沙某办公楼顶层,测试地点平坦,视野较开阔,楼顶表面较粗糙,多径效应不明显。根据延长基线法确定初始单差模糊度,具体操作步骤如下:

(1) 首先将 1 号天线固定,在同一方向上用米尺标定距离 1 号天线 0.5, 1.5, 6 m 的 3 个点。

(2) 从基线长度 0.5 m 处开始观测载波相位信号,测量一段时间。

(3) 然后手动将 2 号天线移动到 1.5 m 处,继续测量。

(4) 再次移动 2 号天线,延长基线使其长度达到 6 m,采集一段时间获得观测数据,然后退出数据采集程序。

经事先测量,已知 1 号天线的坐标大致为(28.2202°N, 112.9916°E, 80 m)。由于实验位置的西星载波信噪比偏低,实验过程中选取东星和中星作为观测卫星。第一次实验在同一个方向共进行了 3 组测试,每组测量 15 min。5 月 31 日,在基线位置靠近南北指向的情况下,进行了两组补充实验,每组测量 8 min。

## 5 实验结果及分析

第一次实验在同一个方向共进行了三组测试,通过事后处理,第一、三两组模糊度求解成功,但第二组求解失败。

由原始测量数据处理实现模糊度解算及定向结果计算的具体步骤为:

(1) 确定同一组测试数据不同基线长度的时间分割点;

(2) 对同一基线长度的载波相位单差数据进行平均,降低测量噪声影响;

(3) 对由(2)得到的 3 个对应不同基线长度的载波相位单差均值,根据式(6)计算两颗卫星单差模糊度初值;如果同一颗卫星的两个单差模糊度计算结果一致,证明解算成功;

(4) 将(3)得到的模糊度初值对原始载波相位单差观测数据进行修正,得到无模糊度的载波相位单差测量数据;

(5) 利用(4)得到的观测数据,结合基线长度约束信息,根据式(1)即可计算出基线矢量;

(6) 进一步由式(2),(3)可得到不同基线长度相应的偏航角和俯仰角,对同一基线长度的姿态角进行统计,可得到均值与均方差。表 1~2 给出了一、三两组实验数据处理得到的基线方位角和俯仰角统计结果。

表 1 第一组实验姿态角解算结果

Tab. 1 Attitude results of the 1st test

基线长度 (m)	方位角 $\phi/(^{\circ})$		俯仰角 $\theta/(^{\circ})$	
	均值	均方差	均值	均方差
0.5	-67.054 2	0.647 4	-1.407 9	0.349 8
1.5	-66.601 8	0.322 4	-1.600 1	0.175 9
6	-65.782 3	0.083 1	-0.836 3	0.043 4

表 2 第三组实验姿态角解算结果

Tab. 2 Attitude results of the 3rd test

基线长度 (m)	方位角 $\phi/(^{\circ})$		俯仰角 $\theta/(^{\circ})$	
	均值	均方差	均值	均方差
0.5	-67.132 7	0.667 3	-1.947 3	0.321 9
1.5	-66.948 1	0.462 4	-1.347 1	0.270 9
6	-65.748 4	0.069 3	-0.793 4	0.037 1



图 3 北斗定向系统构成及延长基线实验图

Fig. 3 Experiment diagram of Beidou orientation system and baseline extending

进一步对第三组实验数据(即 6 m 基线)进

行分组处理,由若干历元定向结果进行平均,再对所有平均结果进行统计,分析定向时间对定向精度的影响,处理结果如表 3 所示。

表 3 定向时间对姿态角解算影响

Tab. 3 Time averaging effect on attitude resolution

每组历元数	方位角 $\psi/(\circ)$		俯仰角 $\theta/(\circ)$	
	均值	均方差	均值	均方差
5	-65.748 4	0.040 0	-0.793 4	0.022 4
20	-65.748 3	0.017 3	-0.793 3	0.010 0
80	-65.748 3	0.009 6	-0.793 3	0.005 3
300	-65.748 5	0.004 4	-0.793 1	0.003 1

5 月 31 日实验数据的事后处理为,第二、三两组模糊度求解成功,但第一组求解失败。第二组原始实验数据处理结果如表 4 所示。

表 4 第二组实验数据姿态角解算结果

Tab. 4 Attitude results of the 2 nd test

基线长度 (m)	方位角 $\psi/(\circ)$		俯仰角 $\theta/(\circ)$	
	均值	均方差	均值	均方差
0.5	-2.285 9	0.252 5	0.942 9	0.112 4
1.5	-2.279 0	0.100 9	0.392 8	0.029 4
6	-2.270 6	0.022 3	-0.209 9	0.009 4

根据表 1 可知,当基线长度为 0.5、1.5 和 6 m 时,方位角精度分别为 0.647 4、0.322 4 和 0.083 0°,俯仰角精度分别为 0.349 8、0.175 9 和 0.043 4°,基线长度越长,定向精度越高。因此在实际条件允许的情况下,可以通过增加基线长度来提高定向精度。

对比表 4 和表 1,以基线长度为 1.5 m 的解

为例。当方位角为  $-66.6^\circ$  时,方位角精度为  $0.322 4^\circ$ ,俯仰角精度为  $0.175 9^\circ$ ;当方位角为  $-2.28^\circ$  时,方位角精度为  $0.100 9^\circ$ ,俯仰角精度为  $0.029 4^\circ$ 。由此可知,基线越靠近南北方向定向精度越高。

