

融合区域生长的动态同质像元选取算法

李坚, 范洪冬, 田泽明, 王俊

中国矿业大学 环境与测绘学院, 徐州 221116

摘要: 同质像元选取是分布式散射体合成孔径干涉雷达 DS-InSAR (Distributed Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) 的关键步骤, 直接影响后续相位优化的精度和可靠性。基于现有同质像元选取算法在影像数量少、I 类误差和 II 类误差平衡等问题上的不足, 提出了一种融合区域生长的动态同质样本选取算法 DCGS (Dynamic Center Growing Selector)。该算法首先根据似然比检验选择初始局部同质点集, 然后基于区域生长思想由内向外动态更新参考像元, 最后利用 Gamma 检验判定同质像元归属。根据蒙特卡洛模拟实验结果表明, 本研究 DCGS 算法在 6 个样本条件下的平均标准差 (STD) 均值为 0.014, 相较于广义似然比检验 GLRT (Generalized Likelihood Ratio Test)、Kolmogorov-Smirnov (KS) 检验、BWS (Baumgartner-Weiss-Schindler) 检验、置信区间假设检验 HTCI (Hypothesis Test of Confidence Interval) 算法分别提升了 68.4%、63.2%、67.9% 和 10.7%。利用河北省雄安新区的 Sentinel-1 影像完成了真实实验验证, 结果表明: DCGS 算法的相位差之和 SPD (Sum of the Phase Differences)、相位标准差 PSD (Phase Standard Deviation) 以及残差点数 RPN (Residue Point Number) 均取得最低; 相比于 HTCI 算法, 分别实现了 2.6%、8.9% 和 18.4% 的性能提升; 在噪声抑制、分辨率保持和对样本变化的鲁棒性方面优于 BWS 检验和 HTCI 算法。

关键词: 分布式目标, DS-InSAR, 同质像元选取, 区域生长, 非参数假设检验, 形变监测

中图分类号: P237/P2

引用格式: 李坚, 范洪冬, 田泽明, 王俊. 2026. 融合区域生长的动态同质像元选取算法. 遥感学报, 30(4): 880-893

Li J, Fan H D, Tian Z M and Wang J. 2026. Dynamic homogeneous pixel selection algorithm integrated with region growing. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 880-893 [DOI: 10.11834/jrs.20265339]

干涉合成孔径雷达 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术凭借其大范围、高精度、全天候的地表形变监测能力, 已成为地球科学与遥感领域的核心手段, 广泛应用于城市沉降 (杨梦诗等, 2023)、滑坡演化 (廖明生等, 2021)、矿区沉陷 (朱建军等, 2019) 以及火山活动 (牛玉芬, 2022) 等动态监测场景。传统差分 InSAR (Differential InSAR, D-InSAR) 技术受时空去相关、大气延迟等因素制约, 难以实现长时序高精度监测 (Zhou 等, 2019); 永久散射体 InSAR (Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR) 技术虽然通过提取高相干永久散射体提升了时序稳定性, 但在植被覆盖区、矿区裸地等非城市场景中, PS 点密度较低, 无法满足精细化形变场反演需求 (Ferretti 等, 2000)。

为了突破这一局限, 分布式散射体 InSAR (Distributed Scatterer InSAR, DS-InSAR) 技术应运而生 (Ferretti 等, 2011)。分布式散射体是指雷达分辨率单元内无主导散射体的点目标 (如植被、裸土、低强度不透水面等), 其在非城区场景中占比较大, 可显著提升监测点密度, 从而为复杂地表形变的时空演化分析提供数据支撑 (Lee 和 Pottier, 2009)。同质点 SHP (Statistically Homogeneous Pixels) 选取是 DS-InSAR 技术的核心前提, 其通过筛选与参考像素统计分布一致的邻域像素, 构建高质量的 DS 候选点集, 直接决定了后续协方差矩阵估计、相位优化及地表形变解算的精度和可靠性 (Jiang 等, 2014)。若 SHP 选取存在偏差, 如混入异质像元或漏选同质像元, 将导致相干性估计偏差、相位噪声放大, 最终影响形变监测结果

收稿日期: 2025-09-11; 预印本: 2025-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42274054); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金 (编号: U23A20598)

第一作者简介: 李坚, 研究方向为 InSAR 数据处理及其在地表形变监测领域的应用。E-mail: ts24160020a311d@cumt.edu.cn

通信作者简介: 范洪冬, 研究方向为 InSAR 形变监测。E-mail: cumtfanh@163.com

的可信度 (Lee 和 Pottier, 2009)。近年来, 中国在生态修复、耕地保护以及地质灾害防治等领域对高精度形变监测的需求日益迫切 (明小勇 等, 2024; 黄家乐 等, 2024; 李媛茜 等, 2021), 传统 DS-InSAR 方法因 SHP 选取算法的局限性, 常面临监测点密度不足、小样本条件下鲁棒性差等问题, 难以支撑精细化灾害预警与治理决策 (Chen 等, 2023)。因此, 设计适用于复杂场景下高效、鲁棒的 SHP 选取算法, 对推动 DS-InSAR 在国内实际应用中的实施具有重要意义。

同质点选取本质是通过统计检验度量像素间的散射相似性, 现有算法可分为非参数检验和参数检验两大类 (Even 和 Schulz, 2018)。非参数方法无需假设数据分布形式, 适用于散射机制复杂的场景, 典型代表为 KS (Kolmogorov-Smirnov) 检验与 BWS (Baumgartner-Weiss-Schindler) 检验 (Ferretti 等, 2011; Baumgartner 等, 1998)。KS 检验通过计算两组样本经验分布函数的最大差异实现同质性判断, 优势在于检验统计量的抽样分布已知, 拒绝域可通过解析公式计算, 但该方法对样本分布尾部差异不敏感, 且在小样本 (SAR 影像数 < 20) 条件下检验功效显著降低, 易将异质像素误判为同质像素 (Marozzi, 2013)。BWS 检验作为 KS 检验的加权改进版本, 通过引入分布尾权重提升了对尾部差异的敏感性, 在小样本场景中可获得更高的检验功效, 然而其检验统计量的拒绝域无法通过解析表达式表示, 需依赖蒙特卡罗模拟获取数值解, 导致计算效率大幅下降, 难以适用于大规模 SAR 数据集处理 (蒋弥 等, 2018)。

参数检验类算法基于 SAR 数据的统计分布假设构建检验模型, 具有计算效率高的优势, 典型算法包括 FaSHPS (fast statistically homogeneous pixel selection) 与 HTCI (Hypothesis Test of Confidence

