

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.018

一种改进的 GPS 模糊度空间搜索算法

黄张裕,刘胜男,陈苏娟

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了提高 GPS 动态定位的模糊度搜索效率,针对 LAMBDA 算法整数搜索的特点和实际应用效果,分析了影响搜索椭球体积尺度的取值方法,引入了空间选择性搜索的思想,研究了一种改进的 GPS 模糊度空间搜索算法,利用多维模拟数据和低维实测数据对该改进算法的搜索效率进行了检验,并利用 GPS 实测数据对该改进搜索算法求解模糊度的正确性和提高解算精度的有效的进行了验证.结果表明,采用改进搜索算法,不仅可以准确地求解模糊度和有效地提高解算精度,而且可以显著地提高搜索效率.

关键词:GPS;LAMBDA 算法;整数最小二乘估计;空间搜索算法;选择性搜索

中图分类号:P228.4 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2011)01-0089-06

LAMBDA 算法(least-squares ambiguity decorrelation adjustment)是目前实现 GPS 动态定位模糊度解算效果最好的方法之一,该算法的关键是模糊度去相关处理和模糊度整数搜索^[1].用最小二乘估计对模糊度最优解进行离散整数搜索时,原始模糊度之间的高度相关性会使得搜索空间扁长,模糊度条件方差之间的突变会导致搜索停滞,从而会大大降低搜索效率.利用 LAMBDA 算法进行去相关处理,会明显降低模糊度之间的相关性,同时也能消除模糊度条件方差之间的突变性,使搜索椭球的形状更接近于球体,从而可以减小搜索区间的长度,提高模糊度的搜索效率^[2-3].本文在分析 LAMBDA 算法实际应用效果的基础上,引入选择性搜索的思想,探讨了一种改进的 GPS 模糊度空间搜索算法,并验证了该算法求解 GPS 模糊度的快速性、准确性、稳定性和提高解算精度的有效性.

1 模糊度整数最小二乘搜索

1.1 序贯条件最小二乘估计

模糊度的整数最小二乘估计的目标函数为

$$\Omega(a) = \min_a (\hat{a} - a)^T Q_a^{-1} (\hat{a} - a) \quad (a_i \in \mathbf{Z}^n, i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: a ——模糊度; \hat{a} ——模糊度的无约束最小二乘估计; Q_a ——对应模糊度的方差-协方差矩阵.

实际应用中,模糊度最小二乘估计之间常常是高度相关的,并且 Q_a 远不是对角阵. LAMBDA 算法就是采用序贯条件最小二乘估计和乔累斯基(Cholesky)矩阵分解方法,将 Q_a 转换成对角阵.即首先对 Q_a 进行 $L^T DL$ 分解,然后通过求逆得到 Q_a^{-1} 的 LDL^T 形式,其中 L 为三角矩阵,从而使模糊度求解问题得到简化^[4].因此,模糊度的整数最小二乘估计的目标函数可以表示为

$$\Omega(a) = \min_{a_1, \dots, a_n \in \mathbf{Z}} \sum_{i=1}^n (\hat{a}_{i|I} - a_i)^2 / \sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2 \quad (I = i + 1, \dots, m) \quad (2)$$

式中: a_i ——第 i 个模糊度; $\hat{a}_{i|I}$ ——基于第 I 组模糊度的第 i 个模糊度最小二乘估计; $\sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2$ ——对应模糊度的方差.

1.2 模糊度搜索空间

由于存在 $a_i \in \mathbf{Z}^n$ 的整数约束条件,模糊度的整数最小化常通过离散搜索的方法来实现,利用式(2)来构

造一个 n 维的实数椭球区域 \mathbf{R}^n , 并在这个区域内进行搜索^[5]. 模糊度的椭球搜索空间定义为

$$\sum_{i=1}^n (\hat{a}_{i|I} - a_i)^2 / \sigma_{\hat{a}_{i|I}}^2 \leq c^2 \quad (I = i+1, \dots, n) \quad (3)$$

式中 c^2 为空间搜索尺度, 是设定的常数.

