



基于PSO与AFSA的GNSS整周模糊度种群融合优化算法

郭迎庆 詹洋 张琰 王译那 徐赵东 李今保

Population fusion optimization algorithm for GNSS integer ambiguity resolution based on PSO and AFSA

GUO Yingqing, ZHAN Yang, ZHANG Yan, WANG Yina, XU Zhaodong, LI Jinbao

引用本文:

郭迎庆, 詹洋, 张琰, 王译那, 徐赵东, 李今保. 基于PSO与AFSA的GNSS整周模糊度种群融合优化算法[J]. 北科大: 工程科学学报, 2024, 46(12): 2246–2256. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.02.23.004

GUO Yingqing, ZHAN Yang, ZHANG Yan, WANG Yina, XU Zhaodong, LI Jinbao. Population fusion optimization algorithm for GNSS integer ambiguity resolution based on PSO and AFSA[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2024, 46(12): 2246–2256. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.02.23.004

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.02.23.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多目标粒子群优化算法研究综述

Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm

工程科学学报. 2021, 43(6): 745 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.31.001>

基于粒子群算法的转炉用氧节能优化调度

Optimal scheduling of converter oxygen based on particle swarm optimization

工程科学学报. 2021, 43(2): 279 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.02.002>

基于群体智能优化的MKL-SVM算法及肺结节识别

MKL-SVM algorithm for pulmonary nodule recognition based on swarm intelligence optimization

工程科学学报. 2021, 43(9): 1157 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.01.14.004>

面向全局和工程优化问题的混合进化JAYA算法

Hybrid evolutionary JAYA algorithm for global and engineering optimization problems

工程科学学报. 2023, 45(3): 431 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.10.27.002>

一种面向多模态优化的新型群体智能优化方法: 羊群迁徙优化算法

Novel swarm intelligence method for multimodal optimization: Sheep flock migrate optimization algorithm

工程科学学报. 2023, 45(12): 2070 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.05.23.001>

基于多目标粒子群优化的污水处理系统自适应评判控制

Adaptive critic control for wastewater treatment systems based on multiobjective particle swarm optimization

工程科学学报. 2024, 46(5): 908 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.15.001>

基于 PSO 与 AFSA 的 GNSS 整周模糊度种群融合优化算法

郭迎庆¹✉, 詹洋¹, 张琰¹, 王译那¹, 徐赵东², 李今保³

1) 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037 2) 东南大学中国-巴基斯坦重大基础设施智慧防灾“一带一路”联合实验室, 南京 211189 3) 江苏东南特种技术工程有限公司, 南京 210008

✉通信作者, E-mail: gyingqing@njfu.edu.cn

摘要 载波相位测量是实现全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system, GNSS) 快速高精度定位的重要途径, 而准确解算整周模糊度是其中的关键步骤之一。粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 收敛速度快但易陷入局部最优, 人工鱼群算法 (Artificial fish swarm algorithm, AFSA) 全局优化性能好但收敛速度慢, 因此融合两种算法的优点, 提出一种 GNSS 整周模糊度种群融合优化算法 (PSOAF)。首先, 通过载波相位双差方程求解整周模糊度的浮点解和对应的协方差矩阵。然后, 采用反整数 Cholesky 算法对模糊度浮点解作降相关处理。其次, 针对整数最小二乘估计的不足通过优化适应度函数来提高算法的收敛性和搜索性能。最后, 通过 PSOAF 算法对整周模糊度进行解算。通过经典算例和试验研究表明: PSOAF 算法可以更快地收敛于最优解, 搜索效率也更为出色, 解算的基线精度可以控制在 10 mm 以内, 在短基线的实际情况下具有较高的应用价值。

关键词 全球导航卫星系统 (GNSS); 整周模糊度; 粒子群算法; 人工鱼群算法; 融合算法

分类号 P288.4

Population fusion optimization algorithm for GNSS integer ambiguity resolution based on PSO and AFSA

GUO Yingqing¹✉, ZHAN Yang¹, ZHANG Yan¹, WANG Yina¹, XU Zhaodong², LI Jinbao³

1) College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2) China-Pakistan Belt and Road Joint Laboratory on Smart Disaster Prevention of Major Infrastructures, Southeast University, Nanjing 211189, China

3) Jiangsu Southeast Special Engineering & Technology Co., Ltd., Nanjing 210008, China

✉Corresponding author, E-mail: gyingqing@njfu.edu.cn

ABSTRACT Carrier phase measurement plays a crucial role in achieving rapid and high-precision positioning within a global navigation satellite system (Global navigation satellite system, GNSS). A pivotal aspect of this process is the accurate resolution of the integer ambiguity. Although the particle swarm optimization algorithm (Particle swarm optimization, PSO) demonstrates quick convergence, it tends to become trapped in local optima, showing a relatively weak ability to fix ambiguity. Conversely, the artificial fish school algorithm (Artificial fish swarm algorithm, AFSA) excels the global optimization performance. However, its natural selection mode, which operates without a “leader,” renders the integer ambiguity resolution process more time-consuming. By integrating the strengths of PSA and AFSA, we propose an improved hybrid algorithm, termed the particle swarm and artificial fish swarm (PSOAF) algorithms, to efficiently search for integer ambiguity solutions in GNSS. The process begins by solving the floating-point solution and

收稿日期: 2024-02-23

基金项目: 江苏省前沿引领技术基础研究重大项目 (BK20222006)

its corresponding covariance matrix using the carrier phase double-difference equation. Then, to address the correlation issue, the inverse integer Cholesky algorithm is used to effectively decorrelate them. Recognizing the limitations inherent in integer least squares estimation, we further refine the effectiveness of the PSOAF algorithm by optimizing the fitness function. This optimization significantly enhances the convergence speed and search performance of the algorithm, resulting in a precise resolution of the integer ambiguity. In the initial stage of integer ambiguity search, the PSO's characteristic of rapid convergence facilitates a coarse search, yielding a suboptimal solution. This solution serves as foundational data for the AFSA, guiding the fine search required for integer ambiguity resolution. To verify the PSOAF algorithm's effectiveness and practicality, we conducted both three-dimensional and twelve-dimensional simulation analyses based on a classical example. The results demonstrate that the PSOAF algorithm not only converges to the optimal solution at an unprecedented rate but also exhibits markedly superior search efficiency compared to single algorithms. Further validation of the PSOAF algorithm's real-world applicability and effectiveness was sought through experiments utilizing actual Beidou data. The results from these experiments were promising, showing that the baseline resolution error mainly remained within a 10-mm range. This finding confirms the correctness of the double-difference integer ambiguity search conducted using the PSOAF algorithm. The applicability and effectiveness of the PSOAF algorithm in real scenarios are verified. In conclusion, this study underscores the PSOAF algorithm's significant potential for practical applications, particularly in scenarios involving short baselines.

