

已知长度和模糊姿态约束 GPS 短基线定向研究

王 修, 张德佳

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 阐述了基于载波相位定向的基本方法, 分析了基于 GPS 载波相位的精密定向关键是需要求解整周模糊度, 提出基线在其长度和大概姿态约束下快速求解整周模糊度的方法, 并得出仿真结果, 验证了方法的有效性与可行性; 在仿真的环境条件下, 定向的平均精度达到分的级别。

关键词: GPS; 短基线; 载波相位; 整周模糊度

中图分类号: P258

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)07-0149-03

The Study of GPS Short Baseline Orientation Method Under the Constraint of Known Length and Fuzzy Attitude

WANG Xiu, ZHANG De-jia

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: This paper states the basic method of direction of the GPS carrier phase based on precision, analyzes that direction of the GPS carrier phase based on precision needs the solution of integer ambiguity, and puts forward the method to quickly solve integer ambiguity under its length and probably postural constraints. The simulation results proves the validity and feasibility of the authentication method. In the simulation environment, the average orientation accuracy can reach the level of the arcminute.

Key words: GPS; short baseline; carrier phase; integer ambiguity

当前利用载波相位测量技术的基线相对定位精度可以达到亚毫米级^[1], 使短基线的高精度定向成为可能。其难点是整周模糊度的求解, 以及其周跳检测。整周模糊度的求解的发展过程包括由静态、快速静态再到动态中求解^[2]。重点都是如何提高整周模糊度搜索的准确, 以提高导航定位效率和定位结果和精度^[3]。

目前对于整周模糊度的研究主要在于高效的搜索算法, 众多的算法各有优缺点。参考文献[4]中提出在姿态角约束下求解整周模糊度的金字塔算法, 但此方法在计算完全部样本后, 在取舍上有一定的难度。夏振纯^[5]提出了利用任一角度的正弦与余弦平方和为1来作为检验标准, 但其方法的搜索范围较大。本文提出一种减小整周模糊度搜索范围的方法, 提高搜索速度。

1 载波相位差分定向原理

考虑时钟误差、电离层效应、对流层效应、地球潮汐和海水负荷效应、多路径和相对论效应以及剩余误差的影响, 载波相位可表示^[6]:

$$\phi + n = \frac{1}{\lambda}(\rho + \delta\Delta t \cdot c + \delta_{tro} + \delta_{ide} - \delta_{ion} + \delta_{mul} + \delta_{rel} + \varepsilon)$$

其中, ϕ 为相位测量的小数部分, n 为整周模糊度, ρ 为接收机与卫星的几何距离, $\delta\Delta t$ 为时钟误差, 其余各项对应前面的误差。

1.1 单差方程

如图1, 对于构成基线的两天线来说, 如果在单历元进行差分处理数据, 则有些相同的误差可以消去, 考虑两个天线1与2同时观测到第*i*颗卫星, 式两项相减得

$$\phi_{12}^i + n_{12}^i = \frac{1}{\lambda}(\rho_{12}^i + \varepsilon_{12}^i) \quad (2)$$

其中 $\phi_{12}^i = \phi_1 - \phi_2$, n_{12}^i, ρ_{12}^i 同理, ε_{12}^i 为天线 1 观测量总误差与天线 2 观测量的总误差相减。已知天线 1 的精确位置时, 由图 1 的矢量表示 $\rho_{12}^i = \vec{d} \cdot \vec{e}_i = |\vec{d}| |\vec{e}_i| \cos \theta_i$, \vec{e}_i 为天线 1 与卫星的方向上的单位矢量, 并在坐标系上有 3 个分量, 由于两天线与卫星的距离非常远, 天线 2 与卫星的方向上的单位矢量也看作 \vec{e}_i , 得:

$$\phi_{12}^i + n_{12}^i = \frac{1}{\lambda}(\vec{e}_i \cdot \vec{d} + \varepsilon_{12}^i) \quad (3)$$

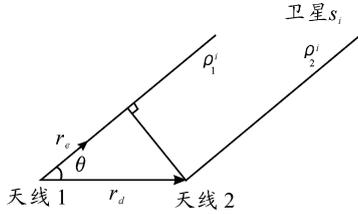


图 1 天线基线矢量与观测卫星

1.2 双差方程

考虑两个天线 1 与 2 同时观测第 i, j 颗卫星, 两个单差方程相减得到:

$$\phi_{12}^{ij} + n_{12}^{ij} = \frac{1}{\lambda}(\vec{e}_{ij} \cdot \vec{d} + \varepsilon_{12}^{ij})$$

