

# 北斗双星系统车辆定向技术\*

吴美平, 逯亮清

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 基于卫星载波相位干涉测量原理, 研究了利用北斗双星系统确定车辆航向的相关技术。首先建立了北斗定向的数学模型, 接着讨论了基于交换天线思想的等效转动基线极大/极小值 ERMM 模糊度确定方法, 然后利用构建的双天线定向系统设计了车载实时航向确定实验, 并通过高精度激光陀螺捷联惯导系统对航向确定精度进行了校核。实验结果验证了 ERMM 解模糊方法的有效性, 表明定向系统实时航向确定有效精度可达  $0.62^\circ$ 。研究结果表明, 北斗双星系统可以用于实时确定车辆的航向。

**关键词:** 北斗双星系统; 载波相位; 模糊度; 定向

中图分类号: V249.32<sup>+</sup>4 文献标识码: A

## Research on Vehicle Heading Determination through Beidou Bi-satellite System

WU Mei-ping, LU Liang-qing

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on interferometry measurement theory of satellite carrier phase, the technology of land vehicle heading determination through Beidou Bi-Satellite System was studied. Firstly the mathematical model of Beidou heading determination was set up. Then the ERMM (Equivalent Rotating Maximum/Minimum) ambiguity resolution method based on antenna swap thoughts was discussed. Vehicle real-time heading resolution experiments were designed by using a two-antenna pointing system, and the heading precision was verified through a vehicular RLG (Ring Laser Gyro) strap-down INS with high attitude accuracy. The test results confirmed the effectiveness of ERMM ambiguity resolution method with the real-time heading determination accuracy reaching  $0.62$  degree. The research indicates that Beidou Bi-Satellite System can be used to real-time land vehicle heading resolution.

**Key words:** Beidou Bi-Satellite System; carrier phase; ambiguity; heading determination

对于地面车辆导航系统来说, 实时确定载体的航向信息是一项关键技术。利用卫星多天线定向技术构建航向确定系统, 与常用的惯导航姿系统相比具有成本低、易维护、启动快、无漂移等优点, 因此受到越来越广泛的关注<sup>[1-2]</sup>。本文针对我国北斗导航定位系统, 研究了利用北斗双星系统实时确定地面运动载体航向的相关技术, 并通过实验验证了定向系统的实时航向确定精度。

### 1 北斗双星定向数学模型

北斗系统空间部分由位于赤道上空距地面高度约  $36\ 000\text{km}$  的 2 颗地球静止轨道卫星组成(此外还包括 1 颗备份卫星)。由于卫星与用户距离和基线长度相比非常远, 因此同一颗卫星载波信号对于基线两端的接收天线来说可视为平行波, 此即载波相位干涉测量。经分析计算, 当基线长度不超过  $200\text{m}$  时, 干涉模型对单差观测引入的最大测距误差不足  $0.6\text{mm}$ , 与噪声影响相比可以忽略。双星定向解算的数学模型很简单, 由两个载波相位单差观测方程及基线长度约束条件组成, 如式(1)所示:

\* 收稿日期: 2006-01-06  
基金项目: 国家部委资助项目(51409010203KG01)  
作者简介: 吴美平(1970—), 男, 副教授, 博士。

$$\begin{cases} \Delta\Phi_{i2}^1 - \Delta N_{i2}^1 = \frac{1}{\lambda} e^1 \cdot r \\ \Delta\Phi_{i2}^2 - \Delta N_{i2}^2 = \frac{1}{\lambda} e^2 \cdot r \\ L = \| r \| \end{cases} \quad (1)$$

其中  $\Delta\Phi_{i2}^i$  为单差载波相位观测量,  $\Delta N_{i2}^i$  为单差相位模糊度参数,  $\lambda$  为北斗载波信号波长,  $e^i$  为卫星相对用户的视线方向单位矢量,  $r$  为基线矢量,  $L$  为基线长度 ( $i = 1, 2$ ); 符号上下标分别表示卫星及天线编号。由于仅考虑单历元实时定向, 因此省略了时间符号, 前两式观测时刻相同, 而第 3 式为基线长度的验前测量方程。

当根据式 (1) 得到基线矢量  $r$  在当地北天东坐标系中的坐标后, 可进一步得到基线矢量的方位角与俯仰角, 如果将天线安装到车辆顶部并使得基线矢量与车体纵轴重合, 即可实现运动车辆的实时航向确定。