KEY WORDS global navigation satellite system (GNSS); integer ambiguity; particle swarm optimization algorithm; artificial fish swarm algorithm; hybrid algorithm

在全球导航卫星系统 (Global navigation satellite system, GNSS) 中, 载波相位差分技术被认为是实现高精度定位的重要方法。然而, 在载波相位观测过程中接收机只能测量载波相位不足整数部分, 而每一个相位测量中都涉及一个常数未知数, 即整周模糊度^[1]。当整周模糊度未被准确解算时会导致定位结果具有一定的模糊性, 使得误差可能达到几米甚至十几米。因此准确解算整周模糊度是实现高精度定位的关键所在。最小二乘模糊度降相关平差法 (LAMBDA) 由荷兰的 Teunissen 提出, 目前已成为整周模糊度解算的标准算法^[2-3], 可以达到厘米级精度。但由于该方法涉及大量矩阵运算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。

近年来, 国内外许多学者对整周模糊度的求解问题进行了大量研究, 人工鱼群算法^[4-5] (Artificial fish swarm algorithm, AFSA)、遗传算法^[6]、粒子群算法^[7-8] (Particle swarm optimization, PSO) 等优化算法被应用到整周模糊度的求解问题中, 提高了整周模糊度搜索效率。刘书刚^[9]等提出了基于人工鱼群算法的整周模糊度解算算法, 在搜索中利用舍入算法对人工鱼群算法进行改进。邓洪高^[10]等提出了基于自适应差分算法的整周模糊度解算算法, 在标准差分算法上加上自适应变异算子、交叉算子、种群大小, 以提高整周模糊度求解成功率。张波^[11]等提出了基于改进粒子群优化算法的整周模糊度解算算法, 该算法基于 \sin 函数的惯性权重递减方法对粒子群权重进行改进。尚俊娜^[12]等提

出了基于改进蝴蝶搜索算法 (IBOA) 的整周模糊度解算算法, 引入动态切换概率来权衡 IBOA 算法中全局搜索和局部搜索的比例, 并通过在香味系数中添加自适应权重, 实现了位置的更新, 从而提高了整周模糊度解算的成功率。Chang^[13]等基于排序和贪婪选择策略, 提出了由 LAMBDA 算法引申并改进的 MLAMBDA (Modified LAMBDA) 算法来进行整数最小二乘估计。该算法有效地简化了计算复杂度, 缩短收敛时间, 提高了解算的效率。Tatiyaworanu^[14]等提出了一种基于 Grantham-Schmidt 正交化遗传算法的整周模糊度求解方法, 有效地降低了搜索空间的维数和搜索次数。Forssell^[15]等提出了 Three carrier ambiguity resolution (TCAR) 算法, 采用逐级策略由低精度到高精度逐步固定模糊度, 通过在不同精度级别上对整周模糊度优化, 提高了搜索效率和解算的稳定性。但计算复杂度高且依赖多频率观测数据, 当某个频率的观测数据质量较差或不可用时, 会影响整个算法的性能和可靠性。Liu^[16]等提出了一种基于黎曼流形优化算法, 通过应用流形几何学非线性约束的特点提高浮点解的精度, 但该算法对初始值的选取较为敏感, 需要精心选择以确保算法的有效性。Ma^[17]等提出一种基于最佳整数等变估计与整数最小二乘估计相结合的整数孔径估计, 在每个整数的周围定义一个同向形状接收区域, 通过对接收区域大小的选择可以降低解算误差, 从而提高整周模糊度解算的正确性, 但该算法需要较长的观测时间, 实时性较差。欧阳利^[18]等提出一种基于鸡群优

化算法(ICS0)用于整周模糊度的求解,通过对鸡群的位置更新方法进行改进,实现了对整周模糊度的快速求解.霍刚^[19]等提出了混合策略麻雀搜索算法(HSSSA)的整周模糊度解算算法,通过引入Circle混沌映射进行种群初始化,并引入PSO算法中的粒子速度策略,改善了麻雀搜索算法全局搜索能力差搜索效率低的问题.相较于经典算法,将优化算法应用于整周模糊度的解算提高了搜索效率.但是,这些优化算法本身存在一些问题,如收敛速度慢、计算复杂性高、易陷入局部最优解、参数选择敏感等,会导致模糊度解算结果不稳定.因此,整周模糊度快速准确解算的方法仍需深入的研究.

针对以上问题,本文提出一种GNSS整周模糊度种群融合优化算法.首先,通过载波相位双差方程求解整周模糊度的浮点解和协方差矩阵.然后,采用反整数Cholesky算法降低整周模糊度浮点解的相关性.针对整数最小二乘估计量的不足通过优化适应度函数来提高算法的收敛性和搜索性能,借助PSO算法前期收敛速度快的优势和AFSA算法具备全局优化的能力来实现整周模糊度的快速准确解算.最后,通过经典算例仿真和实测北斗数据实验验证了该算法的可靠性和实用性.

1 GNSS 差分定位模型分析

1.1 载波相位观测模型

在卫星精确定位中,由于双差载波相位观测模型可以消除卫星钟差和接收机钟差,削弱卫星轨道误差和信号传输延迟误差^[20].因此,在高精度定位中主要采用双差模型进行定位解算,双差模型^[21]可表示为:

$$\phi_{ur}^{jk} = \lambda^{-1} p_{ur}^{jk} + N_{ur}^{jk} + \varepsilon_{\phi_{ur}}^{jk} \quad (1)$$

式中: ϕ_{ur}^{jk} 表示 t 时刻两个接收机 u, r 与卫星 j, k 之间的载波相位双差观测值; λ 表示载波波长; p_{ur}^{jk} 表示 t 时刻两个接收机 u, r 与卫星 j, k 之间的几何距离差值; N_{ur}^{jk} 表示 t 时刻的双差整数; $\varepsilon_{\phi_{ur}}^{jk}$ 表示 t 时刻的其他观测噪声.如图1所示.

通过双差模型可知,每增加一个卫星会引入一个额外的双差整周模糊度.而最小二乘估计可以轻松地扩展到多参数估计,通过求解一个优化问题来估计所有的参数.基于双差载波相位的GNSS定位模型,其数学模型均可以归结为以下线性化模型^[22]中:

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{a} + \mathbf{B}\mathbf{b} + \mathbf{e} \quad (2)$$

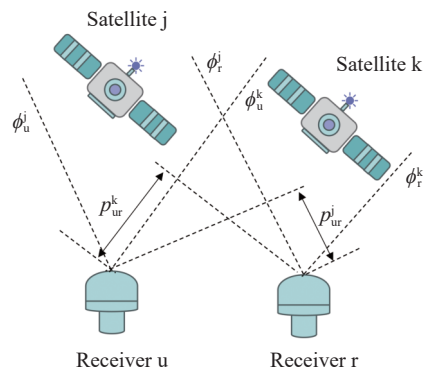


图1 双差模型示意图

Fig.1 Schematic of the double-difference model

式中: \mathbf{y} 为载波相位观测值, \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 均为设计矩阵, \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 分别为整周模糊度向量和两基站之间基线向量, \mathbf{e} 表示观测误差向量.式(2)中 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的确定可以采用最小二乘参数估计法^[23]求解,可进一步表示为:

$$\min \left\{ \|\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{a} - \mathbf{B}\mathbf{b}\|_{\mathbf{Q}_{yy}}^2 \right\} \quad (3)$$