其中 $\phi_{12}^{ij} = \phi_{12}^i - \phi_{12}^j$, $n_{12}^{ij}, \vec{e}_{ij}, \varepsilon_{12}^{ij}$ 同理。

假如在同一时刻对 m 颗卫星进行观测, 并以第 1 颗卫星为参考星。可以得到双差观测方程:

$$L = AX + E \quad (1)$$

$$L = \Phi + N, \Phi = \begin{bmatrix} \phi_{12}^{12} \\ \phi_{12}^{13} \\ \vdots \\ \phi_{12}^{1m} \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} n_{12}^{12} \\ n_{12}^{13} \\ \vdots \\ n_{12}^{1m} \end{bmatrix}$$

$$A = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} \vec{e}_{12} \\ \vec{e}_{13} \\ \vdots \\ \vec{e}_{1m} \end{bmatrix}, X = \vec{d} = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \varepsilon_{12}^{12} \\ \varepsilon_{12}^{13} \\ \vdots \\ \varepsilon_{12}^{1m} \end{bmatrix}$$

至少 4 颗卫星的情况下, 当整周模糊度已知确定并忽略噪声时, 可用加权最小二乘法^[7]得:

$$X = (A^T \omega A)^{-1} A^T \omega L$$

其中加权矩阵 ω 表示观测矢量 L 的协方差阵, 得到基线矢量 X 后可得到方位角 φ :

$$\varphi = \arctan \frac{dy}{\sqrt{dx^2 + dy^2}} \quad (2)$$

2 整周模糊度求解过程

根据定向的需要确定其定向的坐标系, 即采用 WGS-84 坐标系, 如有必要可以进行坐标系转换, 此问题不在本文的讨论范围之内。

该过程用双差方程来求解。设基线长度为 1, 初始方位角为 ψ_0 , 变化范围为 $\delta\psi$, 初始俯仰角为 θ_0 , 变化范围为 $\delta\theta$, 即:

$$\begin{cases} \psi_0 - \delta\psi \leq \psi \leq \psi_0 + \delta\psi \\ \theta_0 - \delta\theta \leq \theta \leq \theta_0 + \delta\theta \end{cases}$$

如图 2 所定义坐标系则基线矢量:

$$b = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \cos \theta \cos \psi \\ l \cos \theta \sin \psi \\ l \sin \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

令方位角的搜索步长为 h_ψ , 俯仰角的搜索步长为 h_θ , 对于每组 (ψ, θ) , 由式(3)得到一个矢量 b' , 通过式(1)由已知观测量和方向单位矢量差可反解出浮点解 $N_f = (n_{12}^{12} \ n_{12}^{13} \ \dots \ n_{12}^{1m})$, 每个元素取整得 N , 再由式(1)得 b , 为了节省搜索时间可先进行大步长的粗搜索, 再在粗搜索确定的区间内进行步长小的精搜索。

$$\begin{cases} \min[(x^2 + y^2 + z^2) - l^2] \\ \min[(\sin^2 \psi + \cos^2 \psi) - 1] \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)两个选择指标来确定最优的 N 和 b , 由式(2)求解方位角(WGS-84中)。如有载体便可确定载体的方位了。

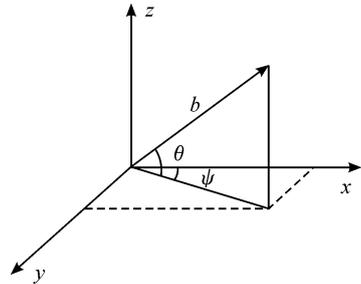


图 2 矢量 b 在坐标系中的表示

总体的流程如下(图 3):

