

基于北斗的车载接收机航向测量技术研究

袁晓宇, 李 峰, 胡文涛
(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 研究一种 BD2 双天线的双频基线测量算法, 实现了在车载动态条件下利用 BD2 卫星进行载体航向实时测量, 满足军用车辆、无人机、船舶舰艇等载体高精度、快速实时、连续稳定长时间工作、低成本的要求, 对算法实现进行了试验验证, 取得了理想的成效, 具有较强的工程实用价值。

关键词: BD2; 航向测量; 算法; 双天线; 基线; 整周模糊度

中图分类号: P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110 (2014) 02-0054-05

Research on BD Satellite Receiver Technique about Course Determination

YUAN Xiao-yu, LI Feng, HU Wen-tao
(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Using the BD2 Double frequency Carrier-phase difference technique to measure the vehicle's Azimuth, have the characteristics of high accuracy, high reliability, faster and real time, long continuous work stability, low cost and so on, to meet the need of Military vehicles, pilotless aircraft, naval ship. Therefore, the algorithm were studied and tested practically. It illuminates a good application value.

Key words: BD2 ; Azimuth determination; Algorithm ; Double antenna ; Baseline; Integer ambiguity

0 引言

基于载波相位差分进行载体姿态测量技术发展是相当快的, 我国在这方面起步较晚, 现在市场主要被国外的基于 GPS 的测量产品占领。军用车辆、船舶舰艇、无人机提出了使用 BD2 载波相位差分的简易设备航向测量要求, 并且要求具有较高的动态性能, 使用传统的 GPS 姿态测量产品已不能满足其要求。对于惯性测姿系统, 由于存在漂移问题, 长时间工作系统精度变差, 使用 BD2 载波相位差分航向测量技术可与惯性姿态测量系统形成互补, 满足载体长时间工作的要求。

车载航向测量算法, 是基于短基线的测量方法, 其中快速正确地解算整周模糊度是实现车载 BD2 高精度定向的关键, 借鉴 RTK 设计思路, 采用 BD2 B1/B3 双频双差的宽巷模糊度求解的思路, 其宽巷组合波长较长, 为 102.5 cm (而采用单频

点 B3 的载波相位差分法, 波长为 23.6cm), 并且没有减弱电离层的影响, 但由于其抗差性明显增强, 适合于整周模糊度快速固定, 从而适应实时动态的要求。对于宽巷下噪声引入的基线矢量精度损失, 仍不失一种好的、简化的方法, 最快时可单历元固定模糊度。

对模糊度的固定, 国内外学者提出了多种整周模糊度算法, 其中, LAMBDA 算法^[2-3]理论严密且性能较好。该方法以整数最小二乘原理为基础, 通过变换矩阵对描述模糊度之间相关关系的协方差矩阵进行降相关处理, 以提高整周模糊度的搜索速度。

