

一种 GPS 动态解相位模糊的搜索算法*

廖向前** 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 在无法进行静态初始化的环境下,讨论了一种适用于动态环境下解算相位整周模糊的方法。首先确定相位模糊的搜索空间,然后利用统计检验逐步缩小搜索范围直至得到唯一正确值,同时通过积累残差平方和的比较,可以避免由于偶然误差的影响而丢失正确值。模拟实验进一步验证了其有效性。

关键词 整周模糊值; 相位双差; 搜索空间; 统计检验; 积累残差平方和
中图分类号 TN967.1

全球定位系统(GPS)定位技术发展到现在,已不再局限于用 C/A 码或 P 码伪距定位,通常在一般情况下 C/A 码伪距定位已能满足要求,然而在某些要求高精度的场合(如飞机精密进近着陆,地形测绘等)仍然无法满足要求,即使严格保密的 P 码也只能达到几米精度。因此研究如何利用 GPS 载波相位信息的定位导航技术在各国竞相开展,并首先在大地测量上取得了巨大成功。载波相位定位技术的主要障碍是存在相位整周模糊,从已有的成果来看,基本上都是利用 GPS 接收机在待定点收集大量数据之后进行处理,这种方法的特点是在静态下解算相位模糊,缺点是效率比较低,不能实时应用,对于动态用户来说不能采用这种方法,而必须在动态中定出用户的精确位置来,也即目前国际上竞相研究开发的 OTF(On The Fly)技术。如果结合无码技术可以获取载波相位信息而不受伪码保密的控制,这将是一项非常值得研究的课题。文献[1~3]中分别从不同角度讨论了卡尔曼滤波法、模糊函数法,以及相位平滑伪距等方法,并在实验中获得了验证。本文研究一种适合于动态环境解算载波相位整周模糊值的搜索算法,这种方法概念清楚,对单频或双频载波相位接收机均可,编程实现也很容易。

1 载波相位定位的数学模型

1.1 相位差分方式

GPS 信号存在诸多误差源,其主要部分有星历误差,电离层、对流层误差以及 SA 误差等。由于这些误差在空间上存在相关性,可以建立差分方式,对基准台和动态接收机测得的相位进行差分,即可消除大部分误差源,提高定位精度。

1.2 数学模型

假设 A, B 分别为参考站和动态站, r, i 为其中的两颗观测卫星,载波相位双差定位的数学模型为^[4]

$$\Phi_{AB}^r(t) = \frac{1}{\lambda} \Delta \phi_{AB}^r(t) + N_{AB}^r \quad (1)$$

1996 年 5 月 9 日收稿

* 电子部预研基金资助项目
** 男 25 岁 博士生

其中 $\hat{Q}_B(t) = \hat{Q}(t) - \hat{Q}(t) - [\hat{Q}(t) - \hat{Q}(t)]$ 为 A, B 两站测得的 r, i 卫星的载波相位双差值; $d_{AB}^i(t) = \hat{d}_A^i(t) - \hat{d}_B^i(t) - [\hat{d}_A^i(t) - \hat{d}_B^i(t)]$ 为 A, B 两站到 r, i 卫星的真实距离双差值; $N_{AB}^i = N_A^r - N_B^r - [N_A^r - N_B^r]$ 为载波相位双差整周模糊值。

卫星的位置由星历表提供, 参考站的位置精确已知, 动态站可在一概略值点 B_0 附近展开得式 (1) 的线性化方程, 并简写为

$$dd_i = e_i b + \lambda N_i \tag{2}$$

式中 dd_i 为展开后的已知项, 与相位观测值有关; 矢量 e_i 与动态站到参考卫星 r 卫星 i 组成的方向向量有关; N_i 为式 (1) 中的 N_{AB}^i ; b 为概略值点 B_0 至真实位置 B 的基线矢量, $b = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ 。