这个椭球区域以 $\hat{a}_i \in \mathbf{R}^n$ 为中心, 由于 $\mathbf{Q}_{\hat{a}}$ 控制着椭球的指向和扁率, 通过设定常数 c^2 (空间搜索尺度) 的取值可以控制搜索椭球的大小, 保证椭球区域内包含模糊度解算的整数最小二乘最优解.

1.3 模糊度搜索方法

通过矩阵分解, 在得到矩阵 $\mathbf{Q}_{\hat{a}}^{-1}$ 的 \mathbf{LDL}^T 形式的基础上, 模糊度的椭球搜索空间展开成

$$\sum_{i=1}^n d_{ii} \left[(a_i - \hat{a}_i) + \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j) \right]^2 \leq c^2 \quad (4)$$

式中 d_{ii} , l_{ji} 分别为相应矩阵 \mathbf{D} , \mathbf{L} 的元素.

为了得到每一个模糊度的搜索范围, 将式(4)变形得到 \hat{a}_i 的取值范围以及循环计算公式, 然后从最后一个元素 a_n 开始计算, 存在初始关系式 $(a_n - \hat{a}_n)^2 \leq c^2 / d_{nn}$, 再根据计算得到的 a_n 的整数值得来计算 a_{n-1} , 依此类推. 因此, 可以得到各个模糊度的取值区间

$$\hat{a}_i - \sqrt{c^2 / d_{ii}} - \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j) \leq a_i \leq \hat{a}_i + \sqrt{c^2 / d_{ii}} - \sum_{j=i+1}^n l_{ji} (a_j - \hat{a}_j) \quad (5)$$

在以上确定的搜索范围内, 按“从左至右”或“从小至大”的顺序进行直接搜索的, 依次计算模糊度区间的每个整数值, 直至搜索到一个完整的模糊度候选整数向量, 每一个模糊度对应的搜索区间内的有效整数都被搜索完为止^[6-7]. 序贯条件最小二乘估计从模糊度 a_n 开始到模糊度 a_1 结束的搜索计算是一个循环过程, 当对第 i 个模糊度进行序贯参数估计时, 根据条件估值, 模糊度的搜索区间可以重新写为

$$-\sqrt{c^2 / d_{ii}} \leq a_i - \hat{a}_{i|i+1, \dots, n} \leq \sqrt{c^2 / d_{ii}} \quad (6)$$

式中 $\hat{a}_{i|i+1, \dots, n}$ 为模糊度 a_i 的条件估值.

式(6)表明模糊度 a_i 的搜索区间以条件估值 $\hat{a}_{i|i+1, \dots, n}$ 为搜索中心. 因此, 可以预测距离此条件估值最近的整数 $\text{int}(\hat{a}_{i|i+1, \dots, n})$ 为模糊度 a_i 最可能的待求值.

2 改进的模糊度搜索算法

2.1 空间搜索尺度 c^2 的确定

搜索尺度 c^2 取值控制了搜索区域的大小, c^2 取值过大使得待搜索的椭球区域变大, 从而耗费计算时间, 降低模糊度求解效率; c^2 取值过小, 很有可能使得搜索区域不包含最优值. 因此, 合适的 c^2 取值既要保证最优值在搜索区域内又要保证搜索效率. 对于搜索椭球区域, 其椭球区域的体积公式为^[8]

$$E_n = c^n \sqrt{|\mathbf{Q}_{\hat{a}}|} V_n \quad (7)$$

式中 V_n 为体积函数, 满足

$$V_n = 2\pi^{\frac{n}{2}} \left[n\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \right]^{-1} \quad \Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (x > 0)$$

对于确定的模糊度方差-协方差矩阵, 有

$$|\mathbf{Q}_{\hat{a}}| = \prod_{i=1}^n \lambda_i = \prod_{i=1}^n \sigma_{\hat{a}_{i|i+1, \dots, n}}^2 \quad (8)$$

式中 λ_i —— $\mathbf{Q}_{\hat{a}}$ 的第 i 个特征值; $\sigma_{\hat{a}_{i|i+1, \dots, n}}^2$ —— 模糊度 a_i 条件估值的方差.