式中, \mathbf{Q}_{yy} 表示载波相位方差协方差矩阵.对式(3)通过加权最小二乘解算得到浮点解和基线向量及其对应的协方差矩阵^[24]:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}} \\ \hat{\mathbf{b}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{y} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{a}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{b}}} \\ \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{a}}} & \mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{Q}_{yy}^{-1} \mathbf{B} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

式中: $\hat{\mathbf{a}}$ 和 $\hat{\mathbf{b}}$ 分别表示浮点解和基线向量, $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{a}}}$ 和 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{b}}\hat{\mathbf{b}}}$ 分别为 $\hat{\mathbf{a}}$ 和 $\hat{\mathbf{b}}$ 相对应的协方差矩阵.由于模糊度的整数性质,因此整周模糊度的固定解可以通过求解下述二次型函数 $J(\mathbf{a})$ 的最小值得到,即:

$$J(\mathbf{a}) = \min \|\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a}\|_{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{a}}\hat{\mathbf{a}}}}^2 \quad (6)$$

式(6)表示为模糊度固定即在整数空间中,以 $\hat{\mathbf{a}}$ 为中心,搜索距离 $\hat{\mathbf{a}}$ 为最短的整数矢量.

在进行模糊度搜索时,首要任务是确定搜索空间.在搜索空间中,必须涵盖所有正确的解.在实际应用中,基线通常是要求解的参数向量^[25].但对于短基线的实时定位,在利用精密测量获得基线向量准确值的前提下,以基线长度为约束条件,能有效地缩小搜索空间范围,从而提高算法的效率^[26].假设基线长度为1,则搜索的范围可以表示为:

$$-1/\lambda \leq \mathbf{a}_{ur}^{jk} \leq 1/\lambda \quad (7)$$

式中, λ 为北斗卫星导航系统(BDS)B1载波波长,

其值为 0.192 m.

1.2 模糊度降相关

通过最小二乘估计得到的模糊度浮点解精度较低,且相互之间具有较高的相关性.在这种情况下,搜索空间呈现为一个狭长的超椭球体,这会导致搜索效率降低.因此,在对整周模糊度搜索之前需进行模糊度降相关操作.

常用的降相关方法主要有:整数 Gauss 算法^[27]、格理论中的规约算法(LLS)^[28]和逆整数 Cholesky 算法^[29].在整数 Gauss 算法中由于受到舍入误差和截断误差的影响,其效果会受到影响.LLS 算法复杂度高,对于非结构化的整数矩阵降相关效果不佳.反整数 Cholesky 算法在处理 20 维左右的协方差矩阵时,具有很好的降相关效果.而在 BDS 动态定位中,模糊度协方差矩阵的维数一般在 20 维左右,因此本文采用反整数 Cholesky 算法进行模糊度降相关处理.该算法的基本思想是使用可逆整数变换对浮点解及其协方差矩阵进行变换,变换过程为:

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

$$Q_{\hat{z}\hat{z}} = Z^T Q_{\hat{a}\hat{a}} Z \quad (9)$$

式中: Z 是整数变换矩阵; \hat{z} 是去相关后的浮点解; $Q_{\hat{z}\hat{z}}$ 是去相关后的协方差矩阵.利用变换后的 \hat{z} 和 $Q_{\hat{z}\hat{z}}$ 展开整数最小二乘搜索,首先确定出最优整数候选向量 \tilde{z} ,再通过一个整数逆变换确定模糊度浮点解的最优整数候选值 \tilde{a} :

$$\tilde{a} = Z^{-T} \tilde{z} \quad (10)$$

$$Q_{\tilde{a}\tilde{a}} = Z^{-T} Q_{\tilde{z}\tilde{z}} Z^{-1} \quad (11)$$

2 PSOAF 算法及其融合策略

整周模糊度搜索本质上是在搜索空间中寻找目标函数的最小值.为了提高搜索的稳定性和效率,本文提出 PSOAF 算法进行整周模糊度搜索.PSOAF 算法的融合策略是利用 PSO 算法前期收敛速度快进行粗搜索获取次优解,并将其作为 AFSA 算法的初始化信息,通过 AFSA 算法全局优化的特性来完成整周模糊度的细搜索.

2.1 PSO 算法

粒子群算法是一种群体演化算法^[30],最早由 Eberhart 和 Kennedy 受鸟类及鱼群聚集觅食行为启发而提出.算法的目的在于指导下一步迭代位置,其原理是对粒子的当前位置、个体极值和全局极值的联合计算来更新粒子的速度(v)和位置(x)^[31].

粒子的速度和位置变化方程为^[32]

$$v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (\text{pbest} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (\text{gbest} - x_{id}^k) \quad (12)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (13)$$

式中: i 为粒子的编号, d 为粒子的位置和速度向量中的维度索引,范围为 $1 \leq i \leq n; 1 \leq d \leq n$, k 为第 k 次迭代, c_1 和 c_2 是学习因子, r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 区间上的随机数, ω 为惯性权重, pbest 为个体极值, gbest 为全局极值.

惯性权重 ω 对 PSO 算法的性能非常重要,协调了群体的全局探索和局部开发能力^[33].在早期演化阶段,预计粒子速度值较大,以提高全局勘探能力.同时,考虑到 PSO 算法在演化后期需要具有较强的局部探测能力,预计速度值将为较小^[34].为了解决标准 PSO 算法容易陷入局部最优的问题,本文采用 Hu^[35] 提出的惯性权重递减方法对其进行改进,所提出的惯性权重为:

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})(k/k_{\max}) \quad (14)$$

其中: k 为当前代数, k_{\max} 为最大迭代次数.

2.2 AFSA 算法

AFSA 算法是由 Li^[36] 提出的一种用于解决组合优化问题的寻优算法,该算法的基本原理是通过构造人工鱼模拟鱼的觅食、聚群和追尾行为,从单条鱼的基本行为出发,通过鱼群中各个体的局部寻优,达到全局最优值在群体中凸显的目的,具有并行、高效和较强的取得全局最优解的能力.

