



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目：固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法
作者：刘子奇, 臧欣蕊, 贾春, 李阳, 于宛灵
DOI: 10.13203/j.whugis20220572
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-06-28
引用格式: 刘子奇, 臧欣蕊, 贾春, 李阳, 于宛灵. 固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220572>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220572

引用格式：

刘子奇, 臧欣蕊, 贾春, 等. 固定基线约束的低成本GNSS测向方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220572 (LIU Ziqi, ZANG Xinrui, JIA Chun, et al. Low-cost GNSS Heading Determination with Fixed Baseline Constraints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220572)

固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法

刘子奇^{1,2}, 臧欣蕊¹, 贾春^{1,2}, 李阳¹, 于宛灵¹

1. 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001, 中国
2. 中国船舶航海保障技术实验室, 天津 300131, 中国

摘要：GNSS 测向是导航领域提供航向信息的重要手段。当前高性能 GNSS 测向产品精度可达 0.20 (°)/m, 满足多数应用领域的需求, 但其高昂的万元级成本阻碍了大众市场推广。而低成本 GNSS 接收机的观测量冗余度与质量均弱于高性能 GNSS 接收机, 导致其测向精度与可靠性易受复杂环境影响。为提升低成本 GNSS 测向性能, 本文提出固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法。该方法利用双天线间固定基线约束信息, 基于几何基线后验方差-协方差信息构建实时动态检验阈值, 可有效增加整周模糊度解算成功率, 从而提升低成本 GNSS 测向的精度与可靠性。通过实测动态数据对所提方法进行测试, 与传统方法对比, 整周模糊度固定成功率提升了 7%, 达到了 0.40 (°)/m 的测向精度。

关键词：低成本测向; GNSS 测向法; 基线约束; 整周模糊度解算

中图分类号: V249.3 文献标志码: A

Low-cost GNSS Heading Determination with Fixed Baseline Constraints

LIU Ziqi^{1,2} ZANG Xinrui¹ JIA Chun^{1,2} LI Yang¹ YU Wanling¹

1. School of Intelligent Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China
2. Laboratory of Science and Technology on Marine Navigation and Control, China State Shipbuilding Corporation, Tianjin 300131, China

Abstract: Objectives: Global Navigation Satellite System (GNSS) heading determination is an important technology in the field of navigation. At present, the accuracy of high-performance GNSS heading determination receivers can reach 0.20(°)/m, which can satisfy the requirements of most applications, but the cost of 10,000 yuan hinders the mass market promotion. However, the observation redundancy and quality of the low-cost GNSS receivers are weaker than those of the high-performance GNSS receiver, which makes the heading determination accuracy and reliability of the low-cost GNSS receiver vulnerable to complex environments. **Methods:** In order to improve the performance of low-cost GNSS heading determination, a low-cost GNSS heading determination method with fixed baseline constraints is proposed in this paper. The method deploys fixed baseline constraints between the dual

收稿日期: 2023-06-04

项目资助: 国家重点研发计划(No. 2021YFB3901300)、国家自然科学基金(No. 61773132、61633008、61803115、62003109)、工业和信息化部 145 项高技术船舶创新项目、黑龙江省杰出青年科研基金(No. YQ2020F009)、中央高校基本科研业务费专项资金(Nos. 3072022J00401、3072019CF0401、3072020CFT0403)资助。中国船舶航海保障技术实验室开放基金项目资助(No. 2022010103)

第一作者: 刘子奇, 本科, 研究方向为卫星导航与定位技术。Liuziqi010528@163.com

通信作者: 贾春, 讲师, 研究方向为卫星/多源精密定位及完好性监测技术。jiachun@hrbeu.edu.cn

antennas and constructs real-time dynamic detection thresholds based on a posteriori variance-covariance of geometric baseline, which can effectively increase the success rate of integer ambiguity resolution, thus improving the accuracy and reliability of low-cost GNSS heading determination. **Results:** The proposed method was tested with real kinematic data. Compared to the traditional methods, the success rate of the integer ambiguity resolution was improved by 7%, and the heading determination accuracy of 0.4 (°/m) was achieved. **Conclusions:** It is shown that the low-cost GNSS vectoring method with fixed baseline constraints proposed in this paper can effectively increase the success rate of whole-period ambiguity solution and improve the accuracy and reliability of low-cost GNSS vectoring.