Interval) (蒋弥 等, 2018; Jiang 等, 2015)。FaSHPS 算法基于中心极限定理构建置信区间, 通过逻辑判断筛选同质像素, 在小样本场景中可靠性优于非参数方法, 且计算效率较 BWS 检验提升显著。然而, 该算法以参考像素的时间平均作为真值构建区间, 在大样本或高异质场景中易出现区间偏倚, 导致同质样本漏选率升高, 降低 DS 点集的完整性 (蒋弥 等, 2018)。HTCI 算法通过简化置信区间计算进一步提升效率, 却存在置信区间宽度过大、参考像素均值估计不准确的问题, 难以有效区分弱异质像素, 影响 SHP 选取精度 (Chen 等, 2023; Yu 等, 2025; Fan 等, 2022)。

因此, 针对现有同质点选取算法在小样本鲁棒性、弱异质场景适应性及计算效率间的平衡问题, 本研究提出了一种融合区域生长的动态同质点选取算法 DCGS (Dynamic Center Growing Selector)。该算法首先对小窗口进行似然比检验获取初始同质点集, 计算样本均值替换中心像素值得到稳健种子点; 随后, 利用区域生长对种子点的 8 邻域进行 Gamma 检验, 每一次生长都重新计算同质区域均值并更新种子点值, 直到生长结束; 后采用蒙特卡罗模拟实验测试 DCGS 算法的效率和精度, 并将其应用于中国河北省雄安新区, 验证所提方法的可行性和有效性, 以期对小样本弱异质场景下的同质点选取提供一种新的解决思路。

2 DCGS 方法原理

DCGS 算法在固定尺寸的滑动窗口内执行, 分为两个协同优化阶段: 首先在局部子窗口内基于似然比检验筛选初始同质点集, 计算同质点集均值并用其更新中心像素值; 随后基于 Gamma 分布进行自适应区域生长, 动态更新种子值。其具体流程如图 1 所示。

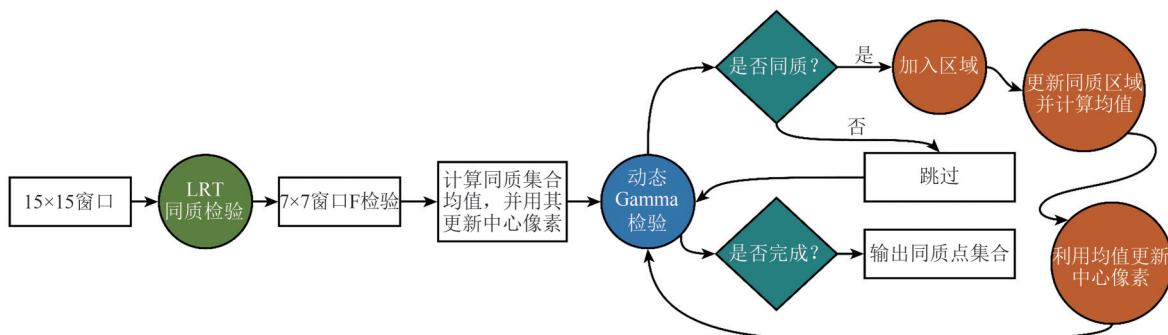


图 1 DCGS 流程图

Fig. 1 Flowchart of the DCGS algorithm

2.1 初始局部同质点集选取

蒋弥等 (2018) 提出利用置信区间替代假设检验进行同质点识别。然而, 该方法估计的参考像素真值是有偏的。奈曼-皮尔逊准则证明似然比检验在相同显著性水平下具有最高的检验功效, 其识别的同质点集中异质像元最少 (Papoulis 和 Pillai, 2002)。因此利用该方法识别的同质点集合估计参考像素真值最接近理论真值。基于此, DCGS 算法采用似然比检验筛选初始同质点集。

DCGS 算法首先在一个尺寸可配置的滑动窗口内执行。设滑动窗口内强度数据立方体为 $I \in \mathbb{R}^{W \times H \times N}$, 其中, W 和 H 为空间维度, N 为时间维度, 即影像数。将中心像素位置记为 (c_x, c_y) 。首先对以 (c_x, c_y) 为中心的 7×7 子窗口内各像素 (i, j) , 计算其与中心像素的强度比:

$$F_{ij} = \frac{S_{ij}}{S_c} = \frac{\sum_{k=1}^N I(ij, k)}{\sum_{k=1}^N I(c_x, c_y, k)} \quad (1)$$

式中, S_{ij} 为位置 (i, j) 的 N 幅影像的强度总和, S_c 为中心像素的 N 幅影像的强度总和。 7×7 的大小为可靠的初始估计提供了足够的空间背景, 同时最大限度地减少来自相邻异质区域的污染。对 F_{ij} 统计量执行 F 检验:

$$(ij) \in \Omega \Leftrightarrow F_{ij} \in [F_{\alpha/2}(2N, 2N), F_{1-\alpha/2}(2N, 2N)] \quad (2)$$

式中, Ω 为初始同质点集合, $F_{\alpha}(d_1, d_2)$ 是自由度为 (d_1, d_2) 的 F 分布在显著性水平 α 下的临界值。利用选取到的初始同质点集合内所有像素的平均值替代中心像素的值, 作为后续区域生长的初始种子点:

$$I'(c_x, c_y, k) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{(ij) \in \Omega} \bar{I}_{ij}, \quad \forall k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中, $\bar{I}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I(i, j, k)$ 为位置 (i, j) 的时间平均强度。

2.2 利用区域生长构建同质点集

基于上节更新后的初始种子点, 初始化生长区域 R 并定义动态统计量:

$$\begin{cases} S_R = \sum_{k=1}^N I'(c_x, c_y, k) & (\text{区域总强度}) \\ n_R = 1 & (\text{区域像素数}) \\ \mu_R = S_R / (n_R \cdot N) & (\text{区域平均强度}) \end{cases} \quad (4)$$

Jiang 等 (2015) 指出, 单视 SAR 影像强度服从指数分布, 其累加和服从伽马分布 G 。因此, 候选像素 (i, j) 当且仅当满足式 (5) 时被接受为同质点, 并由种子点向其进行生长:

$$\bar{I}_{ij} \in \left[\mu_R \cdot \frac{G_{\alpha/2}(N)}{N}, \mu_R \cdot \frac{G_{1-\alpha/2}(N)}{N} \right] \quad (5)$$

式中, \bar{I}_{ij} 为候选像素平均强度, $G_{\alpha}(N)$ 是形状参数 N 、尺度参数 1 的 Gamma 分布在 α 水平下的分位数。