假设人工鱼个体的状态表示为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_h)$, 其中 $x_i (i = 1, 2, \dots, h)$ 是整周模糊度空间域寻优的整数变量.人工鱼群相关参数包括其感知范围 V 、单次移动步长 S 、拥挤度因子 δ 和最大试探次数 h .人工鱼 i 和 j 之间的距离可以表示为^[37]:

$$d_{i,j} = \|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^h (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (15)$$

在算法运行过程中,人工鱼通过感知水中的食物浓度,进行觅食、聚群和追尾行为,并记录最优鱼的状态.在算法的迭代中,持续更新来进行寻优.最后将最优进行取整处理,从而实现模糊度整数解的获取.其中人工鱼觅食行为的状态转移方程可表示为:

$$X_{i+1} = X_i + \text{round} \left[\frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|} \cdot S \cdot \text{rand} \right] \quad (16)$$

式中: X_i 为人工鱼当前状态, X_j 为感知范围内的其他状态, round 为取整函数, rand 为 $[0, 1]$ 内的随机数.

2.3 PSOAF 算法

2.3.1 PSOAF 适应度函数建立

PSOAF 算法的适应度函数是利用最小二乘原则, 用降相关后的模糊度浮点解去拟合固定解, 从而使得浮点解在最小二乘准则下达到整数最优. 根据适应度函数的大小对 PSOAF 种群进行优胜劣汰. 根据式(6)可得到模糊度的整数最小二乘估计的目标函数:

$$J(N) = (\hat{N} - N)^T Q_N^{-1} (\hat{N} - N) \quad (17)$$

式中: \hat{N} 是模糊度浮点解, N 是整周模糊度向量. Q_N^{-1} 是 \hat{N} 对应的协方差矩阵的逆矩阵. Teunissen^[38] 等给出了使用整数最小二乘估计量的概率证明. 引入可容许整数估计量, 推广经典平差理论, 证明了在正确整数估计中, 整数最小二乘估计量是最好的, 但是目标函数(17)的大部分值域较为平坦, 函数值的变化很小, 即使 N 发生了小的变化, 函数值也相对稳定, 使得搜索效率较低, 因此对目标函数(17)进行改进, 提出以下适应度函数:

$$F(N) = \alpha_1 \lg(J(N)) - \alpha_2 \|\hat{N} - N\|^2 \quad (18)$$

式中: α_1 、 α_2 为性能指标的权重. \lg 函数对 $J(N)$ 的变化更为敏感, 同时 \lg 函数具有平滑的性质, 有助于减少搜索空间的局部极值问题, 更容易找到全局最优解. 当 $J(N)$ 越小, $F(N)$ 的值就越大, 即解的精度越高. 因此, 通过最大化目标函数, 可以使得整周模糊度的估计更加准确. $\|\hat{N} - N\|^2$ 强调残差项的大小, 对整周模糊度向量的拟合误差进行惩罚. 当残差项较大时, 适应度函数会减小, 从而鼓励 PSOAF 算法更好地拟合已知的整周模糊度向量 N . 在仿真过程中, 式中的 α_1 和 α_2 分别为 0.7 和 0.3.

2.3.2 PSOAF 算法基本流程

PSOAF 算法的流程图如图 2 所示, 具体实现步骤如下:

1) 初始化粒子的速度和位置、权重最大最小值、种群数量、最大迭代次数、学习因子和人工鱼的感知距离、单次移动步长、拥挤度因子.

2) 计算每个粒子的初始适应度值, 更新个体极值和全局极值.

3) 运用粒子群算法更新粒子速度, 对飞行速度进行限幅处理, 使之不能超过最大飞行速度.

4) 运用粒子群算法更新粒子位置, 将每个粒子的适应值与其历史最优值相比较, 如果更好, 则进行替换.

5) 达到迭代次数, 生成次优解, 作为人工鱼群

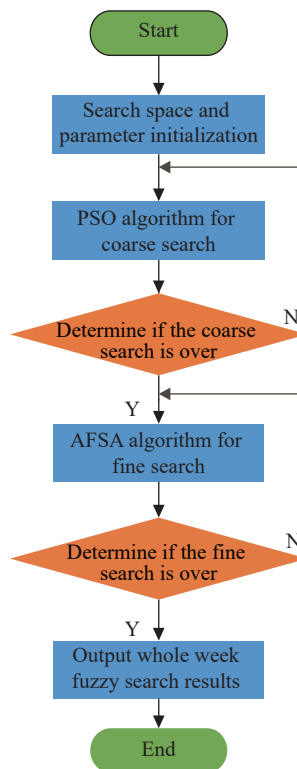


图 2 PSOAF 算法整体流程图

Fig.2 Flowchart of the PSOAF algorithm

算法的种群初始位置和速度. 否则转 3).

6) 运用 AFSA 算法的聚群行为、追尾行为、觅食行为以及随机行为更新粒子位置, 判断每个粒子的适应值是否相较于历史的最优值好, 如果是, 则替换.

7) 达到迭代次数, 输出全局最优粒子的值和位置, 以及所有粒子的局部最优值和对应位置. 否则转 6).

3 仿真与实验分析

3.1 仿真分析

为验证 PSOAF 算法解算整周模糊度的有效性与实用性, 将其与 PSO 和 AFSA 算法进行了对比仿真分析, 并以能否在一定的迭代次数内快速收敛于最优解作为参考指标, 通过适应度函数来判定收敛. 首先采用文献^[39]中 Jonge 提出的经典算例进行三维仿真分析, 将 PSOAF 算法中的种群数量设置为 10, 迭代次数为 20, 其中 PSO 和 AFSA 算法的迭代次数分别为 3 和 17. 其余的相关参数设置如表 1 所示, 三种算法的三维整周模糊度解算结果如图 3 所示.

从图 3 的结果比较可知, PSO 算法的前期收敛速度快, 但在第 4 次迭代中陷入了局部最优, 直到第 13 次迭代才跳出局部最优解, 最终在第 15 次迭

表 1 算法的参数设置

Table 1 Parameter settings of the algorithms

Parameter	Value
PSO inertial coefficient, ω	0.4-0.9
Learning factor, c_1	2.05
Learning factor, c_2	2.05
Perceived range, V	6
Single move step, S	2
Crowding factor, δ	0.618

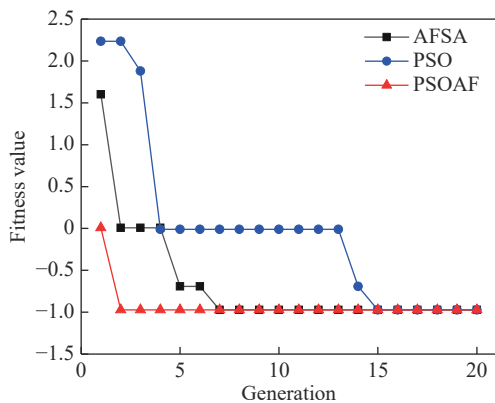


图 3 三维整周模糊度解算结果

Fig.3 Three-dimensional integer ambiguity resolution results

代达到最优解. AFSA 算法相较于 PSO 算法整体要稍快一点, 经历了 7 次迭代后达到了最优解. PSOAF 算法在第 2 次迭代就达到了最优解, 相较于 AFSA 算法表现的更为出色, 是三种算法中性能最好的. 因此, 在整周模糊度解算上, PSOAF 算法具有更好的搜索有效性.