Keywords: Low-cost heading determination; GNSS heading determination method; Baseline constraints; Integer ambiguity resolution

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 测向技术是提供航向信息的重要手段之一, 在海陆空天领域具有重要的实用价值^[1-3]。该方法通过在载体上安装已知固定基线的 GNSS 双天线, 通过动态差分定位技术获得厘米至毫米级精度的相对定位结果, 然后利用几何投影, 获得载体的精准航向角信息^[4-5]。

当前, 市场主流的 GNSS 测向设备, 如 Novatel OEM718D, Trimble BD982, 和芯星通 UB482 等, 加之双天线配置, 设备成本已达万元级以上, 限制了其在大众消费市场中普及推广, 因此 GNSS 测向设备研发方向逐步趋于低成本和小型化^[6]。在硬件层面上, 低成本 GNSS 接收机板卡在时钟精度、信号通道数、可用信号频率、信号处理精细程度等方面均弱于高性能 GNSS 接收机板卡^[7-8], 导致低成本 GNSS 接收机可用观测量较少, 观测量噪声较大, 尤其在城市等复杂环境下, 观测量质量更难以保障, 严重影响了 GNSS 测向精度与可靠性^[9]。因此在低成本 GNSS 硬件条件下, 通过升级与改进测向算法实现高精度与高可靠的低成本 GNSS 测向成为未来发展趋势^[10-12]。

针对 GNSS 测向方法的众多研究中, 区别于 GNSS 精密定位技术的优势在于存在已知固定基线作为约束^[13-15]。目前, 该方向的研究主要包含有: 方法 1 是将固定基线长度执行线性化处理, 然后构建与基线估计量相关函数方程, 从而作为虚拟观测量提升模型强度。但该方法需要天线间具有较大的基线距离, 否则线性化误差可能会引入模型误差, 反而会造成功能估计有偏, 弱化测向精度^[16-17]。通常情况下, 受到运载体安装限制, 双天线固定基线长度一般不会超过 10 m, 这使得该方法优势难以发挥效能; 方法 2 通过固

定基线长度约束信息作为对整周模糊度正确性检验的依据, 保障整周模糊度解算正确性, 从而间接保障测向精度与可靠性^{[13][18]}。但当前选用检验阈值常依赖于经验值, 使得该类方法难以较好地适用于动态应用场景; 方法 3 是利用已知固定基线长度约束信息, 重构最小代价函数, 调整整周模糊度搜索准则, 典型方法为附有基线长度约束的 LAMBDA 算法 (Constrained Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment, C-LAMBDA 算法)^[19]。该方法由于调整了搜索准则, 导致搜索复杂程度提升, 在设备算力有限且对实时性要求较高的情况下难以发挥作用^[20]。

综合对比上述方法, 利用已知固定基线长度评估整周模糊度正确性是最为简单且有效的保障 GNSS 测向精度与可靠性的方法, 但针对低成本 GNSS 接收机观测量质量较差、场景多变等干扰条件, 如何确定检验阈值成为本文研究的重点。基于此, 本文提出了一种固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法, 旨在低成本 GNSS 测向设备运行条件下取得较好的测向性能。本文首先介绍了所提算法的执行流程, 然后利用实测动态数据对所提方法进行测试分析, 通过与传统方法对比, 得出结论。

1 固定基线约束的低成本 GNSS 测向方法

1.1 双天线 GNSS 测向方法

双天线 GNSS 测向方法是在载体上安装已知固定基线的 GNSS 双天线, 然后通过动态差分定位技术获得厘米甚至毫米级精度的相对定位结果, 然后利用几何投影, 获得载体精准航向角信息。对于 GNSS 测向技术而言, 受到载体安装

限制, 双天线基线间距离一般在 10 m 以内, 天线间电离层与对流层延迟误差具有强相关特性, 通过观测量站间与星间双差操作, 能够有效消除电离层与对流层延迟误差^[21]。因此在动态差分定位模型构建中忽略了电离层与对流层延迟影响, 模型方程表示为:

$$E \begin{pmatrix} p \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Hb \\ Hb \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \Lambda z \end{pmatrix}, D \begin{pmatrix} p \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_{pp} & 0 \\ 0 & Q_{\phi\phi} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, $E(*)$ 表示随机变量的期望; $D(*)$ 表示随机变量的方差; p 与 ϕ 分别表示伪距与载波相位站间-星间双差观测量, 对应观测量方差-协方差分别表示为 Q_{pp} 与 $Q_{\phi\phi}$ 。 b 表示几何基线向量, 对应的设计矩阵为 H ; z 表示整周模糊度待估参数, 对应的设计矩阵为 Λ 。