DCGS 算法以 2.1 节更新后的中心像素作为初始种子点, 将其纳入生长区域 R , 并初始化一个先进先出 FIFO (First In First Out) 队列以管理待检验像素。生长过程从该种子点出发, 依次遍历其八邻域像素。八邻域由以下偏移向量定义:

$$N_8 = \{(-1, -1), (-1, 0), (-1, 1), (0, -1), (0, 1), (1, -1), (1, 0), (1, 1)\} \quad (6)$$

对于种子点 (i, j) , 其邻域位置为 $(i + \Delta i, j + \Delta j)$, 其中 $(\Delta i, \Delta j) \in N_8$ 。所有位于有效影像范围内的邻域像素将被加入队列, 作为首批候选对象。生长过程基于广度优先搜索策略逐层推进。算法依次取出队列中的候选像素 x_c , 并依据式 (5) 进行 Gamma 检验, 判断是否将其纳入当前生长区域 R 。若检验通过, 则该像素被纳入 R , 并立即按式 (7) 更新区域动态统计量 μ_R :

$$\begin{cases} n_R \leftarrow n_R + 1 \\ S_R \leftarrow S_R + \sum_{k=1}^N I(ij, k) \\ \mu_R \leftarrow S_R / (n_R \cdot N) \end{cases} \quad (7)$$

随后, DCGS 算法处理新加入像素的八邻域, 将其中既不属于 R 也未在队列中等待检验的像素加入队列尾部。通过这一机制, DCGS 算法得以从初始种子点逐步向外扩展, 确保区域以连贯方式逐步生长。融合区域生长的同质点选取过程详见图 2。

该过程的核心在于区域统计量 μ_R 随生长过程动态更新, 使得同质判定标准能够随区域结构逐步优化, 而非依赖可能存在偏差的初始估计。这一机制显著提升了算法在弱异质区域的鉴别能力与整体鲁棒性。生长迭代持续至 FIFO 队列为空, 表明滑动窗口内所有可达的同质像素均已归入区域 R , 从而获得最终的同质点集合。

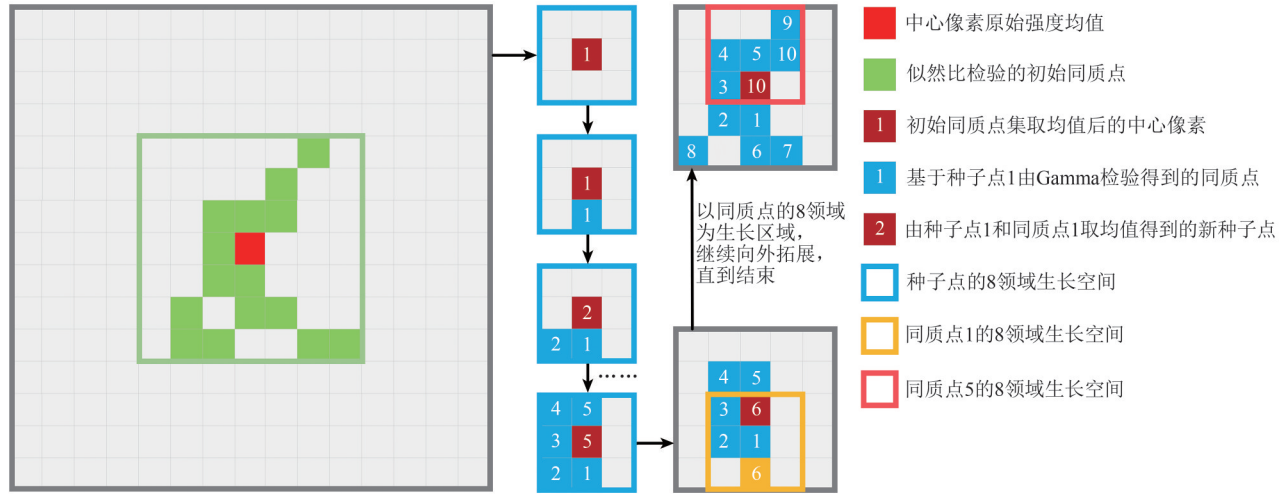


图2 融合区域生长的同质点选取示意图

Fig. 2 Schematic diagram of homogeneous pixel selection integrated with region growing

2.3 基于DCGS的DS-InSAR地表形变解算

通过DCGS方法得到的同质点集合 Ω_{DCGS} 为候选DS点集合，还需要排除同质点较少的点（这些点通常为永久散射体目标，不对其进行相位优化），可以通过以下条件进行初步选择：

$$\Omega_{DCGS}^{new} \leftarrow \Omega_{DCGS} > 20 \quad (8)$$

式中， Ω_{DCGS}^{new} 为初始DS点选择结果。在同质点选取步骤完成后，还需要进行相位优化操作。在本研究中，采用基于协方差矩阵的特征值分解方法（Fornaro等，2015）来优化原始相位，并通过计算时间相干性 γ 作为最终DS点选取的评价指标：

$$\gamma = \frac{2}{N(N-1)} \cdot \text{Re} \left(\sum_{m=1}^N \sum_{n>m}^N \exp \left(j \left(\varphi_{m,n} - \left(\hat{\theta}_m - \hat{\theta}_n \right) \right) \right) \right) \quad (9)$$

式中， $\varphi_{m,n}$ 为样本相干矩阵SCM（Sample Coherence Matrices）的第 m 行第 n 列处的干涉相位， $\hat{\theta}_m$ 和 $\hat{\theta}_n$ 分别为特征值分解估计得到的第 m 和第 n 幅SLC的相位， N 为时序影像数， γ 为后验相干性。

筛选后验相干性 >0.6 且同质像素数 ≥ 20 的候选点作为最终的DS点，将其与振幅离差指数ADI（Amplitude Deviation Index） <0.4 的PS点目标进行融合。采用StaMPS流程进行时间序列形变估计（Hooper等，2007），并通过消除大气和轨道误差，最终获得所有点目标的地表形变信息。

3 实验设计

3.1 模拟实验

本研究采用蒙特卡洛模拟方法评估各种同质

点选取算法的性能。实验基于一个 15×15 像素网格，该网格被划分为两个统计特性不同的区域：一个 15×8 区域，其幅度真值参数设定为 σ_1 ；一个 15×7 区域，其幅度真值参数设定为 σ_2 。通过在 σ_1 和 σ_2 之间设置不同的比值来模拟像素异质性：比值 σ_1/σ_2 以0.1为增量从1变化至3。参考像素固定于网格中心位置[8]，其余224个像素作为待测像素。为模拟实际观测条件，所有像素的幅度数据均被叠加了独立同分布的瑞利噪声。为客观比较各算法的计算效率，本文算法均在MATLAB R2024a环境中实现与测试，运行平台为配备Intel i7-13650HX处理器及32 GB内存的Windows x64计算机。