为了进一步探讨 PSOAF 算法和单一算法的性能, 采用十二维算例进行仿真. 将 PSOAF 算法中的种群数量设置为 50, 迭代次数为 100, 其中 PSO 和 AFSA 算法的迭代次数分别为 20 和 80. 其余的

相关参数设置同三维一致, 三种算法的十二维整周模糊度解算结果如图 4 所示.

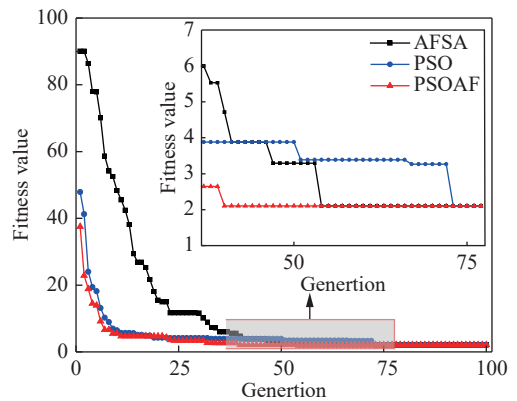


图 4 十二维整周模糊度解算结果

Fig.4 Twelve-dimensional integer ambiguity resolution results

从图 4 可以看出, 三种算法均能收敛到全局最优, PSO 算法困于局部最优直到第 72 次迭代才达到最优解, AFSA 算法优于 PSO 算法, 在第 54 次迭代后达到最优解. 而 PSOAF 算法在第 40 次迭代就收敛于最优解. 表明在高维情况下 PSOAF 算法依然展现出卓越的搜索有效性. 为了消除试验的偶然性, 证明 PSOAF 算法的搜索可靠性, 采用 PSOAF 算法和单一算法连续搜索了 100 次三维和十二维整周模糊度. 两种算法收敛于最优解所需迭代次数记录于图 5 中.

从图 5(a) 可以看出, 在三维整周模糊度解算中, PSO 算法收敛于最优解所需的平均迭代次数为 10 次, AFSA 算法所需的平均迭代次数为 5 次, 而 PSOAF 算法只需平均迭代 3 次即可达到最优解. 从图 5(b) 可以看出, 在十二维整周模糊度解算中, PSO 算法收敛于最优解需要平均迭代 100 次, AFSA 算法需平均迭代 60 次, 而 PSOAF 算法只需

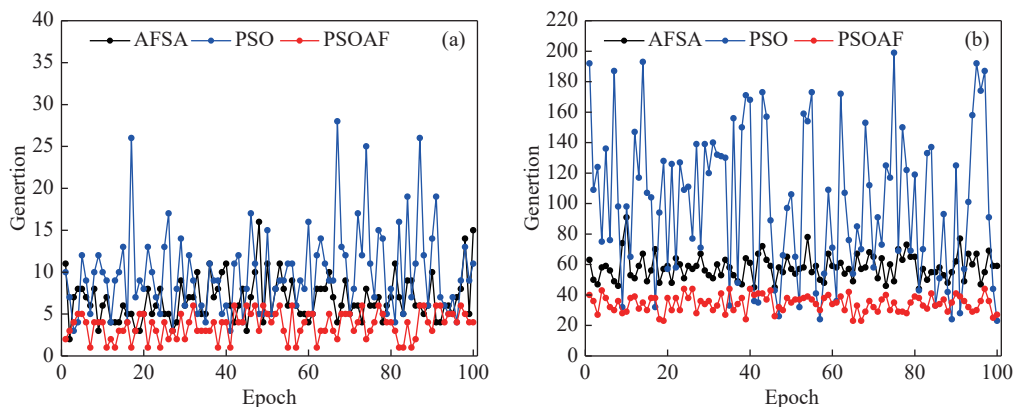


图 5 100 次整数模糊度解算结果.(a) 三维; (b) 十二维

Fig.5 Hundred times integer ambiguity resolution results: (a) three-dimensional; (b) twelve-dimensional

平均迭代 30 次即可达到最优解. 因此, 在整周模糊度解算上, PSOAF 算法具有更好的可靠性.

3.2 实例验证

为验证 PSOAF 算法在实际情况下的适用性和有效性. 在南京市使用两个卫星接收机 (UBLOX, ZED-F9P) 组成 263.52 m 的短基线, 测试场景如图 6 所示. 接收机采样间隔为 1 s, 卫星截止高度角为 30°, 在天气晴朗四周空旷的情况下持续观测大约 30 min, 获取 1382 个有效历元. 将获取的数据通过串口传输到计算机上, 运用 Matlab 进行整周模糊度的解算. 首先对两个天线进行单点定位, 然后通过双差处理, 借助加权最小二乘估计得到浮点解及其协方差矩阵. 最后通过 PSOAF 算法搜索双差后的整周模糊度. 整个双差整周模糊度解算的过程通常是在逐个历元中进行的, 每个历元都被独立处理, 以找到适当的整周模糊度解. 然后在后续的历元中继续这个过程, 在多个历元的迭代中逐渐收敛到准确值. 针对 BDS B1 单频信号, 采集期间有效观测卫星 8 颗, 其中参考卫星选取观测期间高度角最高的 6 号卫星, 并与 8 号、9 号、12 号、14 号、32 号、43 号、51 号卫星组成双差模糊度. 整周模糊度解算结果如图 7 所示.



图 6 测试场景
Fig.6 Test scenario

如图 7 所示, 卫星 9、12、14、32、43、51、8 号与卫星 6 号组成的双差整周模糊度分别为 -4、6、-69、215、233、81、-56, 且都完成了模糊度固定. 由于基线长度已知且 BDS B1 载波的波长也已知为 0.192 m, 因此采用基线解算来验证双差整周模糊度解算的结果. 基线解算结果和误差分别如图 8 和 9 所示.

在一个整周内, 模糊度对于基线的影响等同于 B1 载波波长. 若解算结果在 B1 载波波长范围

内既稳定又精确, 则表明解算结果是无误的. 从图 8 可观察到, 三个方向的各自相对位置相差不超过 0.192 m, 表明 PSOAF 算法解算结果稳定. 从图 9 可以看出基线解算误差在 1382 次历元内误差最大为 8 mm 左右, 整体控制在 10 mm 以内, 表明双差整周模糊度搜索正确, 验证了 PSOAF 算法在实际场景中的适用性和有效性.

如果解算的整周模糊度是不准确的, 不仅无法提高定位精度, 反而会降低定位精度. 因此, 在解算整周模糊度后, 还需对其进行检验, 即模糊度的确认. Ratio 值是检验整周模糊度固定可靠性的一种常用方法, 通过次优的模糊度向量的残差平方和与最优的模糊度向量的残差平方和的比值得到^[40], 按照经验 Ratio 值常设为 3, 当 Ratio 值大于 3 时, 判定模糊度固定解是正确的. 则成功率=固定正确的历元数/总历元数×100%. 为了进一步验证算法的可靠性, 分别统计了使用 MLAMBDA 算法和 PSOAF 算法求解双差模糊度的成功率. 统计了基线长度为 263.52 m 的实测数据模糊度解算成功率, 解算结果如表 2 所示.