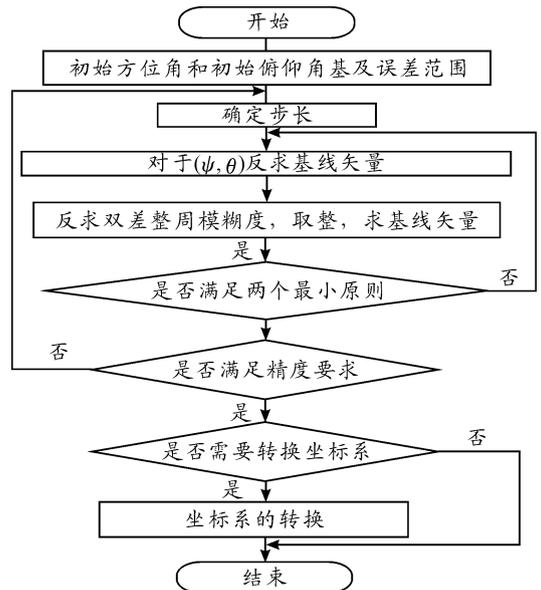


图 3 算法流程

3 仿真验证

3.1 信号的获取

由前面可知该仿真需要 4 颗卫星的观测值,而一般的可观测卫星都大于 4 颗^[8]。选星的依据是使卫星的空间几何分布达到最优,即取几何精度因子 GDOP 最小值的 4 颗卫星组合。首先由 MATLAB R2010a 对 GPS 星座进行实时仿真得到所有可视卫星,然后遍历所有的可视卫星组合。取 GDOP 最小的 4 颗星的组合。

确定卫星组合后,由选取的可视星和接收机在地心坐标系中的相对位置,得到天线 1 与卫星的方向矢量,并计算在站心坐标系中卫星的仰角,将仰角高和信噪比好的为主星,其余卫为辅星,利用对主星和辅星的观测构造双差观测方程。模拟天线接收到的载波相位观测值,可选取不同时刻并记录,以进行比较。

3.2 仿真过程及结果

基线长度为 2 m,初始方位角为 3° , $\delta\psi = \pm 2^\circ$,初始俯仰角为 0.1° , $\delta\theta = \pm 0.01^\circ$ 。假定载波相位可精确到二百分之一周。当步长 $h_\psi = 0.2^\circ$, $h_\theta = 0.01^\circ$ 时,得到结果:经过多次不同时刻,不同星座的仿真,得到如下结果,如表 1 所示。

表 1 仿真结果

序号	N 取整范围	N 终值	相对定位误差/mm	方位角误差/(')
1	9, -4, 2 7, -6, 0	8, -5, 2	0.510 9	3.137 0
2	8, -5, 1 6, -7, -1	7, -6, 1	0.596 4	4.137 0
3	9, -4, 1 7, -6, -1	8, -5, 1	0.095 8	-0.374 2
4	9, -5, 0 7, -7, -2	8, -6, 0	0.246 1	1.311 4

表中 N 取整范围上下对应着每个双差整周模糊度的可选范围, N 终值为符合两个最优条件的整周模糊度组合。在其他步长值仿真时发现,取得太小,并不会提高精度,因为步长只是获得 N 的取值范围,而太小的步长只会得到很多相同的取值范围,反而增加了运行时间。步长的选择要根据实

际情况来决定。表 1 中方位角误差在几分,这主要受载波相位的观测误差影响。

经过仿真可知该方法的有效性与精确性。该搜索算法适用于基线较短的情况下,一般不超过 10 m,因为基线变长搜索范围则会变大,采用的限制约束条件效果就会不明显。

4 结束语

本文提出由已知的基线长度和其大概的姿态角减小整周模糊度搜索范围,有较好的效果。因为只需要单历元数据,所以具有实时性的优点,有效地避免了周跳等问题。但基线不宜过长,否则搜索范围会变大。

参考文献:

- [1] 王银华,胡小平. GPS 精密定向研究的实验[J]. 宇航学报,2006,22(1):70-74.
- [2] 李强,刘广军. GPS 理论、算法与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [3] 全伟,刘百奇. 惯性/天文/卫星组合导航技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [4] 吴美平,胡小平. 卫星定向技术[M]. 湖南:国防科技大学出版社,2007.
- [5] 夏振纯. GPS 定位与测姿技术及其实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2004.
- [6] 刘利生,吴斌. 卫星导航测量差分自校准融合技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
- [7] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 2 版. 北京:科学出版社,2008.
- [8] 王珂. GPS 测向算法与应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [9] 张君莉,田天,易欣,等. 载波相位观测对传统双频 GPS 电离层模型改进研究[J]. 装备环境工程,2011(1):90-93.
- [10] 陈跃鹏,李东光,崔占忠,等. 高动态环境下 GPS 信号跟踪算法[J]. 火力与指挥控制,2011(7):25-27.

(责任编辑 周江川)