文章编号:1000-6893(2002)06-0542-05

一种消除 GPS 模糊度相关性的新算法

陈树新, 王永生
(西北工业大学 电子工程系, 陕西 西安 710072)

NEW ALGORITHM FOR GPS AMBIGUITY DECORRELATION

CHEN Shu-xin, WANG Yong-sheng
(Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

摘 要: 通过分析几种典型的整周模糊度去相关处理的方法,提出了一种简单快速消除 GPS 模糊度相关性的算法,介绍了算法中排序、整数 LDL^T 分解和模糊度筛选的处理过程,比较了该算法与其它算法性能上的差异,最后通过计算说明该算法的高效、可靠。

关键词: GPS;去相关处理;排序;整数 LDL^T 分解;模糊度筛选
中图分类号:V249　　**文献标识码**:A

Abstract: A simple and rapid algorithm for GPS ambiguity decorrelation is proposed by analyzing some typical algorithms for GPS ambiguity decorrelation. The ordering process, integer LDL^T factorization and ambiguity screen of the algorithm are introduced. The algorithm's performance is compared with that of others. In the end, the algorithm's high performance and reliability are demonstrated by calculation.

Key words: GPS; decorrelation process; ordering process; integer LDL^T factorization; ambiguity screen

GPS 技术的迅速发展,使得利用载波相位作为观测量,进行飞行器精密导航成为可能。但是,由于这些观测量存在未知的整周期数,因此观测量是模糊的,即存在所谓的周期模糊度(Ambiguity)。考虑到 GPS 动态测量的机动性和观测环境的复杂性,飞行器精密导航的关键技术之一就是载波相位整周模糊度的动态确定 AROF(Ambiguity Resolution On the Fly)。针对 AROF 技术的实施,国内外学者们提出了多种快速解算整周模糊度的算法,其中最具代表性的就是由 Teunissen 于 1993 年提出 LAMBDA (least-squares ambiguity decorrelation adjustment)算法,其方法是通过对模糊度整数估计,利用模糊度的整数特性,提高相对定位信息的估计精度。LAMBDA 算法包含 2 个不同的整数模糊度估计过程:模糊度去相关(Z 变换)处理和模糊度整数搜索,而 Z 变换处理的性能,直接影响模糊度整数搜索的速度和成败,因此 Teunissen 在此之后研究比较了多种 Z 变换的处理方法[1~3]。近年来,随着各种 GPS 动态测量应用需求的增加,大量简洁、快速的 Z 变换算法相继出现,其中 Liu 提出的联合去相关算法[4],Mohamed提出的白化滤波算法中的 Z 变换,也可以称为白化变换[5],对于飞行器精密导航具有极高的应用价值。

收稿日期:2001-10-29; **修订日期**:2002-06-13
基金项目:航空基础科学基金资助项目(98E53047)
文章网址:http://www.hkxb.net.cn/hkxb/2002/06/0542/

通过对 LAMBDA 算法简要介绍,说明了该算法中 Z 变换和模糊度整数搜索之间的关系,确定了 Z 变换的质量标准;分析了联合去相关算法和白化变换基本原理,指出这 2 种算法都存在出现病态 Z 变换的可能,基于上述情况,提出了一种排序筛选去相关算法 OSD (Ordering Screen Decorrelation),这种算法可以消除病态 Z 变换的出现,收敛速度的等效于白化变换算法,运算量接近白化滤波算法的 1/2。

1 LAMBDA 算法中的 Z 变换

在利用 GPS 载波相位作为观测量,进行飞行器精密导航定位时,考虑观测误差,其线性化双差观测方程可表示为

$$y = Aa + Bb + e \tag{1}$$

式中:y 是 GPS 给出的双差相位观测矢量;A 和 B 是相应的测量矩阵;a 是双差载波模糊度向量,单位是周期,由整数表示;b 矢量是飞行器精密导航定位信息;e 是观测噪声矢量。选择双差 GPS 相位作为观测矢量,可以消除接收机时钟误差、大气和星历误差等,但是数据间的双差处理过程使数据之间出现很大的相关性。另外将模型中未知参数分为两组,主要是为了适应 GPS 数据处理的

需要。

在标准最小二乘估计过程中,所有未知参数都应该为实数。但是,当某些参数被设定为整数时,最小二乘法就变为非标准形式。式(1)中由于被估计参数 a 要求为整数,因此参数的最小二乘估计实际上已经转变成为求解最小值问题

$$\min_{a,b} \| y - Aa - Bb \|^2,\ a \in \mathbf{Z}^n,\ b \in \mathbf{R}^p \quad (2)$$