本文将 LAMBDA 算法和宽巷模糊度技术结合起来, 针对高动态、强实时性应用需求, 对基于 BD2 信号的航向测量算法进行设计、仿真和验证。

收稿日期: 2014-07-14; 修订日期: 2014-09-10。

作者简介: 袁晓宇 (1970-), 博士, 主要从事导航算法设计研究。

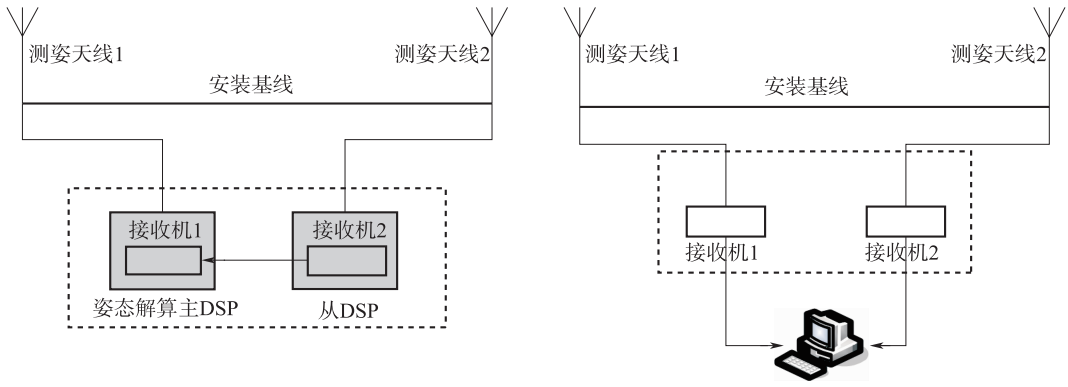


图 1 测量装置组成示意图 (两种方式)
Fig. 1 The scheme of determination system

1 系统构成

载体姿态测量是在载体平台上适当配置两个天线, 利用双频载波相位差分测量技术, 即利用天线接收的两个频点下的载波相位差、测距码和导航电文信息, 通过相位双差模糊度法求解在 WGS-84 座标下基线矢量, 再转化到地理水平座标系, 即可求得载体的航向角、俯仰角, 从而得到载体的航向信息。在航向测量状态下, 一种方法是: 一个接收机的 DSP (从 DSP) 通过 RS-232 通讯接口输出 BD 定姿所需参数到另一个接收机的 DSP (主 DSP), 包括时间、经纬度、速度、位置 (X, Y, Z 坐标) DOP 值、可见星号、卫星高度角、卫星信噪比信息、载波相位观测信息, 在主 DSP 中输出解算的航向角、俯仰角。另外一种方法是: 把两个接收机的 DSP 中的定位数据信息输出到上位机中, 进行解算处理, 本文采用第二种方法。

2 LAMBDA 算法研究

算法首先进行宽巷的双频双差模型的建立, 然后根据 LAMBDA 的模糊度求解步骤, 先进行模糊度浮点解, 再进行 Z 变换, 再进行模糊度搜索, 在已知基线长度的辅助下, 固定整数解, 最后进行姿态的解算。

2.1 宽巷双频双差方程建立

载波相位双频双差的模式不但消除了星差, 还消除了 BD2 接收机的钟差, 同时因为基线很短, 也消除了对流层和电离层的误差。由于采用宽巷的方法, 宽巷波长较长, 模糊度固定相对较为容

易, 其表达式如下列所示。

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi_1(t) - \nabla\Delta\varphi_2(t) = & (\nabla\Delta\rho_1/\lambda_1 - \nabla\Delta\rho_2/\lambda_2) - (\nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2) + \\ & (\nabla\Delta I/(\lambda_1 f_1^2) - \nabla\Delta I/(\lambda_2 f_2^2)) + \\ & (\nabla\Delta T_1/\lambda_1 - \nabla\Delta T_2/\lambda_2) + \\ & (\nabla\Delta M_1/\lambda_1 - \nabla\Delta M_2/\lambda_2) + \\ & (\nabla\Delta\varepsilon_1/\lambda_1 - \nabla\Delta\varepsilon_2/\lambda_2) \end{aligned}$$

其中参数含义: 双差后的电离层误差 $\nabla\Delta I/f_1^2$ 、对流层误差 $\nabla\Delta T$ 、多径误差 $\nabla\Delta M$ 、 $\nabla\Delta\varepsilon$ 是引入的接收机测量噪声。基线短时, 这些可以忽略。线性化后简化形式为:

$$\begin{aligned} \nabla\Delta\varphi_1(t) - \nabla\Delta\varphi_2(t) = & \left[-\frac{1}{\lambda_1}(\nabla l_2(t) \nabla m_2(t) \nabla n_2(t)) + \right. \\ & \left. \frac{1}{\lambda_2}(\nabla u_2(t) \nabla v_2(t) \nabla w_2(t)) \right] \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} - \\ & (\nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2) + (\nabla\Delta\rho_1 - \nabla\Delta\rho_2) \end{aligned}$$

即简化为:

$$\nabla\Delta\varphi_w = [I, J, K] \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} - (\nabla\Delta N_w) + \nabla\Delta L_w \quad (1)$$

式中, $[I, J, K]$ 为宽巷余弦双差。 $\nabla\Delta N_w$ 为宽巷模糊度 $(\nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2)$, 具有整数特性。 $\nabla\Delta L_w = (\nabla\Delta\rho_1 - \nabla\Delta\rho_2)$ 。 $\nabla\Delta\rho_1$ 为载波 B1 下的几何距离双差。 $\nabla\Delta\rho_2$ 为载波 B3 下的几何距离双差。 $[\delta x, \delta y, \delta z]^T$ 为基线向量。