当由乔累斯基矩阵分解方法分解得到模糊度条件方差时, 很容易得到模糊度的搜索椭球体积 E_n , 由此得到 c^2 的表达式

$$c^2 = (E_n \mathcal{L} \sqrt{|\mathbf{Q}_{\hat{a}}|} V_n)^{\frac{2}{n}} \quad (9)$$

相关研究表明, 体积 E_n 的大小大致确定了椭球区域内所包含的候选值数量, 即 E_n 与候选模糊度个数 k 有近似关系 $k = \text{int} E_n$. 因此, 可以通过设定 k 的值来反求 c^2 的取值, 同时也可以搜索之前预先控制搜索椭球的尺度.

另一种 c^2 的取值方法是取实数解的最近整数值,通过式(3)的目标函数计算得到,即先由浮点解取最近整数,按式(3)求得 1 个二次型值,然后分别让其中 1 个模糊度取最近整数,其他模糊度取次接近整数,求得其他 n 个二次型值,这样共得到 $n+1$ 个二次型值.如果从这 $n+1$ 个值中选取其中次最小的值作为 c^2 ,这样确定的模糊度搜索椭球大小可保证 2 个以上的候选模糊度,同理,取第 i 个最小的二次型值可以保证搜索椭球内至少有 i 个候选模糊度.

在 LAMBDA 算法中, c^2 取值是按实际所期望得到的候选值个数大小来确定的,当候选值个数不大于 $n+1$ 时按第 2 种方法进行取值,当候选值个数大于 $n+1$ 时则需要按第 1 种方法来确定.

2.2 选择性搜索算法

c^2 的取值在模糊度搜索过程中控制着搜索区域的范围.常规的 LAMBDA 算法只是对搜索区间采用“从左至右”或“从小到大”的直接搜索法,在整个搜索过程中搜索椭球的体积一直保持不变.为了搜索到模糊度的最优整数最小二乘解,只要在搜索区域内发现 1 个候选整数向量 z ,则其相对应的目标函数值 $\Omega(a)$ 就作为新的 c^2 取值,这样缩小了搜索区域,可以显著改善搜索过程^[9-10].因此,为了提高模糊度搜索效率,在搜索过程中引入收缩搜索椭球体积的思想,改进模糊度搜索算法,进行有选择的搜索,同时将这种改进的搜索法与整数高斯去相关法相结合,形成改进的 LAMBDA 搜索算法.

具体实现过程是在第 i 个模糊度搜索阶段,按照距离 z_i^* “由近及远”的整数取值进行搜索.如果 $z_i \leq [z_i]$,则按序列 $[z_i], [z_i]-1, [z_i]+1, [z_i]-2, \dots$ 进行搜索,否则按序列 $[z_i], [z_i]+1, [z_i]-1, [z_i]+2, \dots$ 进行搜索.对于多个候选整数向量(假定需要得到 p 个候选向量),在初始时刻可以令 c^2 取值无穷大.很显然,利用上述距离远近的思想搜索得到的第 1 个候选向量 $z^{(1)}$ 为