求解式(2)最小值问题可以分 3 步实现[4]:

(1)忽略模糊度 a 的整数约束,这时求解最小值就可以认为是一个标准最小二乘估计问题,这个解通常被称为浮动解(Float solution),其估计值以及相关的协方差矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Q_{\hat{a}} & Q_{\hat{a}\hat{b}} \\ Q_{\hat{b}\hat{a}} & Q_{\hat{b}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(2)利用模糊度浮动解和它的协方差矩阵,计算模糊度整数解 $\check{a}$:

$$\min_{a} \left(\hat{a} - a \right)^{T} Q_{\hat{a}}^{-1} \left(\hat{a} - a \right),\ a \in \mathbf{Z}^n \quad (4)$$

(3)利用模糊度的整数特性,进一步提高精密导航信息的估计精度

$$\check{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} \left(\hat{a} - \check{a} \right)$$
$$Q_{\check{b}} = Q_{\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{a}} Q_{\hat{a}}^{-1} Q_{\hat{a}\hat{b}} \quad (5)$$

其中:$\check{b}$ 被称为导航信息的估计的固定解(Fixed solution),其对应协方差矩阵为 $Q_{\check{b}}$,可以看到,导航信息估计的固定解与浮动解比较精度有所改善,$\check{a}$ 为整周模糊度的固定解。

上述 3 步就是对式(1)求解最小值的过程,其中第 1 步和第 3 步通过具体表达式的计算直接获得,而第 2 步计算就没有统一的方法,实现起来相对困难一些,通常利用搜索的方法求解模糊度整数解,模糊度的搜索空间可以定义为

$$\left(\hat{a} - a \right)^{T} Q_{\hat{a}}^{-1} \left(\hat{a} - a \right) < \chi^2 \quad (6)$$

这是一个 n 维的椭球区域,椭球中包含有有限个整数格点,椭球的大小由被选择的正常数 χ^2 确定,形状由 $Q_{\hat{a}}$ 控制,式(4)的最小值求解等效于搜索 n 维椭球中所有合适的整数格点,因此需要合理选择 χ^2 的大小,以提高离散搜索效率与质量。在较短的观测时间内,双差模糊度之间有较强的相关性,主要体现在 $Q_{\hat{a}}$ 上。Teunissen 在文献[1]中指出:模糊度之间的高度相关将导致搜索椭球被拉得很长,同时也造成搜索椭球的主轴不平行于网格主轴,这种情况直接影响离散搜索效率与质量。为此 LAMBDA 方法提出了模糊度去相关处理:转换矩阵 Z 可表述为

$$z = Za;\quad \hat{z} = Z\hat{a}$$

$$\left(\hat{z} - z \right)^{T} Q_{\hat{z}}^{-1} \left(\hat{z} - z \right) < \chi^2 \quad (7)$$

$$Q_{\hat{z}} = Z Q_{\hat{a}} Z^{T} \quad (8)$$

这里 $Q_{\hat{z}}$ 表示转换后协方差矩阵,式(8)通常被称为 Z 变换。在 Z 变换之后,原来对式(6)的整数求解就变换为对式(7)的整数求解。

Z 变换的目的是为了获得尽量不相关的 $Q_{\hat{z}}$ 矩阵,使搜索椭球尽量接近于标准球体,主轴尽量平行于网格主轴,以提高离散搜索效率与质量。从几何意义上来讲,搜索椭球被拉长程度与协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的相关系数有关,而搜索椭球最大和最小轴之比的平方与协方差矩阵对角线上最大和最小元素之比有关,因此引入协方差矩阵的条件数和相关系数阵两种测量参数,来衡量 Z 变换处理的效果,其中协方差矩阵的条件数是指:协方差矩阵最大奇异值与最小奇异值之比,相关系数阵的定义与矩阵理论中的定义相同。

2　模糊度的去相关变换

Z 变换的目的就是确保模糊度整数估计(离散搜索)的有效性,完全的不相关将导致最有效的离散搜索。实际上完全的不相关几乎是不可能的,这主要是由于模糊度的整数特性对于 Z 变换的要求所造成的,文献[1]中已经证明:作为 Z 变换的转换矩阵必须满足以下 2 个条件:(1)转换矩阵 Z 中所有元素必须是整数;(2) $\mathrm{Det}(Z) = \pm 1$。满足上述 2 个条件的任何矩阵都可以选为模糊度转换矩阵。