若在同一时刻可观测到 $n+1$ 颗卫星, 可组成 n 组双差相位观测值写成矩阵形式

$$DD = H\beta \tag{3}$$

式中

$$DD = [dd_1, dd_2, \dots, dd_n]^T$$

$$H = \begin{bmatrix} e_1 & \lambda & & & \\ \vdots & & \ddots & & 0 \\ e_i & & & \lambda & \\ \vdots & & & & 0 & \ddots \\ e_n & & & & & & \lambda \end{bmatrix} = [H_b : H_N]$$

$$\beta^T = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, N_1, N_2, \dots, N_n] = [\beta^T : N^T]$$

对于 m 个历元观测值有

$$\begin{bmatrix} DD(t_1) \\ \vdots \\ DD(t_i) \\ \vdots \\ DD(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H(t_1) \\ \vdots \\ H(t_i) \\ \vdots \\ H(t_m) \end{bmatrix} \cdot \beta \quad \text{或} \quad DD = H\beta \tag{4}$$

对方程组 (4) 可用最小二乘法求解基线矢量和整周模糊值

$$\hat{\beta} = (H^T W H)^{-1} H^T W DD \tag{5}$$

其协方差矩阵

$$Q = (H^T W H)^{-1} \tag{6}$$

式中 W 为双差载波相位观测值的权矩阵。设载波相位观测噪声方差为 σ^2 , 不考虑多径效应影响, 对于双差相位, 在某一历元时刻 t , 共有 n 组双差相位值, 则有下式成立

$$W(t) = [\text{cov}(DD)]^{-1} = \frac{1}{2\sigma^2} \frac{1}{n+1} \begin{bmatrix} n & -1 & -1 & \dots \\ -1 & n & -1 & \dots \\ -1 & -1 & n & \dots \\ \dots & \dots & \dots & n \end{bmatrix} \tag{7}$$

$\text{cov}[\cdot]$ 表示协方差矩阵。对于 $t_1 \sim t_m$ 历元, 双差相位值互不相关, 这时有

$$W(t_1, t_2, \dots, t_m) = \begin{bmatrix} W(t_1) & & & \\ & W(t_2) & & \\ & & \ddots & \\ & & & W(t_m) \end{bmatrix} \tag{8}$$

对于静态定位,在待定点观测一段时间,利用式(5)即可正确解算整周模糊值和基线矢量,且方差很小,精度很高,一旦初始化过程完成,整周模糊值得到正确解算,在以后每个历元即可利用当前历元观测值进行定位。在某些场合无法进行初始化工作时,可以首先确定整周模糊概略值及搜索空间,然后在动态过程中通过观测值的积累,进行统计检验,剔除错误的整周模糊值,确定出唯一正确的整周模糊值,从而达到精确定位的目的。

2 动态解算整周模糊值

2.1 整周模糊值搜索空间的确定

我们不必在待定点获取很多组历元观测值,仅在很短时间内获取几个历元的观测值,利用式(5)和式(6)可解算出初始整周模糊值及协方差矩阵。由于观测量很少,短时间内卫星与用户几何关系变化甚微,致使解算出的整周模糊值其方差较大,一般不为正确值。 N_i^0 记为对应于第*i*颗星的整周模糊概略值, $e(N_i^0)$ 为 N_i^0 的标准差,其值为 Q 矩阵中对应于 N_i^0 的对角线元素的平方根,并设可观测卫星数为 $n+1$ 颗,则共有 n 个双差整周模糊值参数,对于整周模糊值 N_i^0 的搜索范围可由如下定义

$$|N_i - N_i^0| \leq dN_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中

$$dN_i = R(0, 1)_{1-T_{12}} e(N_i^0) \quad (10)$$

$R(0, 1)_{1-T_{12}}$ 为置信度为 $1-T$ 的标准高斯正态分布的区间上限值,也即正确的整周模糊值有 $1-T$ 的概率落在式(9)区间内。设第*i*个整周模糊值 N_i 有 m_i 个搜索整数,则可供搜索的整周模糊向量共有

$$m = m_1 \cdots m_i \cdots m_n (\text{组}) \quad (11)$$

2.2 动态搜索整周模糊值

在确定整周模糊值搜索空间后,在后继的每一历元,把每一组整周模糊值作为已知,代入式(3)解算基线矢量 \hat{b} ,并得残差矢量

$$\epsilon = DD - \lambda N - H_b \hat{b} \quad (12)$$

再由式(5)可得

$$\epsilon = [I - H_b(H_b^T W H_b)^{-1} H_b^T W](DD - \lambda N) = P(DD - \lambda N) \quad (13)$$