表 2 结果表明, 使用 MLAMBDA 算法和 PSOAF 算法解算的成功率分别为 96.67% 和 96.60%, 两种算法的解算成功率基本一致. 因此, 在实际的短基线应用中, PSOAF 算法展现出高度可靠性和实用性.

4 结论

为了更有效的提高 GNSS 整周模糊度的搜寻效率与稳定性, 本文提出一种融合 PSO 算法和 AFSA 算法的 PSOAF 混合算法. 利用仿真数据和实测数据进行了试验, 结论如下:

(1) 在整周模糊度搜索方面, 通过数据仿真验证了 PSOAF 算法在低维和高维情况下相较于 AFSA 算法和 PSO 算法具有更快的收敛速度, 能够更快地达到最优解, 验证了 PSOAF 算法能有效的解决 PSO 算法易陷入局部最优和 AFSA 算法收敛速度较慢的问题, 提高整周模糊度的搜索效率.

(2) 为了消除试验的偶然性, 采用 PSO 算法、AFSA 算法和 PSOAF 算法连续搜索了 100 次三维和十二维整周模糊度. 结果表明, PSOAF 算法相较于 PSO 算法和 AFSA 算法在收敛速度上提高一倍以上, PSOAF 算法比 PSO 算法更容易跳出局部最优, 同时比 AFSA 算法更快地找到全局最优解, 显著提高了整周模糊度解算结果的稳定性.

(3) 针对 BDS L1 单频信号采用 PSOAF 算法搜索双差后的整周模糊度, 并进行了基线解算, 解算

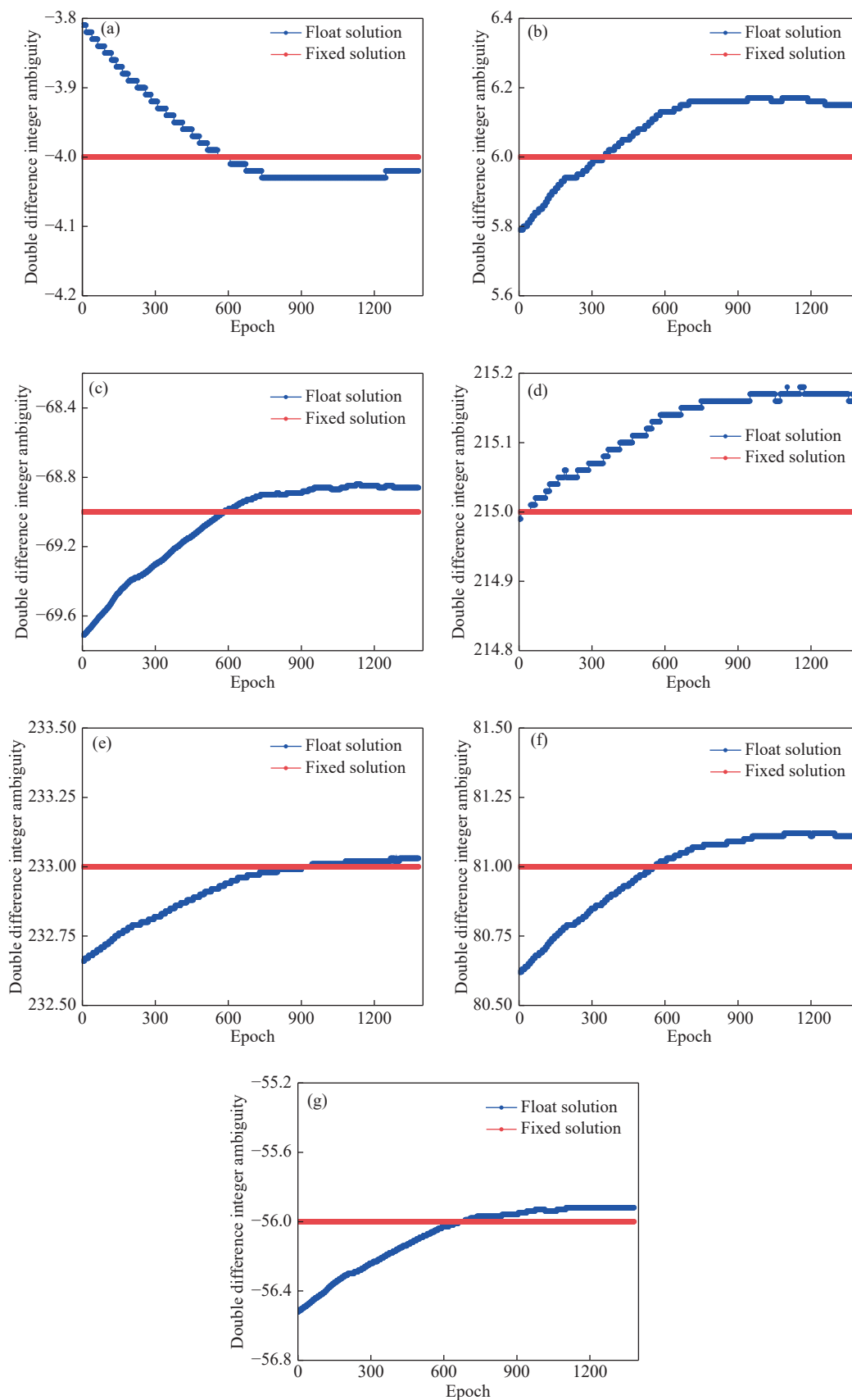


图7 双差模糊度解算结果。(a)卫星9号-6号;(b)卫星12号-6号;(c)卫星14号-6号;(d)卫星32号-6号;(e)卫星43号-6号;(f)卫星51号-6号;(g)卫星8号-6号

Fig.7 Double-difference fuzzy degree resolution results: (a) Satellite 9-6; (b) Satellite 12-6; (c) Satellite 14-6; (d) Satellite 32-6; (e) Satellite 43-6; (f) Satellite 51-6; (g) Satellite 8-6