基于式(1), 利用平差估计理论可以求解得到几何基线浮点解列向量 \hat{b} 与相应方差-协方差 $Q_{\hat{b}\hat{b}}$, 以及整周模糊度浮点解列向量 \hat{z} 与相应方差-协方差 $Q_{\hat{z}\hat{z}}$, 其中几何基线与整周模糊度间的方差-协方差为 $Q_{\hat{b}\hat{z}}$ 。

借助整周模糊度浮点解列向量 \hat{z} 与相应方差-协方差 $Q_{\hat{z}\hat{z}}$, 采用最小二乘模糊度去相关 (Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment, LAMBDA) 算法, 可以获得整周模糊度的固定解 \bar{z} 。如果整周模糊度固定正确, 通过贝叶斯后验理论, 可以得到厘米甚至毫米级精度几何基线解 \bar{b} 及相应的方差-协方差 $Q_{\bar{b}\bar{b}}$:

$$\bar{b} = \hat{b} - Q_{\hat{b}\hat{z}} Q_{\hat{z}\hat{z}}^{-1} (\hat{z} - \bar{z}) \quad (2)$$

$$Q_{\bar{b}\bar{b}} = Q_{\hat{b}\hat{b}} - Q_{\hat{b}\hat{z}} Q_{\hat{z}\hat{z}}^{-1} Q_{\hat{z}\hat{b}}^T \quad (3)$$

将上述求解的精准几何基线解 \bar{b} 投影到当地坐标系所得分量为 $[e, n, u]^T$, 根据几何投影理论, 可以得到航向角 $\varphi = \text{atan2}(e, n)$, 如图 1 所示。

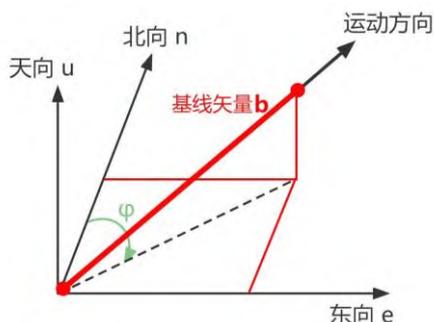


图 1 航向角解算示意图

Fig. 1 Diagram of Heading Determination

在低成本 GNSS 接收机观测量质量较差、动态场景多变等干扰条件下, 如何保障整周模糊度解算成功率是能否获得厘米甚至毫米级精度的几何基线的关键, 也是保障 GNSS 测向的基础。主流方法采用 LAMBDA 算法, 以模糊度残差方差最小为代价函数, 求解获得两组备选解, 分别为最优与次优备选解 \bar{z}_1 与 \bar{z}_2 , 然后通过最优与次优备选解差异性检验, 判定是否接受最优解作为最终的固定解^[22]。传统 LAMBDA 默认只将最优解作为判定对象, 如通过检验则接受最优解, 如未通过检验则判定固定失败。事实上, 由于低成本 GNSS 接收机观测量较差, 导致 LAMBDA 算法固定的最优解可能并不是正确解, 其正确解可能是其他备选解, 从而造成整周模糊度固定失败, 这在一定程度上破坏了 GNSS 测向的连续性。因此, 本文采取的有效策略如下:

依然采用 LAMBDA 算法实施整周模糊度备选解搜索, 但不同于传统方法仅确定最优与次优两组解, 而是按照整周模糊度残差二次型大小排序依次搜索出 n 组备选模糊度解 $\bar{z}_k, k \in [1, n]$ 组成备选集合, 其中 k 取值越小, 表明其整周模糊度残差二次型越小^[22]。这里 n 取值与观测量质量相关, 一般观测量质量高的场景, 不受观测噪声和偏差干扰, 整周模糊度残差二次型越小, 越可能是正确解, 所以 n 可以取较小值, 保障正确解能够包含在备选集合内。但随着观测量质量降低, 噪声或偏差干扰导致数据与模型一致性较差, 因此有必要适当增加 n 值, 确保正确解包含在备选集合中。然而, n 值取值过大可能会带来计算负担, 所以在实际情况下 n 值通常会在 5~100 范围内选择。在 n 组模糊度集合中包含有正确整周模糊度解的概率为:

$$P(a) = \sum_{k=1}^n P(a_k) \quad (4)$$

式中, $P(a_k)$ 表示 a_k 是正确整周模糊度的概率, 其中 a_k 为第 k 个备选解。由式(4)可知, 在更多备选解中确定固定解, 可以有效增加获得正确整周模糊度的概率。