在复圆高斯分布假设下，设定零假设（ H_0 ）为待测像素与参考像素同质（即具有相同 σ ），备择假设（ H_1 ）为异质。对于每一个给定的比值 σ_1/σ_2 ，执行以下蒙特卡洛试验：在样本量 N 从10个增加到60个的条件下，分别从参数为 σ_1 和 σ_2 的瑞利分布总体中，模拟生成对应区域所有像素的加噪幅度序列。然后，应用KS、BWS、GLRT、HTCI和DCGS算法逐一对待测像素与参考像素进行相似性比较。记录每次试验中算法正确拒绝 H_0 （即判定为异质）的决策结果。此过程独立重复10000次，计算每种算法在该对比度条件下拒绝 H_0 的百分比。最终，通过系统改变比值 σ_1/σ_2 ，获得各算法在不同异质程度下的功效均值及其平均标准差（STD）曲线（图3）。这种系统的方法确保了在不同像素同质性条件下对算法性能的鲁棒性评估。

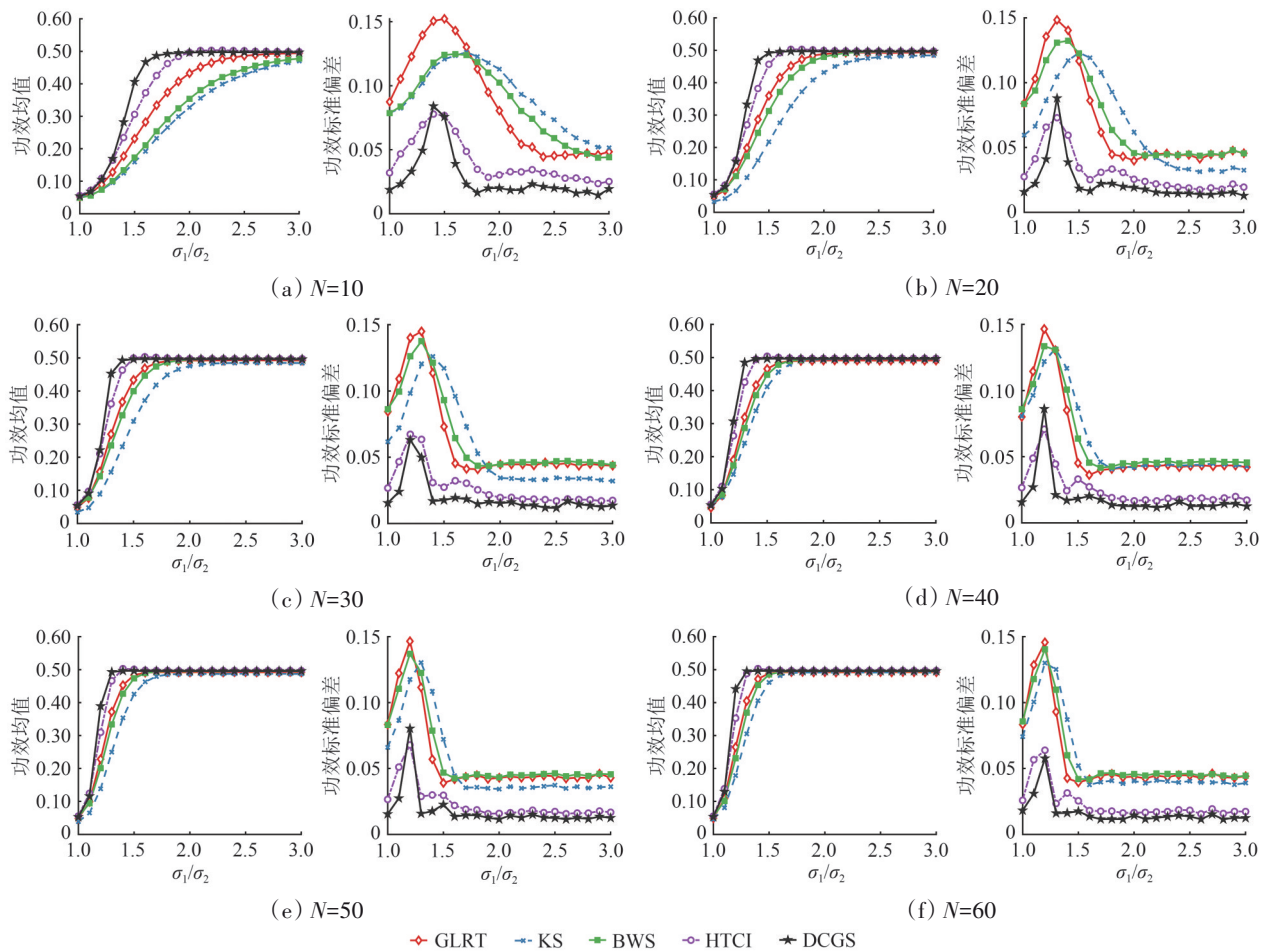


图3 6种不同影像数量下的功效均值和功效标准差对比

Fig. 3 Comparison of power mean and power standard deviation under different numbers of SAR images

理论上，被识别为异质的像素的比例预计为 $(15 \times 7 + \alpha \times 15 \times 8) / 225$ ，实验设置显著性水平 α 为 0.05，则真实功效为 49.33%。

如图3所示：在对比度较低时，DCGS的功效均值最高，显示出对两类错误的有效控制；另外，DCGS的标准差最小且最稳定，证明了其可靠性。由图3(a)可见，在对比度为2左右时，DCGS的功效均值更接近于真实功效，而HTCI略超过真实功效，反映出DCGS对一类误差的控制效果较好。在不同样本下，DCGS在收敛前始终达到最高的功效均值，证明其在像素类型差异小的情况下的有效性，并且随着样本数量的减少，DCGS对于小样本和低对比度情况的表现越加明显。在收敛时，DCGS更接近真实功率，在精度上超过了HTCI方法，并且对样本数量变化相对不敏感。图4为当样本为10时BWS、HTCI和DCGS算法的功效均值对比，展示了不同对比度下算法拒绝率的统计分布，包括四分位距、中位数、箱须（上、下边缘）、平均功效（实心点）以及真实功效（水平虚线），可