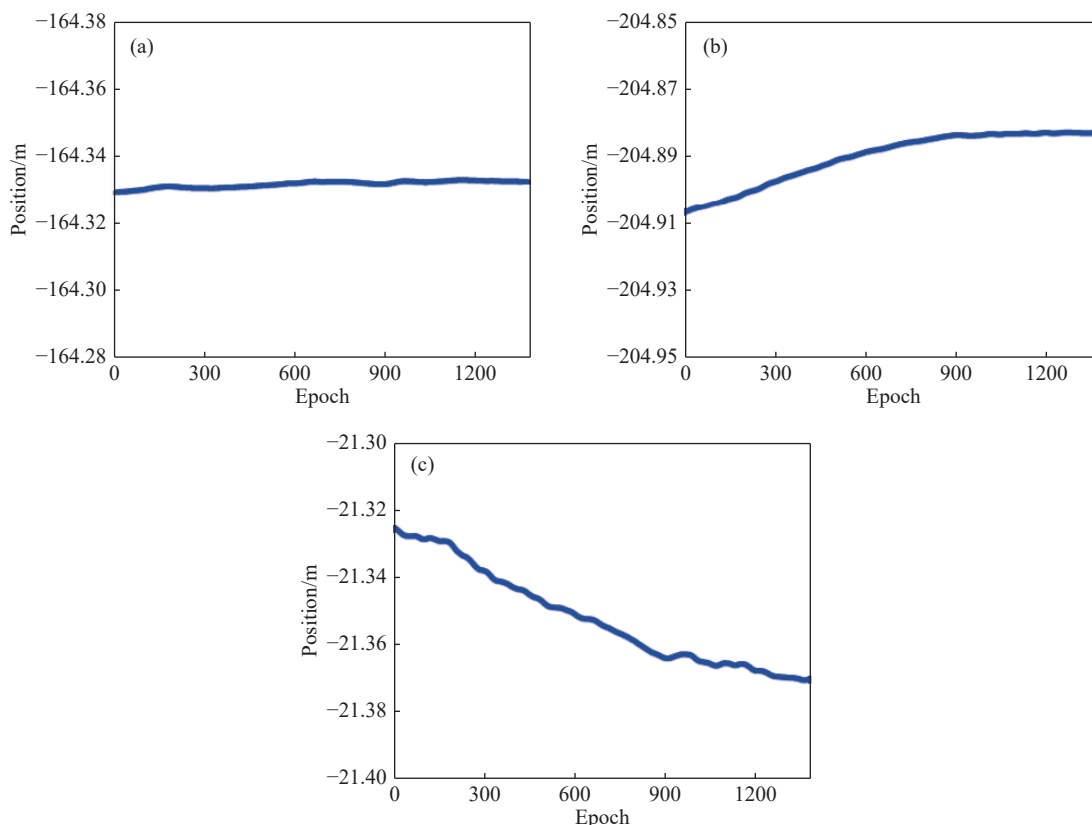


图 8 基线解算结果. (a) 东方向; (b) 北方向; (c) 上方向

Fig.8 Baseline solution results: (a) eastward; (b) northward; (c) upward

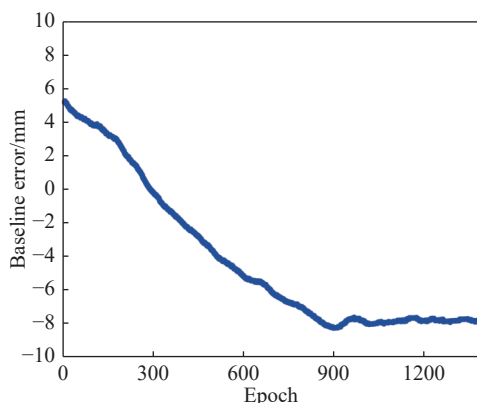


图 9 基线解算误差

Fig.9 Baseline solution error

表 2 两种算法解算成功率

Table 2 Success rate of solving two algorithms

Method	Base line/m	Epoch	Success epoch	Success rate/%
MLAMBDA	263.52	1382	1336	96.67
PSOAF	263.52	1382	1335	96.60

结果表明基线误差在 10 mm 以内, 验证了 PSOAF 算法在实际应用下的适用性和有效性. 表明 PSOAF 算法可以很好的解决短基线解算中整周模糊度搜索效率低、不稳定等问题.

参 考 文 献

[1] Jiao Y X, Li K Z, Tian C D, et al. Improved GNSS integer ambiguity resolution method based on the column oriented Cholesky decomposition. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 4454

[2] Li H Y, Nie G G, Chen D Z, et al. Constrained MLAMBDA method for multi-GNSS structural health monitoring. *Sensors*, 2019, 19(20): 4462

[3] Teunissen P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation. *J Geod*, 1995, 70(1): 65

[4] Xi L, Zhang F B. An adaptive artificial-fish-swarm-inspired fuzzy C-means algorithm. *Neural Comput Appl*, 2020, 32(22): 16891

[5] Wang Y G, Wang L, Teng H L, et al. DGPS integer ambiguity fast fixation based on improved artificial fish swarm algorithm. *J Chin Inertial Technol*, 2016, 24(5): 619
(王跃钢, 王乐, 腾红磊, 等. 基于改进人工鱼群算法的 DGPS 整周模糊度快速固定. 中国惯性技术学报, 2016, 24(5): 619)

[6] Li H G, Wang Y Q, Li X Q, et al. Solving integer ambiguity based on genetic algorithm with improved simulated annealing. *J Jishou Univ (Nat Sci Ed)*, 2018, 39(4): 9
(李洪刚, 王亚琦, 李雪晴, 等. 基于模拟退火遗传算法求解整周模糊度. 吉首大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 9)

[7] Zhao J X. Ultra-fast BDS satellite clock error prediction method based on improved particle swarm optimization. *J Navig Positioning*, 2023, 11(6): 156