尽管上述策略能够潜在提升获得正确整周模糊度的概率, 但提升 GNSS 测向精度与可靠性的基本保障在于如何在备选解集合中搜索出正确的备选解。针对该问题, 本文充分利用了已知固定基线约束信息, 构建了以下判定准则, 在备选解集合中选择最终的固定解:

$$\left| \sqrt{(\tilde{b}_k)^T \tilde{b}_k} - b_0 \right| \leq T_h \quad (5)$$

式中 $|*|$ 表示取绝对值; b_0 表示已知固定基线长度, T_h 为检验阈值; $\tilde{b}_k = \tilde{b} - Q_{\tilde{b}z} Q_{zz}^{-1} (\tilde{z} - \tilde{z}_k)$, 使 k 在 1 到 n 中从小到大进行搜索, 一旦满足式(5)要求, 则停止搜索, 将该备选解作为最终固定解, 参与修正几何基线。

对于检验阈值而言, 传统方法考虑到相位噪声一般为 3 mm, 根据 3σ 原则, 会将 $T_h=1$ cm 作为检验阈值^[14]。然而, 采用固定阈值将会难以适用于不同动态场景, 直接影响 GNSS 在实际环境中的测向精度与可靠性。为了能够适应于不同动态场景, 需要动态调整检验阈值, 本文根据式(2)描述的几何基线后验方差-协方差方程构建了动态调整的检验阈值为,

$$T_h = \text{sqr}t \left[\text{sum}(\text{diag}(Q_{bb})) \right] \quad (6)$$

式中 $\text{diag}(*)$ 求主对角线元素, $\text{sum}(*)$ 求所有元素和, $\text{sqr}t[*]$ 求平方根计算。根据式(6)可知, 该检验阈值实质会与不同观测量噪声、卫星几何构型、解算模型构建等因素相关。

综上, 面对固定基线长度约束信息作为整周模糊度正确性检验的传统方法, 针对检验阈值选择经验固定值难以适用于动态场景问题, 提出动态实时调整检验阈值构建方法, 有望有效提高测向方法的整周模糊度解算成功率, 改善低成本 GNSS 的测向精度与可靠性, 更好地满足低成本接收机双天线测向技术在实际中的应用需求。

2 实验验证与分析

为了验证所提方法性能, 本文采用两个 Ublox M8T 低成本接收机形成固定基线为 2.8 m 的双天线配置, 安装在皮划艇的两端, 其设备成本在百元级别, 以 5Hz 的采样率在英国苏塞克斯附近的海洋中进行实测采集 GPS 原始观测量, 截取时间长度约为 20 min, 共 6000 个历元, 其数据下载地址为 <http://rtkexplorer.com/>。测试时间段内卫星云图如图 2 所示。图 3 给出了测试中航向角的变化结果。由图 3 可知, 航向角变化过程中存在部分弧段的航向角阶跃变化情况, 其原因在于航向角变化范围为 $\pm 180^\circ$, 如超过该范围会强行通过加减 360°来调整到指定范围内。