以更直观的看出DCGS的性能优势。

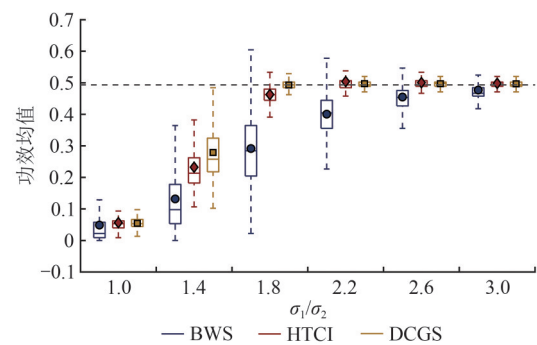


图4 BWS、HTCI和DCGS算法的功效均值对比

Fig. 4 Power mean comparison among BWS, HTCI, and DCGS algorithms

针对图3中DCGS算法的功效标准偏差值在对比度在1.0—1.5时出现高于HTCI算法的现象，将 $N=20$ 以及 $N=40$ 时BWS、HTCI和DCGS算法的功效均值进行对比（图5(a)和(c)）以及功效均方根误差进行对比（图5(b)和(d)）。可见：(1) 尽管DCGS算法的标准偏差略高于HTCI算法，但其功

效均值更接近理论值，10000次实验结果分布也显示出更好的理论一致性；(2) 从均方根误差指标

看，DCGS算法精度分别提升21.8%和15.1%，验证了其性能优势。

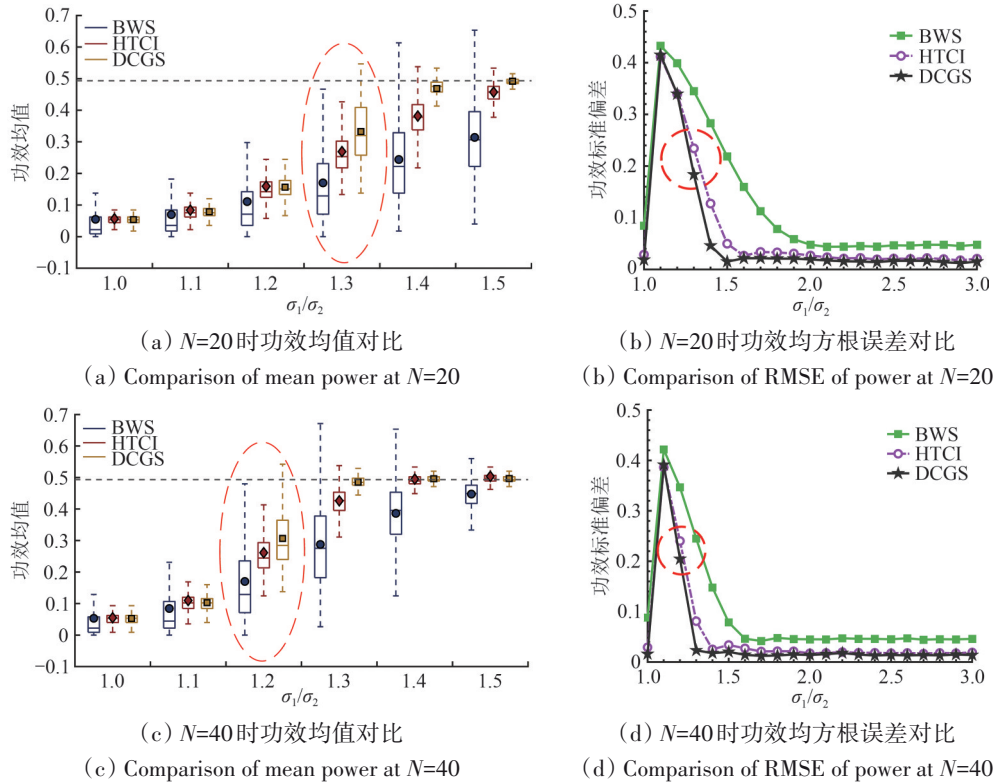


图5 BWS、HTCI和DCGS算法的功效均值及其均方根误差对比

Fig. 5 Power mean and RMSE comparison of BWS, HTCI, and DCGS algorithms

为了进一步的比较分析，收集了上述5种算法在6个样本条件下收敛状态时的功效均值标准差和算法运行时间的统计数据（表1）。由表1可见DCGS算法在不同样本下同质点选择具有最高的精度。其中：相较于GLRT、KS、BWS、HTCI这4种对比算法，DCGS算法的平均精度分别提高了68.4%、63.2%、67.9%和10.7%。此外，当样本数

量为60时，BWS运行时间最慢，为585.0 s，KS算法第二慢，为510.2 s；GLRT和HTCI运行时间分别为9.5 s和11.3 s；DCGS算法耗时74.2 s，略逊于GLRT和HTCI算法，但是仍显著优于KS和BWS算法。总之，DCGS算法所耗时长可以接受，且可以通过优化代码以实现加速算法运行。

表1 不同影像数下收敛状态时的算法功效标准差及运行时间对比

Table 1 Comparison of algorithm efficacy standard deviation and runtime in convergence state under different numbers of images

| 算法 | 功效标准差 | | | | | | N=60时运行总时间/s |
|------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| | N=10 | N=20 | N=30 | N=40 | N=50 | N=60 | |
| DCGS | 0.0159 | 0.0156 | 0.0146 | 0.0135 | 0.0136 | 0.0136 | 74.2 |
| GLRT | 0.0450 | 0.0476 | 0.0456 | 0.0440 | 0.0478 | 0.0449 | 9.5 |
| KS | 0.0508 | 0.0332 | 0.0337 | 0.0414 | 0.0365 | 0.0404 | 510.2 |
| BWS | 0.0431 | 0.0468 | 0.0456 | 0.0435 | 0.0466 | 0.0450 | 585.0 |
| HTCI | 0.0242 | 0.0194 | 0.0186 | 0.0164 | 0.0184 | 0.0166 | 11.3 |

注：加粗数值表示该指标在所有对比算法中表现最优。

综上，与GLRT、KS、BWS、HTCI算法相比，本文所提出的DCGS算法有效地降低了假设检验引

起的同质点选取误差，有效提高了同质点选取结果的可靠性。同时，所提算法在任意样本下表现

最优，可以应用于其他场景。

3.2 真实实验

3.2.1 研究区域

通过覆盖中国河北省雄安地区的 Sentinel-1 卫星 SAR 数据，进一步验证该算法的有效性。研究区概况图及 4 种典型地物类型的光学影像详见图 6。可见研究区域存在多种土地覆盖类型，包括建筑

物、林地、农田、草地和道路等。这些土地覆盖类型具有多样的散射机制，适合研究 DS 目标的干涉相位。本研究共获得 2021 年 7 月 22 日—2022 年 4 月 24 日的 22 幅 SAR 图像，并裁剪至 1400 像素×2000 像素，使用 2021 年 12 月 13 日获取的参考 SLC 数据生成 21 景干涉图并使用 30 m 分辨率的 SRTM 数字高程模型从干涉图中去除地形相位。