LAMBDA 算法中的 Z 变换处理,就是交替选择上三角和下三角矩阵,进行多次整数高斯变换迭代,最终得到 Z 变换矩阵[2]。它具有较为完善的数学理论依据,但是处理分析过程较为复杂。

随着 GPS 精密导航和动态测量的逐步应用,大量简洁、快速的 Z 变换算法相继出现,联合去相关算法和白化变换算法就是比较有代表性的。

联合去相关算法将 Z 变换过程分为,浮动 Z 变换和取整 Z 变换。浮动 Z 变换又由“查找”和“分解”两步来完成的,具体实施过程如下[3]:

(1)浮动 Z 变换:首先令 $Q_0 = Q_{\hat{a}}$ 并查找出对角线上最小的元素 q_1,通过调整矩阵 L_1 将它放在第 1 行第 1 列,经过分解运算得到

$$Q_1 = K_1 (L_1 Q_0 L_1^{T}) K_1^{T} = (K_1 L_1) Q_0 (K_1 L_1)^{T} = \begin{pmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & X_1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

对于降维的矩阵 X_1 采取类似处理 Q_0 的方

法处理,得到进一步降维的矩阵 X_2 和对角元素 q_2,多次迭代后,最终将得到

$$Q_{(n-1)} = H_1 Q_0 H_1^T = \mathrm{diag}(q_1\ q_2\ \cdots\ q_n),$$
$$H_1 = K_{n-1} L_{n-1} \cdots\cdots K_2 L_2 K_1 L_1 \tag{10}$$

(2) 取整 Z 变换:对 H_i 矩阵按元素取整得到$[H_i]$,然后执行下式

$$Q_{\hat{a}} = [H_i] Q_0 [H_i]^T \tag{11}$$

令 $Q_0 = Q_{\hat{a}}$,再执行浮动 Z 变换和取整 Z 变换,如此迭代直到本次迭代得到的 $Q_{\hat{a}}$ 与上一次迭代得到的一样就停止迭代,这时得到的转换矩阵 Z 为

$$Z = [H_1][H_2]\cdots[H_k] \tag{12}$$

白化变换算法实际是利用矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的对称性和正定性对它进行 LDL^T 和 UDU^T 分解,考虑到 Z 变换矩阵必须满足的两个条件,对上三角矩阵和下三角矩阵进行整数约束,得到如下计算过程[2]

(1) 整数 LDL^T 分解:首先令 $Q = Q_{\hat{a}}$,对 Q 进行实数 LDL^T 分解,得到下三角矩阵 L 代入下式

$$Q_{\hat{a}} = [L]^{-1} Q [L^T]^{-1} \tag{13}$$

(2) 整数 UDU^T 分解:对矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 进行实数 UDU^T 分解, 得到上三角矩阵 U 代入下式

$$Q = [U]^{-1} Q_{\hat{a}} [U^T]^{-1} \tag{14}$$

重复执行整数 LDL^T 分解和整数 UDU^T 分解,直到矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 不发生变化为止,最终的转换矩阵 Z 为

$$Z = [L_1]^{-1}[U_1]^{-1}[L_2]^{-1} \cdot [U_2]^{-1}\cdots[L_k]^{-1}[U_k]^{-1} \tag{15}$$

3 排序筛选去相关算法(OSD)

为了利用 GPS 载波测量数据实现飞行器精密导航,需要在效率上和质量上确保 AROF,因此认真分析了上述几种 Z 变换处理过程,注意到它们均未讨论引起病态 Z 变换的可能。所谓病态 Z 变换是指:在 Z 变换处理过程中协方差矩阵对角线上的元素出现小于等于零的情况。对于对称和正定的 $Q_{\hat{a}}$ 而言,出现这种情况的原因在于:(1)转换矩阵 Z 的整数约束条件;(2)某些 GPS 载波测量数据误差太大。为此提出一种高效的、具有质量监测的 OSD 算法,它包括排序算法、整数 LDL^T 分解和模糊度筛选三部分。该算法目的是尽可能降低变换后矩阵的条件数和相关系数。