$$z^{(1)} = ([z_1], [z_2], \dots, [z_n])^T \tag{10}$$

然后令 $z^{(1)}$ 的第 1 个元素值取次接近 z_1 的整数值,其余元素值都保持 $z^{(1)}$ 的值不变,得到第 2 个候选向量 $z^{(2)}$,第 3 个候选向量 $z^{(3)}$ 的第 1 个元素取第 3 接近 z_1 的整数值,其余元素与 $z^{(1)}$ 一致,这样就得到了 p 个候选向量 $z^{(1)}, z^{(2)}, \dots, z^{(p)}$.很显然,满足 $\Omega(z^{(1)}) \leq \Omega(z^{(2)}) \leq \dots \leq \Omega(z^{(p)})$.通过设置 $c^2 = \Omega(z^{(p)})$ 可以将椭球区域明显缩小,这种收缩方法较之常规 LAMBDA 搜索算法更容易设定 c^2 的值.而且当 $p=2$ 时,在通常情况下,这种收缩方法所确定的 c^2 值比常规 LAMBDA 算法所确定的 c^2 值还要小,因为经过置换之后的 d_{11} 比其他的 d_{ii} 要大,在整数 LDL^T 分解中对矩阵 Q_a 的对角线元素按照由大到小的顺序进行降序调整,增大了单次谱条件数下降的幅度,加快了模糊度的搜索过程.继续进行搜索一个新的候选向量,直到在第 1 个模糊度的搜索区间发现一个新的有效整数值.这样就用这个新的候选向量替代满足 $\Omega(z^{(j)}) = c^2$ 的 $z^{(j)}$ 向量,通过设置新的 c^2 值($c^2 = \max_{1 \leq i \leq p} \Omega(z^{(i)})$)将椭球体积进一步缩小,然后继续上述过程直到不能够再发现一个新的候选向量,最终得到 p 个最优整数最小二乘估计值.

3 计算分析

3.1 模拟计算分析

目前 GPS 实际应用大都是解决低维的模糊度解算问题,但是随着 GNSS 组合定位的发展,可用卫星增多,需要解决多维甚至高维的模糊度解算问题.为了比较改进的搜索法相对于常规搜索法的优势,采用 LAMBDA 整数高斯去相关法进行数值模拟计算.模拟 5~40 维(涵盖了低维到高维的分布)的情况,每种情况模拟 100 次,分别计算 2 种方法 100 次的平均搜索时间,比较两者的搜索解算效率^[11].所有的模拟计算都在 CPU 为 1 000 MHz,内存为 256 MB 的计算机上进行.模拟解算结果如图 1 所示.部分典型维数解算时间的比较见表 1.

从图 1 可以看出,改进的搜索算法相对 LAMBDA 搜索算法在搜索时间上都有了很大程度的减少,并且随着维数的提高,这种改善也越加明显.由去相关时间和搜索时间的长短(表 1)可以看出,搜索时间所占比例很大,高维情况下更加明显.这说明改进的搜索算法可提高

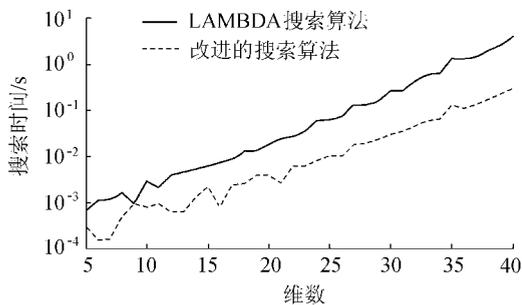


图 1 LAMBDA 搜索算法改进前后搜索时间比较
Fig. 1 Comparison of searching time between original and modified LAMBDA algorithms

解算速度,而且随着维数的提高,这种改进的搜索算法的搜索速度将与 LAMBDA 搜索算法的搜索速度呈 10 倍以上的关系.因此,改进的搜索算法较 LAMBDA 搜索算法可以显著地提高搜索效率,更有利于 GPS 的快速动态定位.

3.2 基线解算分析

利用 Thales Z-Max 型接收机对 1 条实验短基线(长度 200 m 左右)进行静态观测,采样率为 5 s,观测卫星数为 7 颗,观测历元数为 100

个,采用 L_1 载波相位观测值进行解算.设计的实验条件基本消除了环境因素的影响,误差主要为观测白噪声,故采用最小二乘法求得的浮点解应该是无偏的.同时用 GPS Solution 静态后处理商用软件对这 100 个历元的观测数据进行基线解算,解算结果作为参考值.