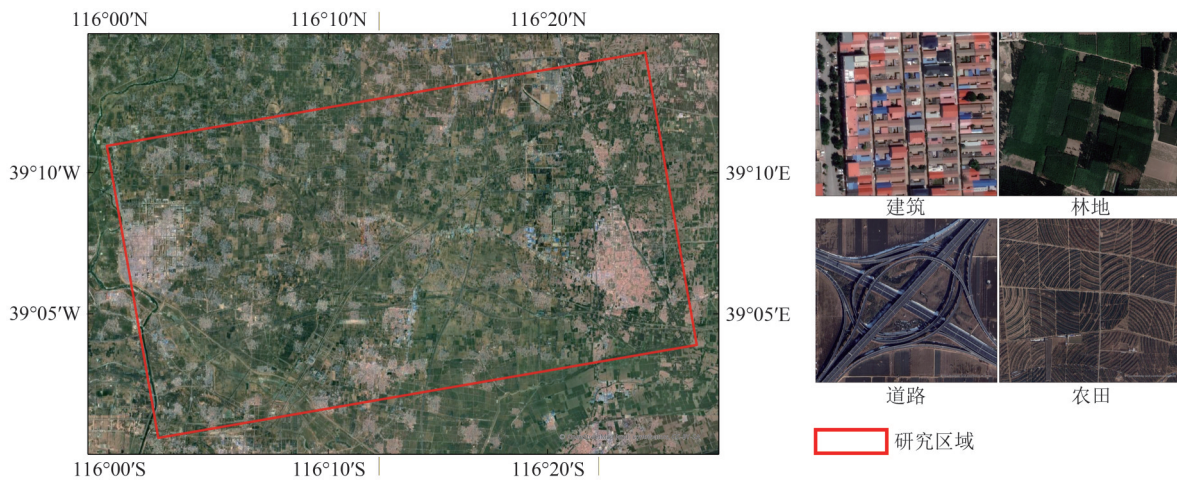


图 6 研究区域概况图及 4 种典型地物类型光学影像

Fig. 6 Study area overview map and optical images of four typical land cover types

3.2.2 不同算法对同质点选取结果分析

从蒙特卡洛模拟实验分析可知，在非参数检验中，BWS 优于 KS；在参数检验中，HTCI 超过了 GLRT。因此，本研究选取最具代表性的 BWS 和 HTCI 算法与所提出的 DCGS 算法进行比较，以全面评估本文方法的性能。

通常，稀疏植被和裸露的土地包含更多的同质像素，而建构物大多是 PS 目标，包含较少的同质像素。因此，利用 SAR 强度图可以初步识别包含许多同质像素的区域，从而辅助验证 SHPs 结果的准确性。研究区的 SAR 强度图如图 7 (a) 所示，可见其中 A 点所在的大部分区域为密集的建筑群，因此主要是 PS 目标。理论上，在该区域选择的同质像素数量相对较少。B 点区域为道路交叉口，DS 点和 PS 点混杂，道路与植被纹不易区分，可有效验证算法性能。C 点所在区域多为裸地、农田或者稀疏植被，是典型的 DS 目标。图 7 (b) — (d) 分别给出了在滑动窗口为 [15]，显著性水平为 0.05 的参数条件下，BWS、HTCI 以及 DCGS 算法选择的 SHP 结果。可见：BWS 选取的

同质点数量最多，每个中心像素的平均 SHP 数最大；其次是 DCGS 和 HTCI，分别为 139、113 和 107。对比可以看出，DCGS 和 HTCI 在密集建筑物群选择了更少的 SHP，而 BWS 则依旧选择了较多的 SHP，这意味着 BWS 的 SHPs 结果中包含了较多的异质像素，具有更高的 II 类错误。此外，DCGS 在道路与植被混杂区域表现出更加清晰地区分度；HTCI 方法次之，BWS 则误选了过多的异质点，无法有效区分道路与植被。

为了进一步说明 BWS、HTCI 以及 DCGS 的 SHPs 结果，在实验中选择代表点 A、B、C 作为中心像素，并使用上述算法获得不同中心像素的 SHPs 结果，详见图 8。可见：代表点 A 所在区域大多是 PS 目标，因此理论上 SHPs 数量应该接近于零，而 DCGS 在该区域获得的 SHP 数量是最低的，这与理论情况匹配。当估计窗口包含道路和植被时，DCGS 可以有效区分道路和植被覆盖区域，而 HTCI 与 BWS 的 SHP 中包含较多异质像素。在 DS 分布较广的植被覆盖区域，DCGS 选择的像素最多，HTCI 与 BWS 选择的同质像素较少。