根据表 3 可以得到,随着历元个数的增加,定向精度有了显著提升。实际操作过程中,可以通过延长测量时间以获得高精度定向结果。

对上述两组模糊度求解失败的实验数据进行分析表明,由于天线 2 在基线矢量方向 3 个不同位置进行了数据采集,可以将这三组数据组合(理论上只要两组,即基线延长一次)对模糊度进行验证,得出各组合解得的东星模糊度都不一样。事后在对载波相位单差值检测时,发现存在跳变现象,初步认定是由于手动延长基线时对东星信号产生遮挡,导致产生周跳。

## 6 结 论

本文利用已有的双天线北斗定向系统,设计了延长基线静态定向实验的实验方案,验证了延长基线法确定整周模糊度的可行性。结果表明,延长基线期间无周跳影响时模糊度确定成功率可达 100%。本文还进一步验证了定向精度,以及制约北斗双星定向的某些确定性因素,包括基线长度、定向时长以及基线指向等。

该项技术可用于实现火炮射向自动操瞄、快速辅助惯导系统初始方位对准,以及为地地导弹机动快速发射提供精密方位基准等,具有广阔的军事应用前景。

## 参考文献:

- [1] 康国华,刘建业,赵伟,等.基于基线延长的高精度北斗双星系统快速定向算法研究[J].宇航学报,2006,27(6):1191-1195.  
KANG G H, LIU J Y, ZHAO W, et al. Fast orientation determination with high precision by Beidou twin-star system based on extended baseline[J]. *Journal of Astronautics*, 2006, 27(6): 1191-1195. (in Chinese)
- [2] PENG H M, CHANG F R, WANG L S. Rotation method for direction finding via GPS carrier phases [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(1): 72-83.
- [3] 逯亮清.基于载波相位干涉测量的双星定向技术研究[D].长沙:国防科技大学,2005.  
LU L Q. *Research on orientation determination technology using bi-satellite system based on carrier phase interferometry* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [4] MADER G L. Ambiguity function techniques for GPS phase initialization and kinematic solutions [C]. *Proceedings of Second International Sympo-*

- sium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Ottawa, Canada, 1990: 1234-1247.
- [5] MADER G L. Rapid static and kinematic global positioning system solutions using the ambiguity function technique [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 9 (B3): 3271-3283.
- [6] EI-MOWAFY A, SCHWARZ K P. Epoch-by-epoch ambiguity resolution for real-time attitude determination using a GPS multi-antenna system [J]. *Navigation*, 1995, 42(2): 391-408.
- [7] 孟领坡, 吴杰. 北斗天线电气相位中心偏差检验试验研究 [J]. 测绘学报, 2008, 37(3): 374-379.  
MENG L P, WU J. Research on the experiment for calibrating of beidou antenna phase center bias [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 374-379. (in Chinese)
- [8] 王磊, 翟国君, 黄谟涛, 等. 利用北斗多频观测进行舰船姿态测量 [J]. 海洋测绘, 2007, 27(2): 11-14.  
WANG L, ZHAI G J, HUANG M T, et al.. The attitude measure of vessel using Beidou multi-frequency observation [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2007, 27(2): 11-14. (in Chinese)
- [9] 朱学勇, 齐志强. 北斗测向技术研究 [J]. 科学技术与工程, 2009(17): 5085-5088.  
ZHU X Y, QI ZH Q. Study on the technology of direction-measurement for BD [J]. *Science Technology and Engineering*, 2009 (17): 5085-5088. (in Chinese)
- [10] 喻其宏, 夏宏森, 吴畏, 等. 基于北斗卫星定位导航系统的炮兵部(分)战斗队形指挥控制系统的设计与实现 [J]. 测绘科学, 2007(6): 185-186.  
YU Q H, XIA H S, WU W, et al.. The design and implementation of battle order command and control system of artillery surveyed combat formation based on Big Dipper satellite positioning and navigation system [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007(6): 185-186. (in Chinese)
- [11] 夏德安, 朱宏. 北斗卫星导航定位系统在防空兵中的应用 [J]. 兵工自动化, 2007(4): L01.  
XIA D A, ZHU H. Application of Beidou satellite navigation & positioning system on air defense army [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2007 (4): L01. (in Chinese)
- [12] 周平根, 过静珺, 李昂, 等. 基于“北斗一号”导航卫星通讯的滑坡实时监测系统研究 [J]. *GNSS World of China*, 2008(5): 20-23.  
ZHOU P G, GUO J J, LI A, et al.. Application of No. 1 Beidou navigation satellite communication technology in the landslide real-time monitoring [J]. *GNSS World of China*, 2008(5): 20-23. (in Chinese)

#### 作者简介:



张晓安(1963—),男,天津人,高级工程师,1986年于二炮工程学院获得学士学位,2002年于北京航空航天大学获得硕士学位,现为二炮装备部科研部主任,主要从事火炮装备研究及科研管理。E-mail: guanhua-zha@sohu.com



逯亮清(1976—),男,山东桓台人,副教授,1998年、2001年和2005年分别于国防科技大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事卫星导航、惯性导航及组合导航算法的研究。E-mail: lulian-gqing@hotmail.com



杨彪(1991—),男,江西宜春人,2010年于国防科技大学获得学士学位,主要从事惯性导航及组合导航算法的研究。E-mail: yang2003biao@yahoo.com.cn