首先用常规最小二乘法求得该基线向量浮点解及其模糊度浮点解,然后利用整数高斯去相关法和改进的搜索算法求出模糊度整数解,最后利用求得的模糊度整数解计算出基线的固定解.为了反映这种方法快速解算的特点,对 2~20 历元的数据进行了计算,得到了基线浮点解、固定解以及对应的基线长度中误差,并与参考值进行了比较,如图 2 所示.表 2 仅列出部分结果进行量化比较.

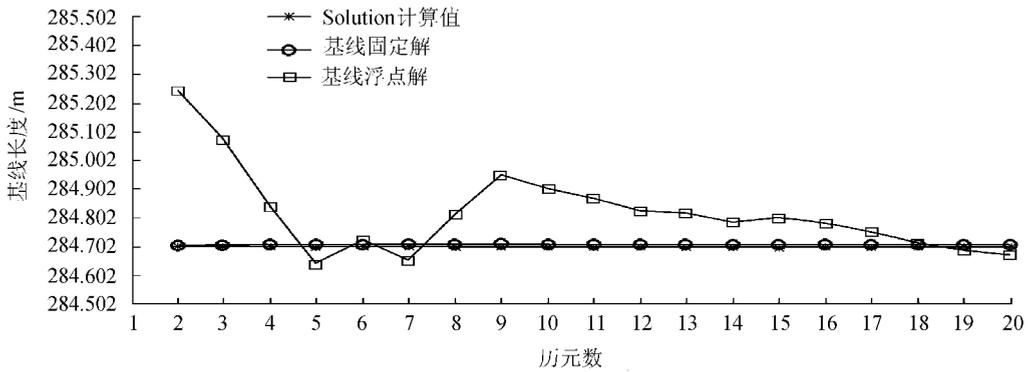


图 2 模糊度固定前后的基线解

Fig. 2 Baselines of ambiguity for float and fixed solutions

表 2 典型历元的基线浮点解、固定解及其中误差

Table 2 Float and fixed solutions and mean square errors of baselines

历元数	基线浮点解	基线浮点解中误差	基线固定解	基线固定解中误差	历元数	基线浮点解	基线浮点解中误差	基线固定解	基线固定解中误差
2	285.2479	0.6141	284.7070	0.0035	12	284.8279	0.0459	284.7091	0.0008
4	284.8440	0.2429	284.7084	0.0014	14	284.7878	0.0381	284.7097	0.0008
6	284.7262	0.1198	284.7089	0.0010	16	284.7873	0.0320	284.7099	0.0007
8	284.8151	0.0831	284.7084	0.0010	18	284.7152	0.0310	284.7096	0.0007
10	284.9043	0.0631	284.7087	0.0009	20	284.6727	0.0274	284.7092	0.0007

由图 2 可以看出,基线浮点解呈现不稳定的变化趋势,所有历元改进搜索算法的基线固定解与参考结果基本重合,而且在观测数据良好的情况下,改进搜索算法一般只需要 3 个历元的数据就可以正确固定模糊度,从而求得较高精度的基线解.从表 2 还可以看出,随着历元数的增加,基线浮点解的中误差虽然越来越小,整体上都为 dm 级和 cm 级,基线解与参考结果偏差较大,并且不够稳定,远不能满足基线求解精度要求,而基线固定解误差都小于 4 mm,随着历元数的增加,基线解及中误差越来越小且趋于稳定,说明改进的搜索算法只需要很少的历元就可以求得精度较高的基线固定解.