式 (1) 继续简化为:

$$y = Aa + Bb + e \quad (2)$$

式中, y 为相位双差值矩阵; a 为宽巷双差整周模糊度矩阵; b 为基线矢量; A 和 B 分别为 a 和 b 的设计矩阵; e 为观测噪声矢量。

要解基线长度, 快速正确地解算整周模糊度是实现 BD2 高精度航向测量的关键, 首先快速正确地解算宽巷模糊度的浮点解, 进而再确定宽巷整周模糊度的搜索空间。LAMBDA 方法以整数最小二乘原理为基础, 提出降相关的概念, 即通过 Z 变换矩阵对描述模糊度之间相关关系的协方差矩阵进行降相关处理, 以优化整周模糊度的搜索空间, 进而快速求解。

2.2 整周模糊度浮点解算法

忽略双差模糊度 a 的整数特性, 方程 (2) 应用标准的最小二乘算法表示:

$$\min \| y - Aa - Bb \|^2$$

求解该线性估计问题。此时估计出的值称为浮点解, 记为 \hat{a} 和 \hat{b} , 对应的方差-协方差分别为 $Q_{\hat{a}}$ 、 $Q_{\hat{b}}$ 、 $Q_{\hat{a}\hat{b}}$ 。

实现中, 方程 (2) 的观测模型可以写为:

$$(A_i, B) \begin{pmatrix} X_i \\ N \end{pmatrix} = L_i + \Delta_i \quad (3)$$

式中 i 为历元号; A_i 为 $k \times 3$ 维系数矩阵; B 为 $k \times k$ 模糊度系数矩阵; X_i 为基线向量, $X_i = [\delta x, \delta y, \delta z]$; N 为 k 维整周模糊度向量; L_i 为 k 维双频双差观测值向量, 它是双差实测值与计算值之差; Δ_i 为 e , 即 k 观测噪声矢量; 观测值权阵为 P_n , 它是 $k \times k$ 的方阵组。把 (A_i, B) 看作系数矩阵 A , 得到最小二乘解:

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} \hat{X} \\ \hat{N} \end{pmatrix} = (A^T P_n A)^{-1} A^T P_n L = N_0^{-1} A^T P_n L \quad (4)$$

事实上, 在模糊度快速固定中, 如果观测历元 n_i 较少, 如为几个历元, 观测值的个数少, 法方程是病态方程, 不仅其解很不稳定, 而且 $N - 1$ 主对角线元素非常大, 致使整周模糊度的搜索范围也就急剧增大。这时, 法矩阵 N 的条件数比较大, 一般为 10^6 以上。

法矩阵为: $N_0 = A^T P_n A$; \hat{Y} 的方差-协方差阵为: $Q_{\hat{Y}} = N_0^{-1}$ 。对于仅观测几个历元的 BD2 双频双差快速模糊度固定及动态定位, 法方程对观测误差的敏感性非常强, 即使观测量中有微小的误差,

也能对模糊度浮点解造成极大的误差, 法方程病态数为:

$$K(N_0) = |\lambda_{\max}| / |\lambda_{\min}| \quad (5)$$

式中, λ_{\max} 、 λ_{\min} 为法方程的最大、最小特征值。

病态方程的解算实质是对参数进行有偏估计, 其数学模型可表示为:

$$Y = (A^T P_n A + T)^{-1} A^T P_n L \quad (6)$$

其中 A 为观测设计矩阵, P_n 为权值矩阵, T 为改进的正则化矩阵, 可参考相关资料。

$$P_n = \begin{pmatrix} P_0 & & & 0 \\ & P_0 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & P_0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

观测权值权阵 P_0 为 $k \times k$ 方阵, 选择由高度角构造。

2.3 Z 变换

整周模糊度搜索时, 用到 Z 变换。当观测时间较短时, 各模糊度间高度相关, 导致 $Q_{\hat{a}}$ 远非对角阵, 无法求解, 此时超椭球被拉得很长, 使得协方差阵 $Q_{\hat{a}}$ 近似对角。实现降相关, 从几何意义上说, 就是对协方差阵 $Q_{\hat{a}}$ 进行几何变换, 即 Z 变换, 变换的目的是使一个被拉长的超椭球体接近超球体。其中算法很多, 迭代双乔里斯基分解的效果较好, 同时通过方差协方差矩阵的改进, 去掉矩阵的病态性, 得到正确的整数变换矩阵, 缩小搜索范围, 实现整周模糊度的快速固定。例如: 为了提高模糊度搜索的效率, 对最初的模糊度 \hat{a} 作 z 变换, 以降低模糊度间的相关性。 z 变换可概括为:

$$(\hat{z} - z)^T Q_{\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - z) < \chi^2$$

$$(z = Za, \hat{z} = Z\hat{a}, Q_{\hat{z}} = ZQ_{\hat{a}}Z, \det(Z) = \pm 1) \quad (8)$$