假设测量误差为零均值高斯白噪声,对于正确的整周模糊值

$$E\{\epsilon\} = 0 \quad E\{\epsilon \epsilon^T\} = \text{cov}(\epsilon) = P^T \text{cov}(DD) P = R \quad (14)$$

对于不正确的整周模糊值

$$E\{\epsilon\} = \mu \quad E\{(\epsilon - \mu)(\epsilon - \mu)^T\} = R \quad (15)$$

令

$$\nu = \epsilon^T R^{-1} \epsilon \quad (16)$$

则 ν 可以作为选择正确整周模糊值的统计检验值,因为若选择正确的整周模糊值, ν 服从自由度为 $n-3$ 的 χ^2 分布,即 $\chi^2_{(n-3)}$ 分布,因此整周模糊值检验准则为

$$\begin{cases} \nu \geq T \text{ 或 } \nu/T \geq 1 & \text{该组整周模糊值不正确,舍弃} \\ \nu < T \text{ 或 } \nu/T < 1 & \text{该组整周模糊值保留,留待下一历元再检验} \end{cases} \quad (17)$$

门限 T 由 $\chi^2_{(n-3)}$ 分布的置信度确定。

按照上述检验准则剔除不合理的整周模糊值,随着卫星与用户几何关系的变化,可以搜索到唯一一组正确的整周模糊值。

极少数情况下,在搜索过程中由于偶然误差的影响,可能会剔除正确的整周模糊值,采用历元累积残差平方和检验可以更明显地区分正确的与错误的整周模糊值。譬如说,从 $t_0 \sim t_m$ 时刻,对第 j 组整周模糊值

$$\text{累积残差平方和 } S_j = \sum_{t=t_0}^{t_m} \epsilon_j(t)\epsilon_j^T(t) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

若
$$S = \min_j(S_j) \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

则表明第 k 组整周模糊值为正确值

3 实验情况

上述整周模糊值搜索算法需要进一步实验验证,由于采用载波相位双差处理,相位测量噪声假设为零均值高斯白噪声 $\sigma^2 = 100 \text{ mm}^2$ 接近于实际情况,模拟实验中假设取 5 颗卫星观测值,对于 24 颗卫星组成的 GPS 星座一般都能满足要求。参考站与动态站相距在 20 km 范围内,卫星轨道数据由星历表获取,取 2 个历元的观测数据,置信度取 99%,由式 (5)、(6)、(9)~(11) 可以确定出整周模糊值搜索范围,共约有 2×10^4 组整周模糊值

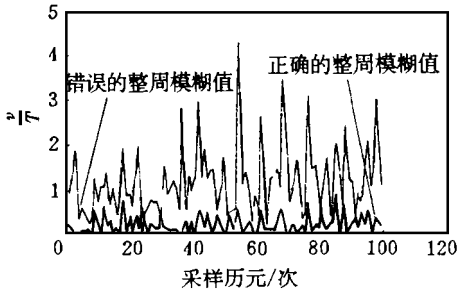


图 1 整周模糊统计检验

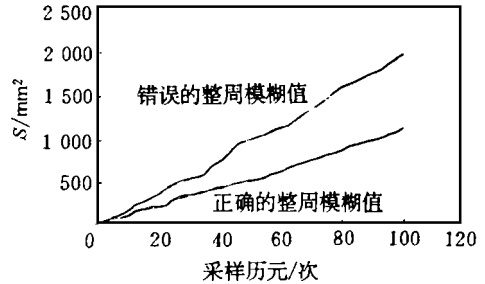


图 2 积累残差平方和 (5 颗可用星)