## 2 等效转动基线极大/极小值解模糊方法

根据上述分析可知, 由式 (1) 实现双星定向的关键在于单差相位模糊度  $\Delta N_{i2}^i$  正确、快速的确定。模糊度求解一直是卫星定向定姿以及精密相对定位等领域的核心问题, 自 20 世纪 80 年代以来相继发展出多种模糊度解算方法, 如模糊度映射函数(简称模糊度函数)AFM(ambiguity function method)技术<sup>[3-4]</sup>、最小二乘搜索 LSS(least square search)技术<sup>[5-6]</sup>、快速模糊度解算方法 FARA(fast ambiguity resolution approach)<sup>[7]</sup>、快速模糊度搜索滤波器方法 FASF(fast ambiguity search filter)<sup>[8-10]</sup>、最小二乘模糊度去相关调节 LAMBDA(least ambiguity decorrelation adjust)<sup>[11]</sup>等。上述方法一般是针对 GPS、GLONASS 等多星系统的, 由于北斗系统具有信息冗余、卫星对地静止等特性, 从而前述方法无法直接应用到双星定向模糊度解算之中。

本文基于 Remond(1985)所提出的交换天线的思想<sup>[12]</sup>, 探讨了一种等效转动基线的极大/极小值 ERMM(equivalent rotation maximum/minimum)模糊度确定方法。等效转动基线法是相对定轴转动而言, 指基线仅需随载体在较小范围内(不引起卫星视线方向单位矢量发生明显改变)作平面转动即可, 转动轴既不要求与基线几何中轴重合, 亦无须相对当地北天东坐标系固定, 唯一的条件就是各瞬时转动轴均保持平行, 如图 1 所示。该方法是基于这样一个事实: 由于卫星位于赤道上空约 36 000km 的同步轨道, 当

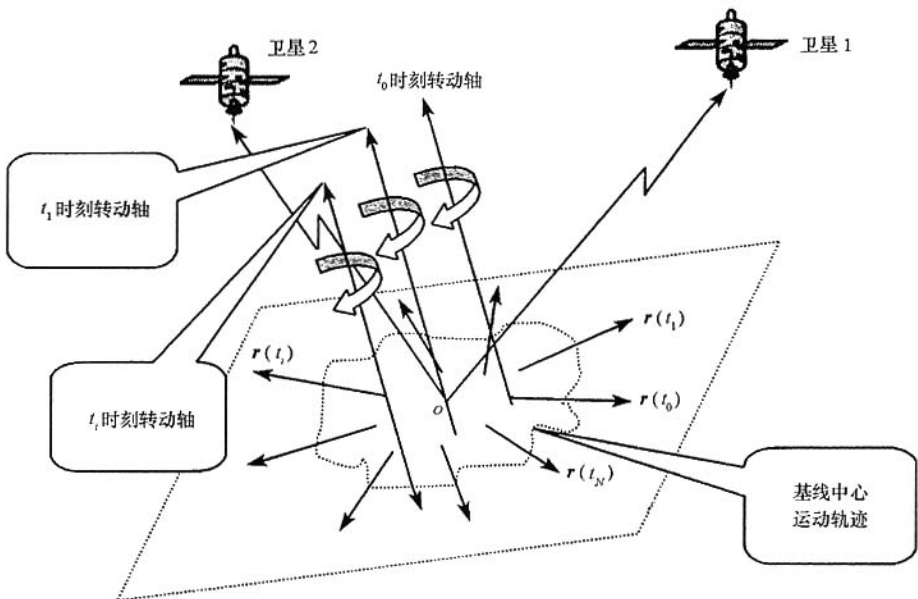


图 1 等效转动基线示意图

Fig. 1 Equivalent rotation of baseline

短基线定向系统在一定范围内(几十米甚至上百米)做定轴转动和做等效转动,二者的单差载波相位观测序列几乎完全一致,即使有区别,也被淹没在测量噪声之中。因此,完全可以利用等效转动测得的数据,进行基于定轴转动的各种解模糊处理,二者结果是一致的,这就是等效转动法解模糊的基本思想。而对于定轴转动基线,由于卫星对地静止,单差相位观测序列呈现正弦波形状(基线转动期间无周跳现象),因此可以利用波峰与波谷(即极大与极小值)两个时刻基线恰好反向时的观测量进行组合,解算出初始单差模糊度。根据前面讨论可知,对于等效转动基线所得到的单差观测序列,亦可进行同样的极大/极小值解模糊处理,称之为“等效转动基线极大/极小值法”。具体到实际操作中,为确保基线等效转动过程中至少包含一个波峰及波谷,只要基线随运动载体进行小范围内略大于1周的转弯运动即可。

