

引文格式:卢立果. GNSS 整数最小二乘模糊度解算理论与方法研究[J]. 测绘学报, 2017, 46(9): 1204. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170416.
LU Liguo. Study on Theory and Method of GNSS Integer Least Squares Ambiguity Resolution[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(9): 1204. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170416.

GNSS 整数最小二乘模糊度解算理论与方法研究

卢立果
东华理工大学测绘工程学院, 江西 南昌 330013

Study on Theory and Method of GNSS Integer Least Squares Ambiguity Resolution

LU Liguo
East China University of Technology, Nanchang 330013, China

载波相位整周模糊度的快速和精确解算是 GNSS 实时高精度动态定位的关键问题,也是 GNSS 研究领域中年来的热点问题。只有载波相位模糊度准确固定,载波相位观测值才能转换为毫米级精度的距离观测值,进而实现高精度的导航定位。随着 GPS、GLONASS、BDS 和 GALILEO 四大系统逐步更新和建设,未来在轨卫星个数有望超过 100 颗,将大大提升卫星导航定位服务的精度、完备性、可靠性和可用性。而观测方程数的增多,不可避免地带来高维模糊度的解算问题。现有的模糊度估计和检验方法在高维模糊度解算时存在运算速度较慢和可靠性不高等缺陷。为此,本文围绕高维模糊度快速估计与检验等问题展开了研究,并在此基础上对定位定姿中基线长约束下的整数最小二乘模糊度解算问题进行了研究。

针对上述研究目标,本文的主要研究内容如下:

(1) 在 GNSS 定位的解算模型方面,概述了 GNSS 观测值的数学模型;推导了参数估计的显式表达式;理论上证明了增加观测方程数可以提高模糊度的解算精度,为高维模糊度具有较高的浮点解精度提供了理论支撑;从正交分解法、求导法和最小二乘法三个角度推导了混合整数最小二乘的二次型分解关系式,加深了对整数最小二乘模糊度解算理论的认识。

(2) 在高维模糊度格基规约方面,阐述了 LAMBDA 降相关算法和 LLL 规约算法整数变换的具体过程;理论上分析了影响规约性能的两个关键因素:长度规约和基向量交换,指出模糊度搜索效率取决于基向量交换,长度规约仅是用于实现更大程度的基向量交换;剖析了不同维数下模糊度精度与规约耗时和搜索耗时的内在关系,指出降低规约复杂度是提高高维模糊度解算效率的关键;基于上述模糊度规约解算特性的分析,提出了 3 种快速解算高维模糊度的规约算法:基于分块降维思想的 LLL 算法;基于部分长度规约和基向量贪心选择的 LLL 算法;基于整体最小基向量深插入的新规约算法;最后,提出了将基向量长度比作为合理衡量规约质量的评价指标。

(3) 在模糊度搜索方面,利用实测数据分析了 FP、SE、VB 和 SEVB 四种深度优先搜索算法;深入研究了椭球容积和对应的搜索空间内候选向量个数之间的关系,指出椭球容积和候选向量个数并不呈近似相等关系,二者之间存在一个随维数变化而变化的比例系数,并根据模糊度整数向量的离散特性,计算出了不同维数下的比

例系数表;针对 SEVB 在高维、低 Bootstrapping 成功率时,解算耗时较大的问题,通过设置初始空间和更改浮点解条件期望的求取方式改进了 SEVB 算法;分析了基于广度优先搜索的 k-best 算法不同 k 值的选取对估计解的影响,指出 k 值的增大不会显著改善估计解的全局最优性,但会降低解算效率。

(4) 在模糊度可靠性检验方面,介绍了三类整数估计方法,分析了模糊度浮点解和残差等参数的统计特性;重点阐述了基于孔径估计的 8 种检验方法:Ratio 检验(RTIA)、Difference 检验(DTIA)、Projector 检验(PTIA)、W 检验(WTIA)、Ellipsoidal 孔径估计(EIA)、Bootstrapping 孔径估计(IAB)、最小二乘孔径估计(IALS)和最优孔径估计(OIA)的原理及其二维孔径归整域的几何构造;基于固定失败率,比较了二维模糊度下 8 种孔径估计方法的模糊度固定性能;最后,给出了多维模糊度不同固定失败率下 RTIA、DTIA、WTIA 和 PTIA 的检验阈值,并建立了可供实时应用的阈值查询表。

(5) 在附有基线长约束的模糊度解算方面,介绍了强约束和加权约束模型下 CLAMBDA 解算的基本原理,并推导出基于强约束模型的基线分量解算公式;针对 CLAMBDA 初始搜索空间过大时,采用 BFS 搜索空间收缩缓慢,致使搜索耗时较大的问题,提出了自适应搜索空间的 ASS 算法。试验结果表明,CLAMBDA 在单频单元下可以显著提高模糊度的固定成功率,推导的强约束模型可以获得良好的解算效果,提出的 ASS 算法的解算效率相对于 BFS 算法大约可以提高 2 倍以上。

中图分类号: P228 **文献标识码:** D
文章编号: 1001-1595(2017)09-1204-01
基金项目: 国家自然科学基金(41204030)

收稿日期: 2017-07-19
作者简介: 卢立果(1989—),男,2017 年 6 月毕业于武汉大学,获工学博士学位(指导教师:魏二虎教授、刘万科副教授),研究方向为 GNSS 高维模糊度解算。
Author: LU Liguo (1989—), male, received his doctoral degree from Wuhan University on June 2017, majors in GNSS high-dimension ambiguity resolution.
E-mail: lglu66@163.com