3.1 排序算法

OSD 算法的处理过程之一就是整数 LDL^T 分解,它是标准 LDL^T 分解的一个变形。根据矩阵理论可知,对称、正定矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的 LDL^T 分解是唯一的,即 $Q_{\hat{a}} = LDL^T$,矩阵 L 为下三角矩阵,元素可表示为 l_{ij}, $D = \mathrm{diag}(d_1,\ d_2,\ \cdots,\ d_n)$, d_1, d_2, $\cdots$, d_n 均大于零,具体计算公式如下

$$l_{ij} = \left(a_{ij} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} d_k l_{jk}\right) / d_j,\ j < i$$
$$d_i = \left(a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} d_k l_{ik}\right) \tag{16}$$

从上式可以看到, $\sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} d_k l_{ik}$ 表示多个正数求和,因此随着 i 的增加 $\sum_{k=1}^{i-1} l_{ik} d_k l_{ik}$ 将变大,也就是说随着 i 的增加,矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 对角线元素 a_{ii} 将减小更大的量才能得到 d_i。如果使矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 中较大(较小)的对角线元素对应较大(较小)的 i 值,来进行 LDL^T 分解,转换后矩阵 D 中对角线元素间的差距将减小,反之将加大矩阵 D 中对角线元素间的差距。为了提高离散搜索效率与质量,希望转换后矩阵 D 的条件数变小,也就是减小矩阵 D 中对角线元素间差距,因此有必要对 $Q_{\hat{a}}$ 重新排序后再进行 LDL^T 分解。排序的准则为:按 $Q_{\hat{a}}$ 对角线元素从小到大的顺序调整矩阵,调整后矩阵为 $Q_{\hat{s}}$,该矩阵对角元素满足 $as_{00} \le as_{11} \le \cdots\cdots \le as_{nn}$ 的规律,调整前后两矩阵之间的关系可以用下式来表示

$$Q_{\hat{s}} = S Q_{\hat{a}} S^T \tag{17}$$

式中:S 被称为调整矩阵。调整矩阵 S 的生成过程如下:(1)定义矩阵 S 为 $n \times n$ 维零矩阵;(2)对矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的对角线元素从小到大排列,如果原矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 中元素 a_{ii} 按从小到大排序排在第 j 位时,将令矩阵 S 中元素 $s_{ji} = 1$,按此方法计算矩阵 S 中其他元素,最终得到调整矩阵 S,下面举例说明

当 $Q_{\hat{a}} = \begin{pmatrix} 80.00 & 9.75 & 27.80 \\ 9.75 & 1.25 & 3.45 \\ 27.80 & 3.45 & 10.00 \end{pmatrix}$ 时

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix},\ Q_{\hat{s}} = \begin{pmatrix} 1.25 & 3.45 & 9.75 \\ 3.45 & 10.00 & 27.80 \\ 9.75 & 27.80 & 80.00 \end{pmatrix} \tag{18}$$

3.2 整数 LDL^T 分解

在进行整数 LDL^T 分解时,必须遵循转换矩

阵 Z 的约束条件(1)和条件(2),因此整数 LDL^T 分解可以分为两步进行,第 1 步是对于矩阵 $Q_{\hat{s}}$ 的实数 LDL^T 分解,可以表示为

$$Q_{\hat{s}} = SQ_{\hat{a}}S^T = LDL^T \tag{19}$$

由于 S 为调整矩阵,不会影响 Z 变换的约束条件(1)和条件(2)。在此之后可以进行整数 LDL^T 分解的第 2 步,即参考矩阵 $Q_{\hat{f}}$ 的求解

$$Q_{\hat{f}} = [L]^{-1}SQ_{\hat{a}}S^T[L] = ([L]^{-1}S)Q_{\hat{a}}([L]^{-1}S)^T \tag{20}$$

对参考矩阵 $Q_{\hat{f}}$ 重复进行整数 LDL^T 分解的第 1 步和第 2 步的运算,最终可以得到模糊度最大不相关协方差矩阵 $Q_{\hat{u}}$,它可表示为

$$Q_{\hat{u}} = ([L_k]^{-1}S_k)([L_{k-1}]^{-1}S_{k-1})\cdots([L_1]^{-1}S_1)Q_{\hat{a}} \cdot (([L_k]^{-1}S_k)([L_{k-1}]^{-1}S_{k-1})\cdots([L_1]^{-1}S_1))^T \tag{21}$$

其中:k 表示迭代执行的次数,至此获得了 Z 变换转移矩阵 Z

$$Z = ([L_k]^{-1}S_k)([L_{k-1}]^{-1}S_{k-1})\cdots\cdots([L_1]^{-1}S_1) \tag{22}$$