此外,也可以通过双差观测值的残差来验证整周模糊度解算的正确性.由基线向量和模糊度的固定解可得到卫星相对于参考星的双差观测值残差(非整数偏差),其值必须小于 0.5 周的载波相位,否则说明求得的双差整周模糊度是不正确的^[12].为了直观反映双差观测值残差的分布,以高度角最大的卫星(PRN16)为参考

星 利用改进的搜索算法分别计算 100 个历元数据内各颗卫星的双差观测值的残差 给出其余 6 颗卫星相对于基星(参考星)的双差观测值总残差图 如图 3 所示。

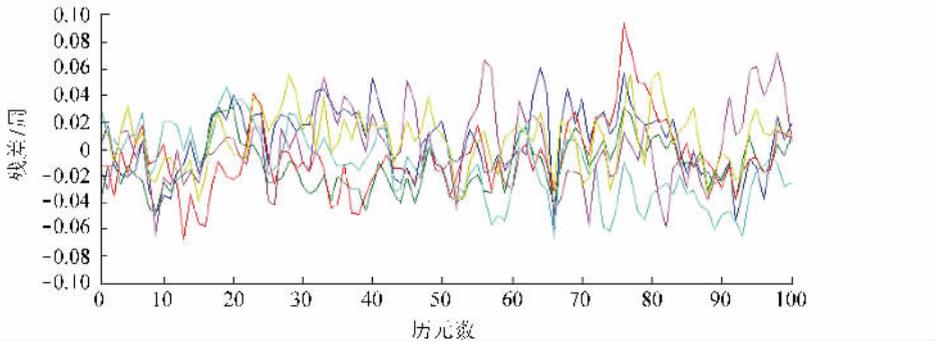


图 3 6 颗卫星改进搜索算法的双差观测值总残差

Fig. 3 Total double-residual errors of modified LAMBDA algorithm based on 6 satellites

从图 3 可以看出,所有卫星对应的双差观测值残差都小于 0.1 周,远满足小于 0.5 周的要求.这可以从残差角度说明改进搜索算法解算模糊度的正确性.

由以上基线求解精度和双差观测值残差的分析可知,改进的搜索算法只要用很少的历元就可以正确固定模糊度,求得精确的基线解,而且可以保证基线固定解的稳定性.因此,这种改进的搜索算法可以更好地解决动态模糊度求解问题,更好地应用于快速定位和动态定位领域.

4 结 语

GPS 动态定位的关键是整周模糊度的快速正确求解,基于序贯条件整数最小二乘法的 LAMBDA 搜索算法是目前求解模糊度整数解最为有效的算法之一,利用 LAMBDA 算法进行去相关处理,可以使模糊度相关程度明显降低,提高模糊度搜索效率.在用最小二乘估计对 GPS 模糊度最优解进行离散整数搜索时,原始模糊度之间存在的高度相关性会使得搜索空间扁长,模糊度条件方差之间存在的突变性会导致搜索停滞,大大降低搜索效率.本文基于 GPS 模糊度解算的实际应用,分析了影响 GPS 模糊度搜索椭球体积的 c^2 取值方法,通过引入选择性搜索思想,探讨了一种改进的模糊度空间搜索法,并利用数值模拟方法(模拟 5~40 维,涵盖了低维到高维的分布)验证了改进的搜索算法相对常规搜索算法可以显著提高搜索效率的可行性.利用实验基线求解,从基线解算精度和双差观测值残差分布 2 个方面验证了改进的搜索算法固定模糊度整数解的正确性和有效性.实验观测数据表明,改进的搜索算法不但可以用很少的历元正确固定模糊度,而且可以保证基线固定解的稳定性.因此,改进的搜索算法可以更好地应用于快速定位和动态定位领域.