以1号卫星为例,对ERMM解模糊方法进行详细说明,假定在 $t_0$ 、 $t_1$ 时刻分别对应单差相位序列 $\Delta\Phi_{12}^1(t)$ 的波峰与波谷,并且基线等效转动过程中无周跳发生,则有:

$$\begin{cases} \Delta\Phi_{12}^1(t_0) = \frac{1}{\lambda} e^1(t_0) \cdot r^1(t_0) + \Delta N_{12}^1(t_0) + \epsilon_{12}^1(t_0) \\ \Delta\Phi_{12}^1(t_1) = \frac{1}{\lambda} e^1(t_1) \cdot r^1(t_1) + \Delta N_{12}^1(t_0) + \epsilon_{12}^1(t_1) \end{cases} \quad (2)$$

上式中 $\epsilon_{12}^1(t_0)$ 、 $\epsilon_{12}^1(t_1)$ 为单差相位观测噪声。根据上述假定知 $r(t_1) = -r(t_0)$ ,并利用北斗卫星对地静止的特点,再结合模糊度参数的整数特性,将式(2)中两式相加,经整理可得 $\Delta N_{12}^1(t_0)$ 的解算表达式:

$$\Delta N_{12}^1(t_0) = \text{int} \left\{ \frac{1}{2} [\Delta\Phi_{12}^1(t_0) + \Delta\Phi_{12}^1(t_1)] \right\} \quad (3)$$

其中 $\text{int}\{x\}$ 为取整函数,返回与 $x$ 最接近的整数。

同理可得2号卫星初始模糊度参数的解算形式:

$$\Delta N_{12}^2(t_0) = \text{int} \left\{ \frac{1}{2} [\Delta\Phi_{12}^2(t_0) + \Delta\Phi_{12}^2(t_1)] \right\} \quad (4)$$

### 3 车载航向确定实验

本文所构建的北斗定向原理样机系统主要包括一台并行4通道载波相位接收机(图2)、2个圆形配套天线、2.55m天线安装杆臂、2根15m馈线及外接直流电源等多种附件。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10Hz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。全部实验系统除此之外还包括实验车(图3)、90型激光陀螺纯惯导系统。其中90型激光陀螺纯惯导系统三轴姿态实时解算精度优于 $0.03(1\sigma)$ ,可用以检验北斗定向系统基线矢量指向的实时确定精度。

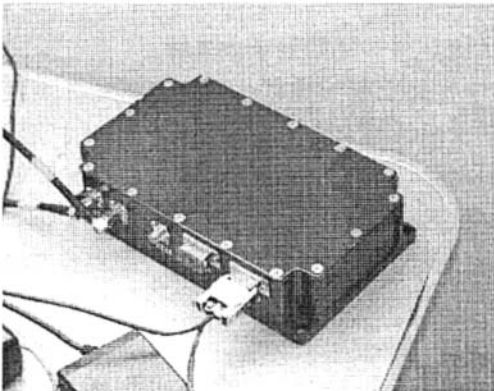


图2 四通道双星载波相位接收机



图3 车载航向确定实验图示

Fig.2 Bi-satellite carrier phase receiver with 4 channels

Fig.3 Vehicle heading determination test

如图4所示为基线矢量与惯导系统相对车体的安装关系,其中 $O-X_b Y_b Z_b$ 为惯导系统所定义的体坐标系,可见基线矢量与 $X_b$ 轴近乎成反向关系。

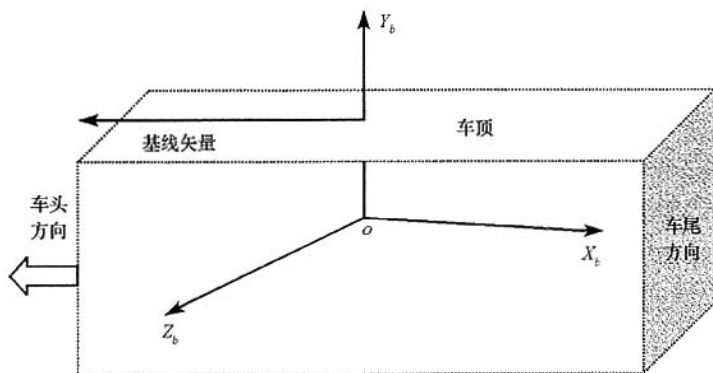


图4 基线矢量与惯导系统相对车体的安装关系示意图

Fig.4 Installation relationship of baseline and INS relative to vehicle

于2005年8月2、4、6日在国防科技大学主楼前广场进行了总共17组双星动态实时航向确定实验。利用等效转动基线极大/极小值法确定初始单差模糊度全部成功。其中有4组在实验过程中2号波束载波相位发生了数次周跳,且均为单位周跳,经周跳检测与修正后,全部成功解算出基线矢量的变化轨迹。