3.3　模糊度筛选

在上述几种 Z 变换处理过程中,均没有讨论 Z 变换整数约束条件以及测量数据质量对于 Z 变换成功执行的影响。本节将重点讨论这两个问题,并给出解决方案。

根据矩阵理论可知,对于对称、正定的模糊度估计协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 进行 LDL^T 分解,存在唯一的下三角矩阵 L 和对角矩阵 $D = \mathrm{diag}(d_1, d_2, \cdots, d_n)$,其中 $d_1, d_2, \cdots, d_n$ 均为大于零的实数。而在上述几种 Z 变换处理过程中,由于存在转换矩阵 Z 的整数约束条件,使得 LDL^T 分解不可能一次达到满意的结果,需要进行多次迭代,在迭代过程中又多次进行取整处理,因此引入较大的舍入误差。以白化变换算法为例,在进行式(13)和式(14)迭代过程中,由于取整舍入误差的引入,有可能造成在迭代过程中协方差矩阵出现非正定的情况,使分解出现病态。另外,较差的观测数据质量也是造成这种病态分解的原因之一。利用仿真产生的数据以及文献[3]提供的数据构造了 10 个协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$,进行白化变换算法处理,仅成功了 4 组,并且 6 维以上的矩阵白化处理全部失败,这充分的说明 Z 变换整数约束条件和观测数据质量对 Z 变换处理的影响,具体实验情况如表 1 所示。表 1 中的矩阵的维数是指协方差矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的维数,也就是整周模糊度估计的个数。

为了避免病态分解的出现,这里引入矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 分解预处理概念,也就是在进行排序算法和整数 LDL^T 分解时实时监测对角线元素的变化,当对角线元素均大于零并且不再发生变化时,就说明排序算法和整数 LDL^T 分解构造的处理未出现病态,所得到的结果就是 OSD 算法的结果;否则,当某一个对角线元素小于等于零时,这表明分解处理出现了病态,立即停止排序算法和整数 LDL^T 分解的迭代,记录下该元素在矩阵 $Q_{\hat{f}}$ 中出现的位置,利用排序矩阵 $S_1\ S_2 \cdots S_m$ 反推出矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 中对应的对角元素的位置,去除该行和该列的所有元素,构造出降维的矩阵,然后重新进行排序算法和整数 LDL^T 分解。直到得到最终结果。

表 1　采用白化处理得到的结果

Table 1　Results of the whitening transformation

测试序号	矩阵维数	变换前相关系数	变换后相关系数	迭代次数	分解情况
1	4	≥0.866	≤0.321	4	成功
2	4	≥0.912	≤0.236	4	成功
3	5	≥0.897	≤0.225	4	成功
4	5	≥0.798	≤0.189	5	成功
5	6	≥0.847	无法估算	4	失败
6	6	≥0.995	无法估算	5	失败
7	7	≥0.913	无法估算	4	失败
8	7	≥0.897	无法估算	2	失败
9	8	≥0.876	无法估算	6	失败
10	8	≥0.836	无法估算	3	失败

对于矩阵 $Q_{\hat{a}}$ 的降维处理,实际就是剔除双差观测量中某组观测数据。如果有 2 个 GPS 观测站同时观测$(n+1)$颗卫星,单频双差观测方程总数为 nn_t,这里 n_t 表示观测的历元数;由于存在未知位置信息的估计,因此待定参数总量为 $3n_t + n$,其中位置参数为 $3n_t$,整周模糊度参数为 n。为了使系统完全可观察,也就是得到确定的解,必须满足下列不等式

$$nn_t \geq 3n_t + n \text{ 或 } n_t \geq n/(n-3) \tag{23}$$

从式(23)可以看到,由于观测历元 n_t 的整数约束特性,n_t 只能取大于等于 2 的整数。如果要实现双差模糊度估计,同时观测卫星数目至少为 5 颗。当观测卫星数目为 5 个时,观测历元不得少于 4。目前在较为开阔的区域,GPS 接收机通常可以同时接收 7 到 9 颗的卫星信号,这使筛选双差观测数据成为可能。