2.4 模糊度整数解

利用模糊度浮点解和对应的协方差矩阵, 借助整数最小二乘算法求解整周模糊度。即采用下式 (9) 得到模糊度整数解 \tilde{a} :

$$\min (\hat{a} - a)^T Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - a) \quad a \in Z^n \quad (9)$$

2.5 基线向量估计

利用模糊度的整数特性及基线长度已知特性, 进一步提高基线向量的估计精度

$$\tilde{b} = \hat{b} - Q_{\hat{a}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - \tilde{a}) \quad (10)$$

通过对基线向量坐标系转换，从而求解航向角。

前述 2.1、2.2、2.3、2.4 章节内容是对式

(1) 求解最小值的过程，其中，第 2.4 节的求解目前还没有成熟的算法，主流的方法是通过搜索来求解。搜索空间可表示为：

$$(\hat{a} - a)^T Q_{\hat{a}}^{-1} (\hat{a} - a) < \chi^2 \quad (11)$$

式 (11) 对应的是一个 m 维超椭球体， χ^2 和 $Q_{\hat{a}}^{-1}$ 分别控制其大小和形状， \hat{a} 为超椭球体的中心。

航向角计算值与均值如图 3 所示。

3 软件实现

采用自研的基于 FPGA + DSP 构架的 BD2 B1/B3 双频接收机，采用了图 1 所示的第二种系统构架方式，对软件进行了实现。软件整体流程为：开始（宽巷差分方程建立）→ 模糊度浮点解 → 模糊搜索 → 姿态解算。这一流程不断地循环进行，其中的两个主要流程如图 2 所示。