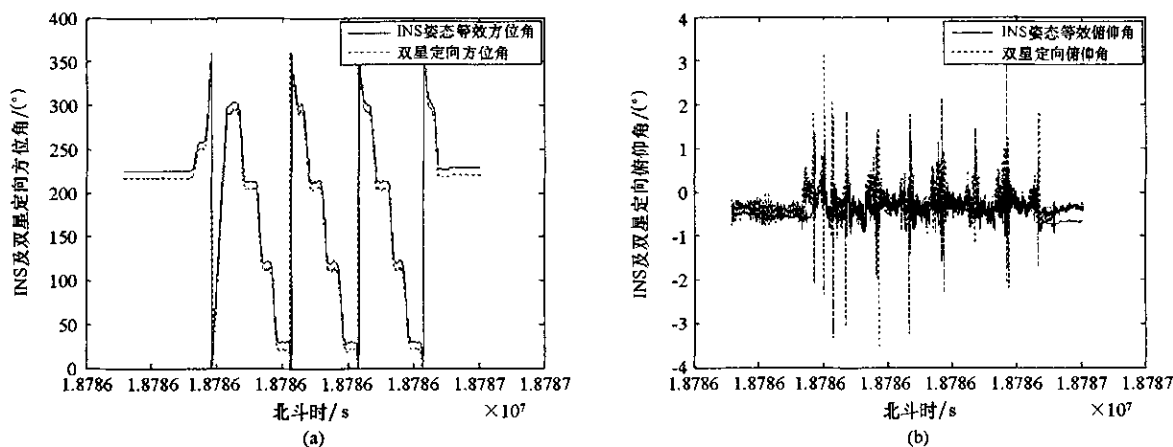


图5 时间同步后北斗定向结果与INS等效方位、俯仰角变化曲线

Fig.5 Beidou heading and INS equivalent azimuth, elevation plot after synchronization

图5所示为双星定向与INS姿态时间同步后的一组对比数据。需要说明的是图5(a)中所标注的“INS等效方位角”指的是INS的 $X_b$ 轴所定义的载体航向角经过反向处理后的角度。在系统安装中由于惯导系统的 $X_b$ 轴与载体实际航向相差近 $180^\circ$ ,故不方便直接与双星定向方位角进行对比,如图4所示。图5(b)中的“等效俯仰角”也是类似含义。另外由于双星定向的误差特性,当基线指向靠近东西向附近时定向精度大大下降。为了客观评定北斗双星定向的有效精度,采用粗差剔除的方法,去除个别误差较大者,然后再进一步计算基线矢量在惯导体坐标系中的方位、俯仰均值与均方差,处理结果如图6所示,由此不难发现多次实验结果呈现较强的随机特性,定向结果可信度高。

根据剔除粗差后的处理结果,如以多组实验的姿态均方差之均值来作为北斗实时定向有效精度指标,则车载实验表明其精度为方位角为 $0.620^\circ$ 、俯仰角为 $0.208^\circ$ ,同时标校出了基线矢量相对惯导所定义体坐标系的安装关系为:方位角为 $171.666^\circ$ 、俯仰角为 $0.015^\circ$ ,该结果与图4所示安装关系吻合。