4　实验与结论

由文献[5]提出的白化变换算法数据处理方

法简单,“乘加”运算次数较少,利于硬件实现,因此今后它有可能应用于飞行器精密导航的 AROF 中。为此,比较了 OSD 和白化变换算法。数据来源于仿真数据和文献[4]提供的协方差数据。仿真数据的产生过程如下:在 2000 年 6 月 10 日 07:48:30 利用 ASHTECH Z-XII3 型接收机接收多颗 GPS 卫星导航数据,进行各卫星轨道的估算,参考站位置定为(X = - 1718592.3910、Y = 4995226.4695、Z = 3563105.9815),设移动站的初始位置距参考站 X 方向 10 km,并以 10 m/s 的速度沿 X 方向运动,相位观测噪声设为零均值的高斯白噪声,方差为 100 mm^2,利用上述数据进行 Kalman 滤波,得到的仿真的协方差矩阵。利用这两类数据进行白化变换算法和 OSD 处理,可以得到表 2。

表 2 白化处理和 OSD 处理的结果

Table 2 Results of the whitening transformation and the OSD transformation

测试序号	矩阵维数	变换前相关系数	白化变换后相关系数	OSD 变换后相关系数	白化迭代次数	OSD 迭代次数
1	4	≥0.866	≤0.321	≤0.321	4	4
2	4	≥0.912	≤0.236	≤0.236	4	4
3	5	≥0.897	≤0.225	≤0.225	4	4
4	5	≥0.798	≤0.189	≤0.189	5	5

从表 2 可以看到:对于相同的矩阵 $Q_{\hat{a}}$,白化变换算法和 OSD 去相关效果相同,迭代次数也相同。但考虑到 OSD 每次迭代需要执行一次排序算法和一次整数 LDL^T 分解,而白化变换算法每次迭代需要执行一次整数 LDL^T 分解和一次整数 UDU^T 分解,两种算法计算量之比大约为 1∶1.8。

表 3 OSD 处理的结果

Table 3 Results of the OSD transformation

测试序号	变换前维数	变换前相关系数	变换后维数	变换后相关系数
5	6	≥0.847	5	≤0.361
6	6	≥0.995	5	≤0.336
7	7	≥0.913	6	≤0.355
8	7	≥0.897	6	≤0.389
9	8	≥0.876	7	≤0.245
10	8	≥0.836	7	≤0.364

对于表 1 中那些无法进行 Z 变换的协方差矩阵,经 OSD 中的模糊度筛选,降低了协方差矩阵的维数,成功地进行了分解,具体情况见表 3。

目前,模糊度 Z 变换处理已经广泛得到各国学者的重视,提出了各种各样的算法,其中经典的 LAMBDA 去相关算法,以及实用的联合去相关算法和白化变换算法已得到众多学者的认可。虽然,白化变换算法消除相关性并不十分彻底,但其处理过程简单高效。对比 OSD 和白化变换算法可以看到,对于白化变换可以分解的协方差矩阵,OSD 同样可以分解。利用排序算法可以提高了整数 LDL^T 分解的效率,而排序算法的基本原理实际就是对要进行分解的矩阵中元素位置进行调整,因此不牵扯“乘加”运算,这不仅减少了运算量,而且简化了数据处理方法,更加便于硬件实现。另外对于白化变换不可以分解的协方差矩阵,OSD 利用模糊度筛选方法,消除不利于协方差矩阵分解双差观测量,使协方差矩阵的维数降低,这时就有可能成功分解,因此可以预测 OSD 算法在飞行器精密导航等方面中 AROF 的应用前景广阔。

参 考 文 献

[1] Teunissen P J G. An analytical study of ambiguity decorrelation using dual-frequency code and carrier phase [J]. Journal of Geodesy, 1996, 70(10):515 - 528.

[2] Teunissen P J G, Jonge P J De. Performance of the lambda method for fast GPS ambiguity resolution [J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation, 1997, 44(3): 373 - 383.

[3] Teunissen P J G. An optimality property of the integer least-squares estimator [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(11):587 - 593.

[4] Liu L T. A new approach to GPS ambiguity decorrelation [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(10):478 - 490.

[5] Mohamed A H, Schwarz K P. A simple and economical algorithm for GPS ambiguity resolution on the fly using a whitening filter [J]. Navigation Journal of the Institute of Navigation, 1998, 45(3): 221 - 231.

作者简介:

陈树新(1965 -) 男,西安人,空军工程大学电讯工程学院副教授,硕士。1987 年毕业于国防科技大学电子技术系,获学士学位;1993 年毕业于西安电子科技大学电子工程专业,获硕士学位;1998 年至今在西北工业大学电子工程系攻读博士学位,主要从事通信、导航、测控系统的信息传输与信号处理方面研究。电子邮箱:chenshuxin6@sohu.com。

王永生(1942 -) 男,西安人,西北工业大学电子工程系教授,博士生导师。

(责任编辑:俞 敏)