因此, 图 3 中出现阶跃现象是由于临近 $\pm 180^\circ$, 出现航向角强行调整导致的。

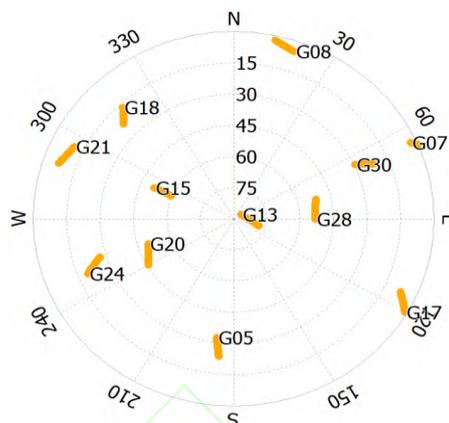


图 2 测试时间段卫星云图

Fig. 2 Satellite Sky in the Test

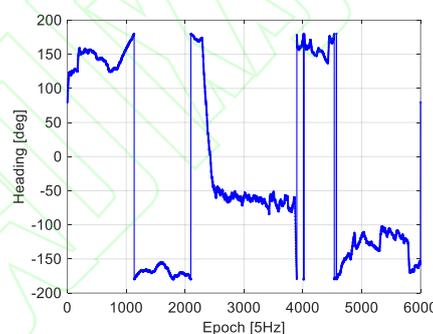


图 3 测试中航向变化值

Fig. 3 Heading Value in the Test

为了测试所提方法性能, 本文选用了两种传统方法作为对比。第 1 种是传统 LAMBDA 算法, 选择最优备选解(即整周模糊度方差残差最小对应的备选解)作为固定解, 该方法在文中标记为 LAMBDA 法。第 2 种是在传统 LAMBDA 法基础上, 引入已知固定基线长度约束准则, 来搜索备选解作为固定解。该方法会利用已知固定基线长度约束准则对备选解集进行初筛, 在满足基线长度约束的备选解集内寻找整周模糊度方差残差最小对应的备选解作为固定解。根据式(5)基线长度代价函数, 需要确定检验阈值, 传统策略考虑到相位观测量精度为 3 mm, 造成的基线估计量不超过 1 cm, 故采用 1 cm 作为经验固定检验阈值, 该方法在文中标记为 LAMBDA+LT。而本文所提方法在第 2 种方法的基础上实施改进, 考虑在确定检验阈值时采用经验固定值, 很难适应于实际的动态场景, 因此提出采用后验修正后的几何基线方差-协方差矩阵构建实时动态

检验阈值,从而保障检验阈值能够适应实时动态场景,所提方法在文中标记为 LAMBDA+LN。

上述 LAMBDA+LT 与 LAMBDA+LN 两种方法需要预先利用 LAMBDA 法建立备选解集,考虑到本测试使用的数据观测量质量较好,且提高计算效率的情况下,本测试设置的构建模糊度备选解集的数量 $n=5$ 。为了测试三种方法的测向性能,主要从整周模糊度固定成功率与测向精度两个角度进行综合分析,其测试数据的参考值来源于商业软件的事后处理结果。

图 4 给出了 LAMBDA 法的航向误差结果。由图可知,当整周模糊度固定成功,其航向精度可达到 1° 以内,但是整周模糊度一旦固定错误,其航向精度弱化严重,误差甚至达到 10° 以上。

图 5 给出了 LAMBDA+LT 的航向误差结果,对应的基线长度残差、检验阈值、以及整周模糊度固定的索引值等状态信息展示在图 6 中。需要注意的是,整周模糊度固定的备选索引值表明是在模糊度备选集合中,挑选出符合式(5)的最优整周模糊度备选解,将其作为固定解用于后续模型解算,其中红色星号表示为该固定解在整个备选集合中对应的索引值。对比图 4 与图 5, LAMBDA+LT 法的整周模糊度固定错误数量明显多于 LAMBDA 法,主要原因在于引入了已知固定基线约束准则,由于检验阈值选择过小,导致了原本正确的整周模糊度因无法通过已知固定基线约束准则而被剔除,从而造成了整周模糊度固定错误增多。由图 6 可知,受动态环境影响,观测量质量不一致会造成基线长度残差变化较大,如直接采用固定的检验阈值,将会造成大量超限,错误地选择其他备选解,导致较多的整周模糊度固定错误,影响航向定位精度。

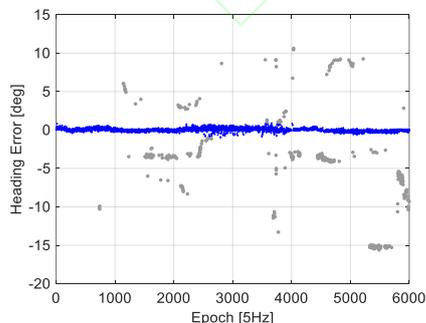


图 4 LAMBDA 法航向误差结果。蓝色: 整周模糊度固定正确; 灰色: 整周模糊度固定错误

Fig. 4 LAMBDA Method Heading Error Results.

Blue: Fix success of integer ambiguity; Gray: Fixed failure of integer ambiguity

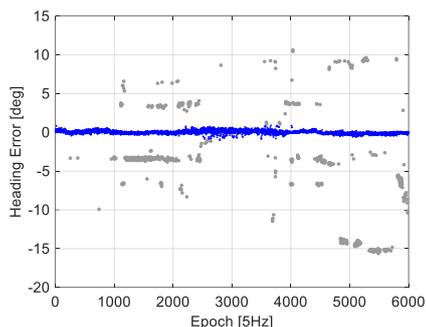


图 5 LAMBDA+LT 法航向误差结果。蓝色: 整周模糊度固定正确; 灰色: 整周模糊度固定错误

Fig. 5 LAMBDA+LT Method Heading Error Results.