在之后的每一历元检验过程中,用式 (16) 作为检验值,按式 (17),不正确的整周模糊值由于超过门限而逐渐被剔除,最后得到一组唯一正确的整周模糊值,其检验值 v 见图 1。同时对每一组整周模糊值进行残差平方和积累,如图 2 所示。可见对于正确的与错误的整周模糊值其差别很明显,在动态过程中十几甚至几个历元即可确定正确的整周模糊值。从图 3 可看出,若增加可见卫星数,其效果更加明显,更易区分并确定正确的整周模糊值。

4 结束语

本文在 GPS 静态定位的基础上,从统计理论依据出发,试探性地讨论了一种适合于动态定位的解相位模糊的方法,模拟实验证明这是一种有效的方法。上述讨论中确定整周模糊值搜索范围仅仅利用了每个整周模糊值的方差信息,而没有利用整周模糊值之间的协方差信息。今后的工作将进一步缩小整周模糊值搜索范围,

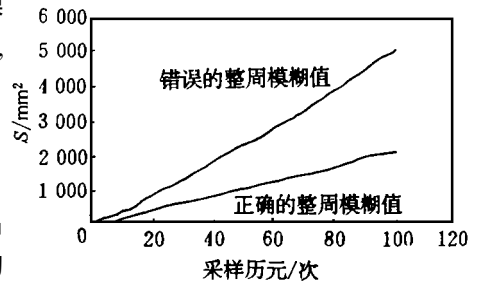


图 3 积累残差平方和 (7 颗可用星)

并与无模糊的伪距测量值相接合用相位平滑伪距的方法来达到实时定位导航的目的。

参 考 文 献

- 1 Hwang P Y C. Kinematic GPS resolving integer ambiguities on the fly. Proceedings of PLAN⁹ 90, IEEE Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, 1990, 20-23: 579- 586
- 2 Burgess Jon. Evaluation of GPS on-the-fly ambiguity resolution techniques. The Institute of Navigation Proceedings of the 48th Annual Meeting, AN A Westin Hotel, Washington DC, 1992: 409- 416
- 3 Abidin H Z. On the construction of the ambiguity searching space for on-the-fly ambiguity resolution. Navigation: Journal of the Institute of Navigation. 1993, (3): 321~ 337
- 4 Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J. Global positioning system theory and practice. New York: Springer-Verlag Wein, 1992

A Searching Algorithm for Phase Ambiguity Resolution in GPS Kinematic Positioning

Liao Xiangqian Huang Shunji

(Dept. of Electronic Eng., UEST of China Chengdu 610054)

Abstract This paper discusses a method of determining GPS carrier phase ambiguity in kinematic environments. Mathematical model is set up. After searching space is defined, all ambiguity combinations are tested with statistic check epoch by epoch until the only correct one is found. Simultaneously accumulated sum of squares of residuals of every ambiguity combination is calculated which can be used to distinguish the correct ambiguity set from the wrong sets easily. Finally simulations are performed which show this algorithm is effective.

Key words phase double difference; integer ambiguity; searching space; statistic test; accumulated sum of squares of residuals

编辑 徐培红

.....

。 科研成果介绍。

关于拓扑结构中的基础理论研究

主研人员: 孙世新 孙 宇 顾小丰

该成果由五篇论文组成,主要研究超立方体结构的有关性质以及超立方体中“全点到点”的拓扑结构的第一类和第二类优美嵌入问题和完全图的哈密优美编号。

提出了 n 维超立方体拓扑结构 Q_n 中通信传输路由长度互不相等的最大顶点子集中的顶点个数,并对某些 n , 求出了其中的最大顶点子集。这在计算机联网中有重要的应用价值,而且该成果还从理论上说明超立方体拓扑结构优于其他类型的拓扑结构。

该研究成果不仅有算法正确性的说明,且有具体执行的例子,是一项完整的、彻底的算法方面的成果。

该成果无论在理论上或应用前景上均具有明显的重要意义和价值。该课题所取得的成果,达到国际先进水平。

。 科 卞。