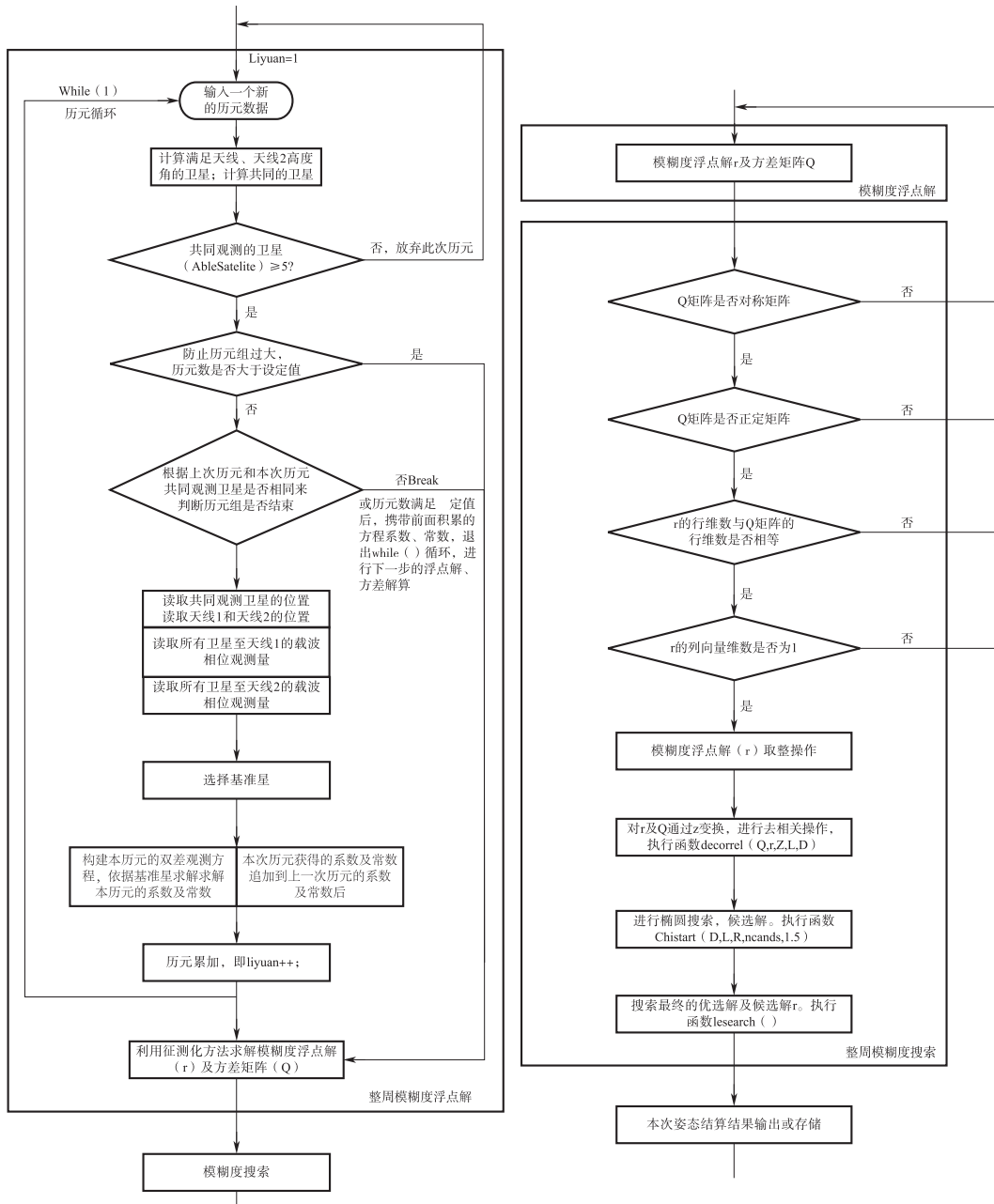


图 2 整周模糊度浮点解流程及整周模糊度搜索流程

Fig. 2 The scheme of integer ambiguity float solution and searching flow

4 测试结果

根据图 2 所示流程进行了程序的编制，在程序编制完成后，带入实际测试数据，进行算法的验证。基线为某两个已知固定的标定点，长度为 1.2m，实际标定的真实航向角为 1.103°。

图 3 中，曲线的纵轴为测量值，横轴为输出的点数，输出速率为 5 Hz。航向角测量结果统计值如表 1 所示。

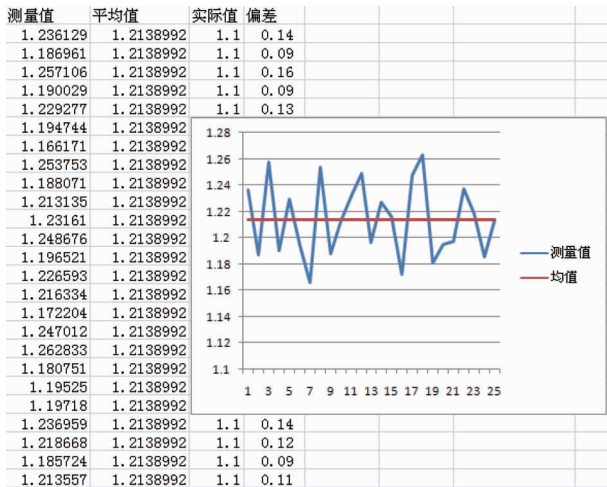


图 3 航向角和均值

Fig. 3 The scheme of azimuth measurement value and average value

表 1 航向角测试情况

Tab. 1 Azimuth test states

均方根误差	均值误差	方差
0.12°	0.11°	0.028°

在基线长度为 1.2m 时，精度达到 0.12°。

5 结论

本文将 LAMBDA 算法和宽巷模糊度求解算法结合起来，设计了一种基于 BD2 信号的双频双天线航向测量算法，并完成了试验验证。试验结果表明，该算法在保证良好测向精度的同时，可以进一步加快算法的实时性，在车辆、飞机等领域具有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] 许江宁, 朱涛, 卞鸿巍. BD 姿态测量技术综述 [J]. 海军工程大学学报. 2003, 15 (3): 17 - 22.
- [2] ELLHATCH R R, SHARPE T. A computationally efficient ambiguity resolution technique [A]. Proceeding of IONBD 2001 [C]. Salt Lake City, UT, USA.
- [3] TEUNISSEN P. J. G. Least-squares estimation the integer BD ambiguities, Invited lecture, Sect4 Theory and Methodology, IAG general meeting [C], 1993.
- [4] 王先全, 吴敏, 冯济琴, 董淳. BD 双天线定向系统及优化模糊度搜索算法 [J]. 测绘科学技术学报. 2009, 26 (5): 310 - 320.