- (赵金霞. 一种改进的粒子群优化超快速 BDS 卫星钟差预报方法. 导航定位学报, 2023, 11(6): 156)
- [8] Chen P W, Yu X X, Zhang H. An algorithm and results analysis for GPS/BDS tightly coupled combination based on particle swarm optimization. *J Hefei Univ Technol (Nat Sci)*, 2021, 44(1): 107
(陈佩文, 余学祥, 张浩. GPS/BDS 粒子群优化算法紧组合定位方法及精度分析. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2021, 44(1): 107)
- [9] Liu S G, Zhang Y J. Integer ambiguity solution based on artificial fish swarm algorithm. *Comput Digital Eng*, 2016, 44(11): 2127
(刘书刚, 张亚晶. 基于人工鱼群算法的整周模糊度解算算法. 计算机与数字工程, 2016, 44(11): 2127)
- [10] Deng H G, Cheng G, Ji Y F, et al. Integer ambiguity resolution based on adaptive weighting differential evolution algorithm. *Comput Simul*, 2022, 39(8): 327
(邓洪高, 程归, 纪元法, 等. 基于 AWDE 算法的整周模糊度解算算法. 计算机仿真, 2022, 39(8): 327)
- [11] Zhang B, Shang J N. DGPS integer ambiguity fast resolution based on improved particle swarm optimization algorithm. *Transducer Microsyst Technol*, 2020, 39(1): 129
(张波, 尚俊娜. 基于改进粒子群优化算法的 DGPS 整周模糊度快速解算. 传感器与微系统, 2020, 39(1): 129)
- [12] Shang J N, Luo Z W. Fast resolution of DGPS integer ambiguity based on improved butterfly optimization algorithm. *J Chin Inertial Technol*, 2024, 32(2): 139
(尚俊娜, 罗照旺. 基于改进蝴蝶搜索算法的 DGPS 整周模糊度快速解算. 中国惯性技术学报, 2024, 32(2): 139)
- [13] Chang X W, Yang X, Zhou T. MLAMBDA: A modified LAMBDA method for integer least-squares estimation. *J Geod*, 2005, 79(9): 552
- [14] Tatiyawanun C, Purivigraipong S. The resolving integer ambiguity cycle of GPS carrier phase difference using GA-GSO // 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Krabi, 2013: 1
- [15] Forssell B, Martin-Neira M, Harrisz R A. Carrier phase ambiguity resolution in GNSS-2 // *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 1997)*. Kansas, 1997: 1727
- [16] Liu X, Ballal T, Ahmed M, et al. Instantaneous GNSS ambiguity resolution and attitude determination via Riemannian manifold optimization. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2023, 59(3): 3296
- [17] Ma L Y, Lou Y D, Lu L G, et al. GNSS best integer equivariant estimation combining with integer least squares estimation: An integrated ambiguity resolution method with optimal integer aperture test. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 100
- [18] Ouyang L, Huang C L. Solution method of DGPS integer ambiguity based on ICSO. *GNSS World China*, 2020, 45(3): 41
(欧阳利, 黄采伦. 基于 ICSO 的 DGPS 整周模糊度的求解方法. 全球定位系统, 2020, 45(3): 41)
- [19] Huo G, Shang J N. A hybrid strategy sparrow search algorithm for DGPS integer ambiguity resolution. *Chin J Sens Actuators*, 2023, 36(10): 1593
(霍刚, 尚俊娜. 一种用于 DGPS 整周模糊度解算的混合策略麻雀搜索算法. 传感技术学报, 2023, 36(10): 1593)
- [20] Xue S Q, Yang Z M, Hu W J, et al. Visual analysis method of stability of Shenzhen Beidou CORS. *Urban Geotech Invest Surv*, 2022(2): 91
(薛世强, 杨志敏, 胡文健, 等. 深圳北斗 CORS 稳定性可视化分析方法. 城市勘测, 2022(2): 91)
- [21] Hou P Y, Zhang B C, Yasyukevich Y V. Homogeneous PPP-RTK user positioning performance as a consequence of network integer ambiguity resolution. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 60
- [22] Parvazi K, Farzaneh S, Safari A. The mathematical weighting of GNSS observations based on different types of receivers/antennas and environmental conditions. *Geod Geodyn*, 2023, 14(5): 521
- [23] Liang X, Huang Z G, Qin H L. A new rapid integer ambiguity resolution of GNSS phase-only dynamic differential positioning. *IEEE Geosci Remote Sens Lett*, 2022, 19: 1
- [24] Zhang C L, Dong D N, Kubo N, et al. Evaluation of different constrained LAMBDA for low-cost GNSS attitude determination in an urban environment. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 42
- [25] Xia Y, Ren G H, Wan Y, et al. Multi-GNSS fusion real-time kinematic algorithm based on extended Kalman filter correction model for medium-long baselines. *J Shanghai Jiaotong Univ (Sci)*, 2022: 1
- [26] Cheng G. *Study on the Reliability of RTK Positioning in Complex Environments* [Dissertation]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2023
(程归. 复杂环境下 RTK 定位可靠性的研究[学位论文]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023)
- [27] Bae T S, Hong C K, Lim S H. TLS (Total least-squares) within Gauss-Helmert model: 3D planar fitting and Helmert transformation of geodetic reference frames. *J Korean Soc Surv Geod Photogramm Cartogr*, 2022, 40(4): 315
- [28] Li X Z, Xiong Y L, Chen W W, et al. Improved GNSS ambiguity fast estimation reduction algorithm. *Sensors*, 2023, 23(20): 8568
- [29] Xu P L. Parallel Cholesky-based reduction for the weighted integer least squares problem. *J Geod*, 2012, 86(1): 35
- [30] Feng Q, Li Q, Quan W, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm. *Chin J Eng*, 2021, 43(6): 745
(冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述. 工程科学学报, 2021, 43(6): 745)
- [31] Shang J N, Wang M D, Liu X H, et al. Improved PSO and ACO hybrid search algorithm for GNSS whole week ambiguity. *J Chin Inertial Technol*, 2021, 29(3): 350
(尚俊娜, 王民顿, 刘新华, 等. 改进的 PSO 与 ACO 混合搜索 GNSS 整周模糊度算法. 中国惯性技术学报, 2021, 29(3): 350)
- [32] Yan Y, Zhou Q, Cheng S, et al. Bilevel-search particle swarm optimization for computationally expensive optimization problems. *Soft Comput*, 2021, 25(22): 14357
- [33] Noronha R P. A new GA-PSO optimization methodology with

- fuzzy adaptive inertial weight // *Proceedings of the 2021 Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS 2021*. West Lafayette, 2021: 309
- [34] Xing H Y, Wang S H Z, Yi M, et al. Metal magnetic memory quantitative inversion model based on IPSO-GRU algorithm for detecting submarine pipeline defect. *Chin J Eng*, 2022, 44(5): 911 (邢海燕, 王松弘泽, 弋鸣, 等. 基于 IPSO-GRU 深度学习算法的海底管道缺陷尺寸磁记忆定量反演模型. 工程科学学报, 2022, 44(5): 911)
- [35] Hu X H, Eberhart R C, Shi Y H. Engineering optimization with particle swarm // *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium. SIS'03 (Cat. No.03EX706)*. Indianapolis, 2003: 53
- [36] Li T T, Meng T K, Meng G L, et al. Formation optimization of airborne radar coordinated detection system using an improved artificial fish swarm algorithm. *Sci Rep*, 2024, 14: 248
- [37] Li T H, Xie S S, Peng J B, et al. A weighting matrix optimization method for robust guaranteed cost control based on chaos artificial fish swarm algorithm. *Chin J Eng*, 2018, 40(4): 500 (李腾辉, 谢寿生, 彭靖波, 等. 混沌人工鱼群的鲁棒保性能控制权值矩阵优化方法. 工程科学学报, 2018, 40(4): 500)
- [38] Teunissen P J G. An optimality property of the integer least-squares estimator. *J Geod*, 1999, 73(11): 587
- [39] de Jonge P, Tiberius C. Integer ambiguity estimation with the lambda method // *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborne Applications: Symposium No. 115 Boulder*. Berlin, 1996: 280
- [40] Huang Y C, Chen Y L, Xue Y, et al. An evaluation indicator for the GNSS positioning quality. *J Geod Geodyn*, 2023, 43(11): 1167 (黄友灿, 陈玉林, 薛阳, 等. 一种 GNSS 定位结果质量评价指标. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(11): 1167)