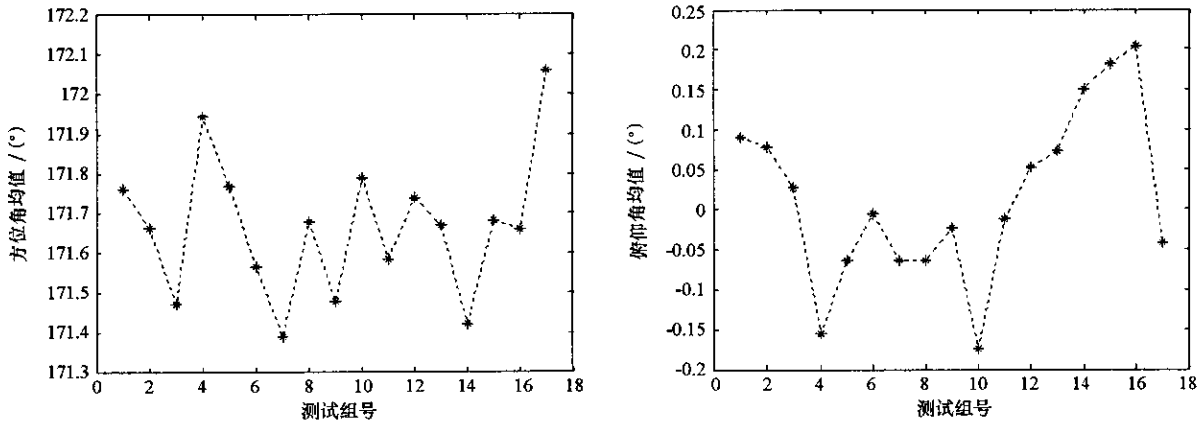


图 6 基线矢量相对 INS 体坐标系的方位角、俯仰均值变化曲线

Fig.6 Azimuth, elevation average variation plot of baseline relative to INS body frame

## 4 结论

本文从方法与工程实现两方面对北斗确定运动车辆航向的技术进行了研究,探讨了基于交换天线思想的等效转动基线极大/极小值 ERMM 模糊度确定方法,并利用自主构建的定向原理样机进行了实际的北斗航向确定实验。实验结果验证了 ERMM 方法的有效性以及北斗航向确定的可行性,并初步检验了航向确定的有效精度。

但在该系统从原理样机走向推广应用之前,还需考虑以下问题:

(1) 由于北斗双星定向自身的误差特性,在某些状态下单历元的定向结果精度较差甚至不可用,对此问题应当寻求可行的解决方案;

(2) 仅当基线矢量与车体纵轴完全重合时,北斗定向解算的方位角结果才与真实的航向一致,否则将存在不对准角,而且该偏差导致的航向确定误差还随车辆的俯仰、滚动姿态角的变化而变化,因此需对此进一步分析,得出为满足一定的航向精度前提下对安装误差的要求。

## 参考文献:

- [1] 付梦印,王美玲,吴江,等. 利用 GPS 卫星信号测量车辆航向[J]. 传感器世界,1997(10):12-15.
- [2] 胡国辉,范胜林,胡恒章. 低成本 GPS 姿态和航向系统的设计[J]. 仪器仪表学报,2001,22(1):72-73.
- [3] Mader G L. Ambiguity Function Techniques for GPS Phase Initialization and Kinematic Solutions[A]. Proceedings of Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System[C], Ottawa, Canada, 1990.
- [4] Mader G L. Rapid Static and Kinematic Global Positioning System Solutions Using the Ambiguity Function Technique[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(B3): 3271-3283.
- [5] Hatch R. Ambiguity Resolution in the Fast Lane[A]. Proceedings of ION GPS-89, Second International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation[C], Colorado Springs, CO, 1989.
- [6] Hatch R. Instantaneous Ambiguity Resolution[A]. Proceedings of International Association of Geodesy, No. 107 Symposium, Kinematic Systems in Geodesy, Surveying and Remote Sensing[C], Banff, Canada, 1990.
- [7] Frei E, Beutler G. Rapid Static Positioning Based on the Fast Ambiguity Resolution Approach: The Alternative to Kinematic Positioning[A]. Proceedings of the 2nd International Symposium on Precise Positioning with GPS[C], Ottawa, 1990.
- [8] Chen D. Fast Ambiguity Search Filter (FASF): A Novel Concept in GPS Ambiguity Resolution[A]. Proceedings of GPS-93, the Institute of Navigation[C], Alexandria, VA, 1993.
- [9] Chen D. Development of a Fast Ambiguity Search Filter(FASF) Method for GPS Carrier Phase Ambiguity Resolution[D]. Ph. D. Thesis, Department of Geomatics Engineering, the University of Calgary, 1994.
- [10] Chen D, Lachapelle G. A Comparison of the FASF and Least-squares Search Algorithms for On-the-fly Ambiguity Resolution[J]. Navigation, 1995, 42(2): 371-390.
- [11] Teunissen P J G. A New Method for Fast Carrier Phase Ambiguity Estimation[A]. Proceedings of IEEE PLANS '94[C], Las Vegas, Nevada, USA, 1994.
- [12] Remondi B W. Performing Centimeter-level Surveys in Seconds with GPS Carrier Phase: Initial Results[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1985, 32(4): 386-400.