Blue: Fix success of integer ambiguity; Gray: Fixed failure of integer ambiguity

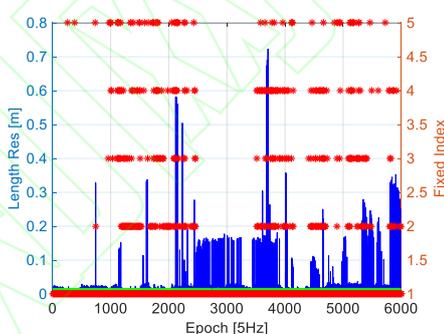


图 6 LAMBDA+LT 法的状态信息。左 Y 图: 蓝色为基线长度残差; 绿色为检验阈值; 右 Y 图: 红色星号为模糊度固定的备选索引值

Fig. 6 LAMBDA+LT Method Status Information. Left Y plot: blue for baseline length residuals and green for detection thresholds; Right Y plot: red star is the index value of fixed ambiguity

图 7 给出了 LAMBDA+LN 的航向误差结果,对应的基线长度残差、检验阈值、以及整周模糊度固定的索引值等状态信息展示在图 8 中。由于该方法采用了与模型相关的实时动态检验阈值构建策略,从而降低了动态环境对其的影响。对比图 5 与图 7 也可以看出,所提方法显著提升了整周模糊度固定成功率,较好地提升了测向精度。由图 8 可知,由于引入了几何固定基线约束准则,使得模型并不只关注于第 1 组备选解,而是在其他备选解中搜索既能满足几何固定基线约束准则,又能具有较小的整周模糊度残差二次型的解,从而搜索得到正确的备选解。由图 8 中模糊度固定的备选索引值结果可知,正确的

整周模糊度解并不是第 1 组整周模糊度残差二次型最小的最优解,而是其他备选解,这也是该方法能够较传统 LAMBDA 法提升整周模糊度解算成功率的关键,因为传统 LAMBDA 法只认可最优解,如未通过检验,则判定整周模糊度解算失败。但由图 8 可知,该阈值变化幅值变化较小,其主要原因在于测试过程中可利用的数据长度较短,观测量噪声、卫星几何构型等因素变化较小导致的。由于检验阈值是随式(6)实时计算的,并未通过经验值给定,仍可以表现出更好的适用性,一定程度上也能反映该方法性能优于 LAMBDA+LT 方法。

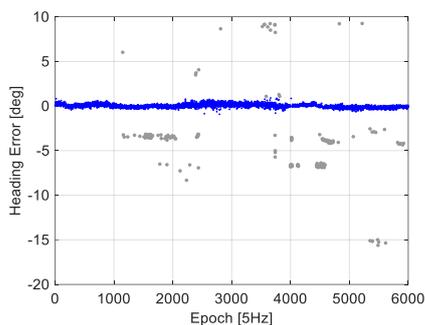


图 7 LAMBDA+LN 法航向误差结果。蓝色: 整周模糊度固定正确; 灰色: 整周模糊度固定错误

Fig. 7 LAMBDA+LN Method Heading Error Results. Blue: Fix success of integer ambiguity; Gray: Fixed failure of integer ambiguity

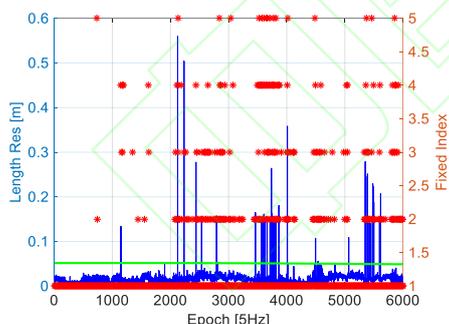


图 8 LAMBDA+LN 法状态信息。左 Y 图: 蓝色为基线长度残差; 绿色为检验阈值; 右 Y 图: 红色星号为模糊度固定的备选索引值

Fig. 8 LAMBDA+LN Method Status Information. Left Y plot: blue for baseline length residuals and green for detection thresholds; Right Y plot: red star is the index value of fixed ambiguity

表 1 中给出了三种不同方法在整周模糊度固定成功率、整周模糊度固定失败率、全部整周模糊度固定正确历元对应的测向误差统计结果,

其中该误差已通过已知基线长度折算到单位为 ($^{\circ}$ /m) 的结果。

表 1 不同方法测试结果

算法	$P_{suc}(\%)$	$P_{fail}(\%)$	Err ($^{\circ}$ /m)
LAMBDA	92.0	8.0%	0.44
LAMBDA+LT	88.1	11.9%	0.42
LAMBDA+LN	95.5	4.5%	0.40