参考文献:

- [1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 74-78.
- [2] 黄张裕, 陈苏娟. 一种改进的 GPS 模糊度白化滤波算法[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(1): 150-155. (HUANG Zhang-yu, CHEN Su-juan. Modified GPS ambiguity white-filtering algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 150-155. (in Chinese))
- [3] CHANG X W, YANG X, ZHOU T. A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(9): 552-565.
- [4] MOHAMED A H, SCHWARZ K P. A simple and economical algorithm for GPS ambiguity resolution on the fly using a white-filtering[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1998, 45(3): 221-231.
- [5] 陈树新, 王永生. 一种消除 GPS 模糊度相关性的新算法[J]. 航空学报, 2002, 23(6): 542-546. (CHEN Shu-xin, WANG Yong-sheng. New algorithm for GPS ambiguity decorrelation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2002, 23(6): 542-546. (in Chinese))
- [6] LIU L T, SU H T, ZHU Y Z et al. A new approach to GPS ambiguity decorrelation[J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(9): 478-490.
- [7] 陈树新, 王永生, 陆旭明. 白化处理对快速确定 GPS 整周模糊度算法的研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2001, 2(5): 14-17. (CHEN Shu-xin, WANG Yong-sheng, LU Xu-ming. A study of the fast GPS integer ambiguity resolution through whitening process[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2001, 2(5): 14-17. (in Chinese))
- [8] DE JONGE P, TIBERIUS C. The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects[J]. Journal of Geodesy, 1996,

70(12) 56-60.

- [9] LACHAPELLE G , CANNON M E , LU G . High-precision GPS navigation with emphasis on carrier-phase ambiguity resolution[J] . *Marine Geodesy* , 1992 , 15(4) : 253-269 .
- [10] TEUNISSEN P J G . The least-squares ambiguity decorrelation adjustment : a method for fast GPS integer ambiguity estimation[J] . *Journal of Geodesy* , 1995 , 70(1/2) : 65-82 .
- [11] XU P L . Random simulation and GPS decorrelation[J] . *Journal of Geodesy* , 2001 , 75(7/8) : 408-423 .
- [12] 林丹 , 郭敏 , 江华 , 等 . GPS 整周模糊度解算的 LAMBDA 法及程序实现[J] . *工程地球物理学报* , 2006 , 3(3) : 225-229 . (LIN Dan , GUO Min , JIANG Hua , et al . GPS LAMBDA method and its program realization[J] . *Chinese Journal of Engineering Geophysics* , 2006 , 3(3) : 225-229 . (in Chinese))

Modified space searching algorithm for GPS ambiguity

HUANG Zhang-yu , LIU Sheng-nan , CHEN Su-juan

(College of Earth Sciences and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : In order to improve the searching efficiency of integer ambiguity in GPS dynamic positioning , a modified space searching algorithm for GPS ambiguity was discussed considering the features and availability of the LAMBDA algorithm integer ambiguity searching . The method for affecting the volume of the searching ellipse was analyzed , and the space selective searching was introduced . Multi-dimensional simulation data and low-dimensional trial data were employed to verify the searching efficiency of the modified algorithm . The validity of solving the ambiguity and the effectiveness of improving the solving precision by the modified algorithm were verified by use of the observed GPS data . The results show that the modified algorithm can correctly solve the ambiguity and effectively raise the solving precision and evidently improve the searching efficiency .

Key words : GPS ; LAMBDA algorithm ; integer least-square estimation ; space searching algorithm ; selective searching

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244 , CN32-1439/TV , ISSN1006-7647 , 双月刊 , A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办 , 是全国中文核心期刊 , 中国科技核心期刊 , 全国水利系统优秀期刊 , 华东地区优秀期刊 , 江苏省优秀期刊 . 主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文 , 主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等 , 适合水科学、水工程、水资源、水环境领域的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读 .

本刊由邮局发行 , 邮发代号 28-244 , 2011 年每期定价 10 元 , 全年 6 期共计 60 元 . 可在全国各地邮局订阅 , 也可直接向编辑部订阅 .

编辑部地址 : 南京市西康路 1 号 《水利水电科技进展》编辑部

邮政编码 : 210098

电话/传真 : 025-83786335

E-mail : jz@hhu.edu.cn

http : //kkb.hhu.edu.cn/web/index_jz.asp ?l_id = 5