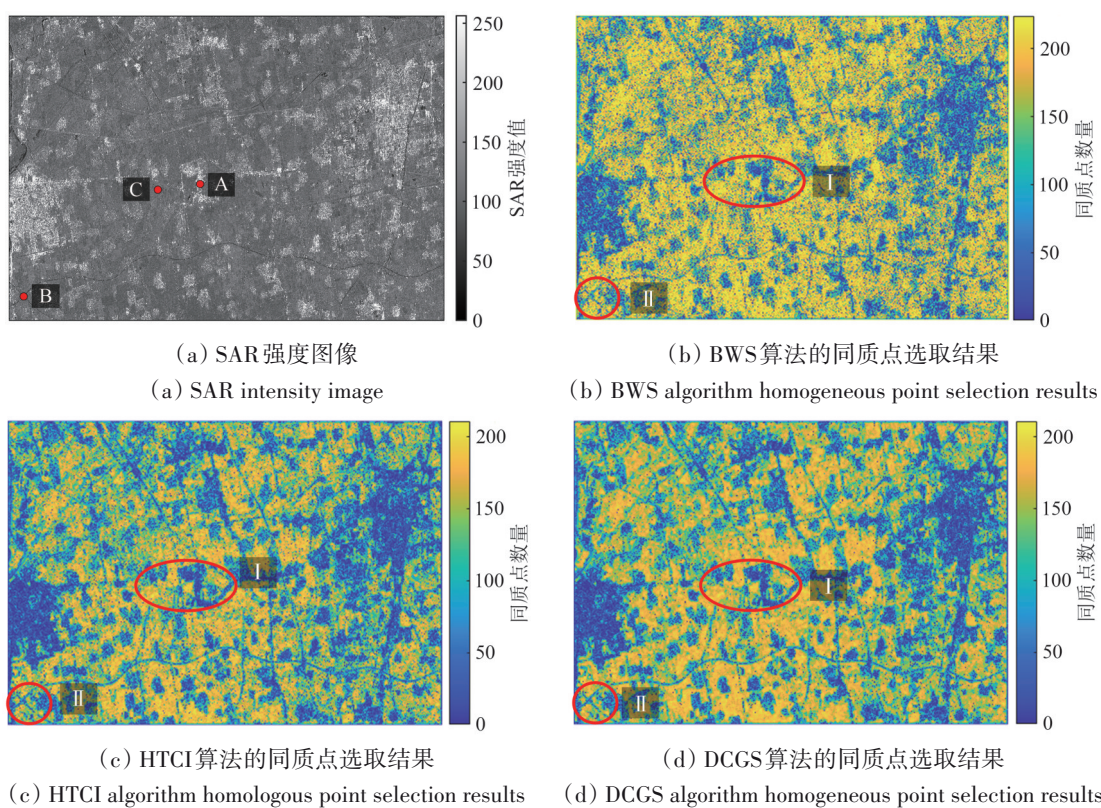


图7 SAR强度图像和不同算法获得的同质点(A、B、C分别为建筑物区域(红圈 I)、道路与植被混合区域(红圈 II)和植被区域(红圈 I)的特征)

Fig. 7 SAR intensity image and homologous points obtained by different algorithm (Characteristics of A, B, and C correspond to the building area (red circle I), the road-vegetation mixed area (red circle II), and the vegetation area (red circle I), respectively)

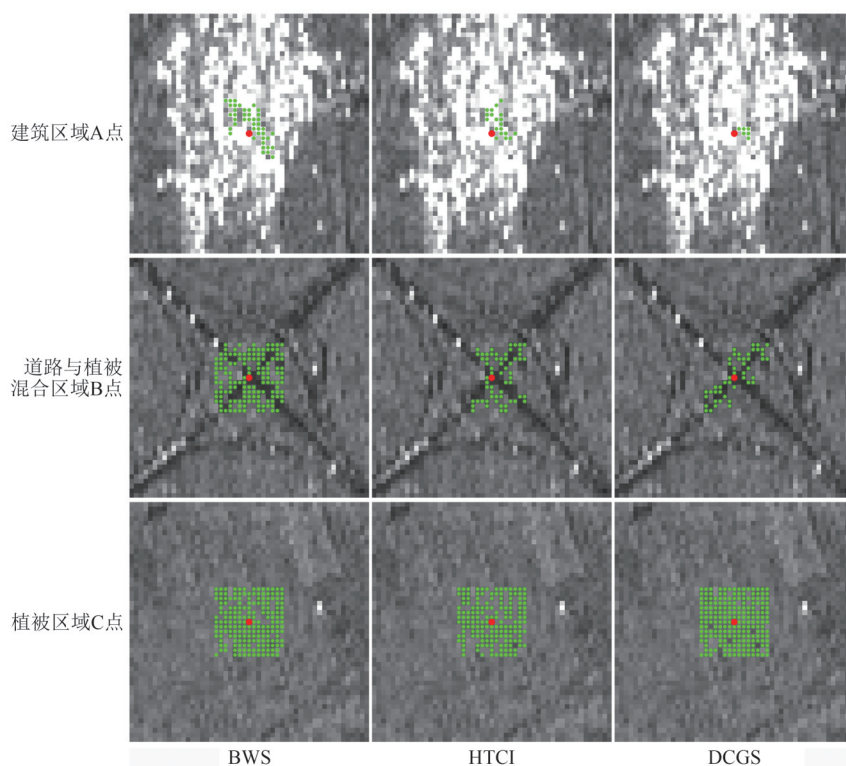


图8 不同地物类型区域不同算法识别的同质像素数对比结果(红色点表示选取的具有代表性的中心像素; 绿色点表示红色点在局部窗口中的同质像素)

Fig. 8 Comparison results of homologous pixel counts selected by different algorithms for different land-cover-type regions (The red dots indicate selected representative central pixels; the green dots represent the homologous pixels of the red dots within the local window)

综上, 尽管BWS和HTCI在某些场景(如建筑区域)选择了较多的同质像素, 但是所选像素中包含较多的异质像素, 因此结果并不可靠。此外, 在多个场景中, 使用DCGS获取的同质像素集与实际情况最为一致, 因此得到的同质点结果更加清晰平滑。因此, DCGS算法可以有效平衡I类错误和II类错误, 并最大程度的包含所有的同质像素。对比HTCI和BWS, DCGS算法获得的结果更加稳健可靠。

3.2.3 不同算法识别同质点后的相位优化效果分析

为进一步对比HTCI和DCGS两种算法, 在识别SHPs (Statistically Homogeneous Pixels Set) 后, 采用协方差矩阵分解法进行同质点相位优化, 并使用相位差之和SPD (Sum of the Phase Differences) (Li等, 2004)、相位标准差PSD (Phase Standard Deviation) (Goldstein和Werner, 1998) 以及残差点数RPN (Residue Point Number) (Blanco等, 2006) 指标定量评价两种算法的性能。PSD是衡量相位数据可靠程度的全局性指标, 代表了相位的差异, 值越小表明相位优化后的干涉图更光滑; SPD用于测量中心像素和周围像素之间的相位梯

度, 是每个像素的绝对相位差(APD)之和, 理想情况下, SPD趋于零; RPN直接指出了相位图中会导致解缠失败的具体位置, 是干涉图中相邻4个像元按某一方向的相位差之和不为零的点, 该点越少, 表示干涉图质量越高。PSD、SPD以及RPN的表达式分别为

$$\text{PSD} = \sum \left\{ \frac{\sum_s [\varphi(i,j) - \bar{\varphi}(i,j)]^2}{s-1} \right\}^{1/2} \quad (10)$$

$$\text{APD}_{\text{local}}(i,j) = \frac{1}{8} \sum_{l=-1}^1 \sum_{k=-1}^1 |\varphi(i,j) - \varphi(i+l, j+k)| \quad (11)$$

$$\text{SPD}_{\text{whole}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \text{APD}_{\text{local}}(i,j) \quad (12)$$

$$\text{RPN} = \sum_{k=1}^4 \text{mod}(\Delta_k) \quad (13)$$

式中, $\varphi(i, j)$ 是所选滑动窗内各像元的相位值, $\bar{\varphi}(i, j)$ 是所选滑动窗口内像元的相位平均值, s 是滑动窗口中的像元数, $m \times n$ 是干涉图的图像大小, $\text{mod}(\cdot)$ 是对 2π 取模, Δ_k 为干涉图中相邻4个像元的相位差之和。图9给出了真实实验中各干涉图序列在滑动窗口为7时的PSD、SPD以及RPN的统计结果; 表2为上述3种算法各项指标的均值统计。