对比整周模糊度固定成功率, LAMBDA+LN 法最高, 相比于 LAMBDA 法提升了 3%, 表明采用已知固定基线约束准则能够有效提升整周模糊度固定成功率, 而提升整周模糊度固定成功率带来的优势在于测向结果也得到了同步提升。所提方法相比于 LAMBDA+LT 法整周模糊度固定成功率提升了 7%, 表明在采用已知固定基线约束准则方法时, 选择最佳的检验阈值是影响测向性能的关键, 如选取不当, 甚至会带来负面影响, 其整周模糊度固定成功率不及传统 LAMBDA 法, 降低了 4%。从全部整周模糊度固定正确历元误差统计结果来看, 三者测向精度是相当的, 其中 LAMBDA+LN 精度略高。该结果表明, 在整周模糊度固定正确后, 其高精度相位观测量精度得以恢复, 三者方法表现的测向性能是一致的。从结果中可以看出, 提升整周模糊度固定成功率是提升测向性能的关键。结果中也展示了所提方法在整周模糊度固定成功率上具有最好的测试性能。

3 结论

为在大众市场推广 GNSS 测向技术, 本文以低成本 GNSS 接收机硬件为研发平台, 以保障 GNSS 测向精度与可靠性为目标, 借助已知固定基线长度约束信息, 通过利用几何基线后验方差-协方差信息构建实时动态检验阈值, 有效增加了整周模糊度解算成功率, 从而提升了低成本 GNSS 测向的精度与可靠性。通过采用双天线低成本 GNSS 接收机在实际场景中采集 GPS 单频数据, 对所提算法进行了综合测试。通过与传统方法的对比可知: 与传统 LAMBDA 方法相比, 因不限于仅判定最优解是否为固定正确解, 而是扩展搜索范围为整个备选解集, 因此表现出具有更好的整周模糊度固定成功率, 比传统方法提升了 3%; 与传统 LAMBDA+LT 方法相比, 由于检验阈值构建会随模型实时动态调整, 避免了传

统因选择经验固定值而对动态场景适应性差的弊端,其整周模糊度固定成功率较传统方法提升了7%;通过动态场景实测验证,所提方法的测向精度达到了0.40(°)/m。由于低成本GNSS接收机观测量质量较低的影响,相较于高性能GNSS测向接收机的0.20(°)/m还存在精度差距,但已满足较多低成本导航市场的应用需求,具有较大实用价值。

参 考 文 献

- [1] Sun R, Cheng Q, Wang J. Precise Vehicle Dynamic Heading and Pitch Angle Estimation Using Time-differenced Measurements from a Single GNSS Antenna[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3):1-9
- [2] Cai Xiaobo, Xu Houze, Wang Yong, et al. Direct Attitude Determination Method Based on Vehicle-mounted Three-antenna GNSS and the Accuracy Evaluation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(6):820-825(蔡小波, 许厚泽, 王勇, 等. 车载三天线GNSS的直接法定姿及精度评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(6): 820-825)
- [3] Ding W, Sun W, Gao Y, et al. Carrier Phase-Based Precise Heading and Pitch Estimation Using a Low-Cost GNSS Receiver[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(18):3642
- [4] Teunissen P, Giorgi G, Buist P. Testing of a New Single-frequency GNSS Carrier Phase Attitude Determination Method: Land, Ship, and Aircraft Experiments[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(1):15-28
- [5] Li N, Zhao L, Li L, et al. Integrity Monitoring of High-accuracy GNSS-based Attitude Determination[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4):1-3
- [6] Wang X, Yao Y, Xu C, et al. An Improved Single-epoch Attitude Determination Method for Low-cost Single-frequency GNSS Receivers[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(14):2746
- [7] Odolinski R, Teunissen P. Single-frequency, Dual-GNSS Versus Dual-frequency, Single-GNSS: a Low-cost and High-grade Receivers GPS-BDS RTK Analysis[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11):1255-1278
- [8] Lachapelle G, Gratton P. GNSS Precise Point Positioning with Android Smartphones and Comparison with High Performance Receivers[C]// Proc. of the 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). Chongqing, China: IEEE, 2019 :1-9.
- [9] Zhang Xiaohong, Tao Xianlu, Wang Yingzhe, et al. MEMS-Enhanced Smartphone GNSS High-Precision Positioning for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1740-1749(张小红, 陶贤露, 王颖喆, 等. 城市场景智能手机GNSS/MEMS融合车载高精度定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(10): 1740-1749)
- [10] Yang Y, Mao X, Tian W. A Novel Method for Low-cost MIMU Aiding GNSS Attitude Determination[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(7):075003
- [11] Rychlicki M, Kasprzyk Z, Rosiński A. Analysis of Accuracy and Reliability of Different Types of GPS Receivers[J]. *Sensors*, 2020, 20(22):1-14
- [12] Zhu F, Hu Z, Liu W, et al. Dual-antenna GNSS Integrated with MEMS for Reliable and Continuous Attitude Determination in Challenged Environments[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(9):3449-3461
- [13] Tang Weiming, Sun Hongxing, Liu Jingnan. Ambiguity Resolution of Single Epoch Single Frequency Data with Baseline Length Constraint Using LAMBDA Algorithm[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(5): 444-446(唐卫明, 孙红星, 刘经南. 附有基线长度约束的单频数据单历元LAMBDA方法整周模糊度确定[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(5): 444-446)
- [14] Ma L, Lu L, Zhu F, et al. Baseline length

- Constraint Approaches for Enhancing GNSS Ambiguity Resolution: Comparative Study[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2):1-5
- [15] Wu S, Zhao X, Zhang L, et al. Improving Reliability and Efficiency of RTK Ambiguity Resolution with Reference Antenna Array: BDS+ GPS Analysis and Test [J]. *Journal of Geodesy*. 2019, 93(9): 1297-1311
- [16] Tang Jiaming, Chai Yanju, Wen Debao, et al. Algorithm of Simultaneous Ambiguity Resolution of GNSS Multi-Antenna Network for Single Epoch[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(03):262-268(汤佳明, 柴艳菊, 闻德保, 等. GNSS 多天线基线网单历元模糊度同步解算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(03):262-268)
- [17] Nie Zhixi, Wang Zhenjie, Ou Jikun, et al. On the Effect of Linearization and Approximation of Nonlinear Baseline Length Constraint for Ambiguity Resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2):168-173(聂志喜, 王振杰, 欧吉坤, 等. 非线性基线长约束条件线性化近似对模糊度解算的影响[J]. 测绘学报, 2015, 44(02):168-173)
- [18] Li Y, Zhao L, Jia C, et al. Low-Cost Dual-Antenna GNSS Precision Heading Determination Method with Baseline Length Constraint[C]//Proc. of the China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021) Proceedings. Nanchang, China: Springer, 2021: 389-402
- [19] Teunissen P. The LAMBDA Method for the GNSS Compass[J]. *Artificial Satellites*, 2006, 41(3):89-103
- [20] Zhou Xiaoqing, Shan Hongyi, Lu Liguang, et al. Performance Comparison Between Two Baseline Length Constraint Methods of Ambiguity Resolution[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2016, 41(6):53-58(周晓青, 单弘煜, 卢立果, 等. 附有长度约束的模糊度解算方法比较[J]. 测绘科学, 2016, 41(6): 53-8.)
- [21] Jia Chun, Zhao Lin, Li Liang, et al. BDS Triple-frequency Tightly Coupled Short-baseline RTK Method by Calibrating the Between-receiver Inter-frequency Biases [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2020, 50(1): 90-103(贾春, 赵琳, 李亮, 等. 改正接收机频间偏差的短基线北斗三频紧组合 RTK 方法 [J]. 中国科学: 地球科学. 2020, 50(1): 90-103)
- [22] Liu Jingnan, Deng Chenlong, Tang Weiming. Review of GNSS Ambiguity Validation Theory[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1009-1016 (刘经南, 邓辰龙, 唐卫明. GNSS 整周模糊度确认理论方法研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(9): 1009-1016)

网络首发:

标题: 固定基线约束的低成本GNSS测向方法

作者: 刘子奇, 臧欣蕊, 贾春, 李阳, 于宛灵

DOI: 10.13203/j.whugis20220572

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

刘子奇, 臧欣蕊, 贾春, 等. 固定基线约束的低成本GNSS测向方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220572 (LIU Ziqi, ZANG Xinrui, JIA Chun, et al. Low-cost GNSS Heading

Determination with Fixed Baseline Constraints[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220572)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

附加浮标基线约束的GNSS/A定位联合平差方法研究

张世美, 王振杰, 孙振, 聂志喜, 李伟嘉

武汉大学学报（信息科学版），2023-04-07 13:11, doi: 10.13203/j.whugig20220190

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220190>