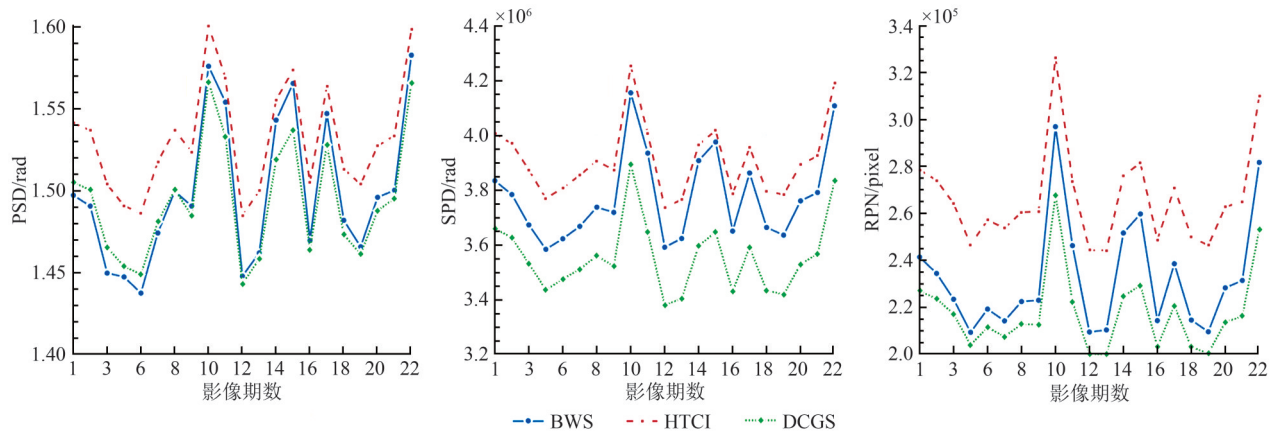


图9 不同算法识别同质点后的PSD、SPD及RPN统计结果对比

Fig. 9 Comparison of PSD, SPD, and RPN statistical results after homogeneous point selection by different algorithms

表2 不同算法相位优化指标的均值统计结果对比

Table 2 Comparison of mean statistics of phase optimization indicators for different algorithms

| 算法 | PSD | SPD/ 10^6 | RPN/ 10^5 |
|------|-------------|-------------|-------------|
| BWS | 1.50 | 3.78 | 2.32 |
| HTCI | 1.53 | 3.91 | 2.67 |
| DCGS | 1.49 | 3.56 | 2.18 |

注:加粗数值表示最优结果。

由图9和表2可知: DCGS显著降低了原始图像的PSD、SPD以及RPN指标, 证明相位优化后的干涉相位更平滑, 相位质量更好; 相比于HTCI算法, DCGS的PSD、SPD以及RPN指标分别实现了2.6%、8.9%和18.4%性能提升。因此, 与HTCI和BWS相比, DCGS在保留相位信息和提高相位平滑度方面保持了更好的平衡, 而且为后续分布式目标时序形变解算提供了更优的相位信息, 有利于

解算结果的准确度。

后验相干性是衡量相位优化质量的重要指标，常被用于选择DS点。像素点的后验相干性可以通过式(8)计算。图10显示了BWS、HTCI以及DCGS的后验相干性全局分布曲线图。可以看出，3种方法的后验相干性曲线趋势相同，但在局部相干性区间存在差异：(1)高相干性区间(后验相干性 $\gamma > 0.95$)处表明HTCI方法后验相干性最高，其次是DCGS以及BWS。这是因为HTCI方法将部分DS点像素错误识别成PS点像素，导致最终识别的候选DS点数目最少，因此在后续流程中未被处理的像素点也较多，而这部分未处理的点的后验相干性均设为1(Zhang等, 2024)。这一结论与3.2.2节分析一致。(2)中高相干性区间($0.5 < \gamma < 0.9$)处BWS的后验相干性要高于HTCI和DCGS，这是因为BWS方法识别的候选DS点中存在较多包含建筑物、道路等的像素，因此在中高相干性区间处后验相干性较高。

3.2.4 沉降结果分析

图11为在相同实验条件下利用BWS、HTCI以及DCGS改进DS-InSAR方法和StaMPS方法得到研究区域的地表年平均形变速率。可见4种方法的全局形变趋势一致，从侧面说明监测结果的可靠性。本文方法最大年平均沉降速率为 -127.7 mm/a，StaMPS方法的最大年平均沉降速率为 -91.1 mm/a，BWS DS-InSAR方法最大年平均沉降速率为 -93.3 mm/a，HTCI DS-InSAR方法最大年平均沉降速率为 -102.5 mm/a。此外，StaMPS方法共计得到的57242个地表监测点，相比之下，

DCGS DS-InSAR方法共计得到638564个地表监测点，测点密度提高了10.2倍，地表形变细节更加清晰。

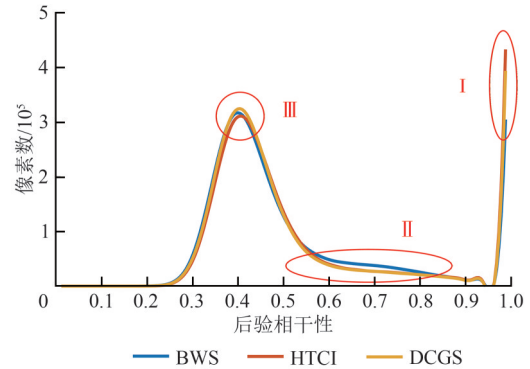
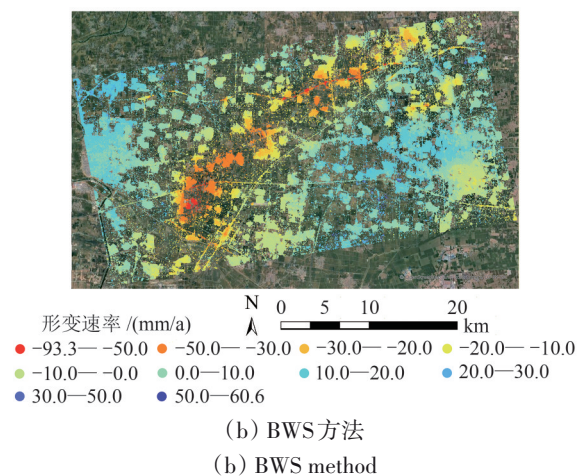
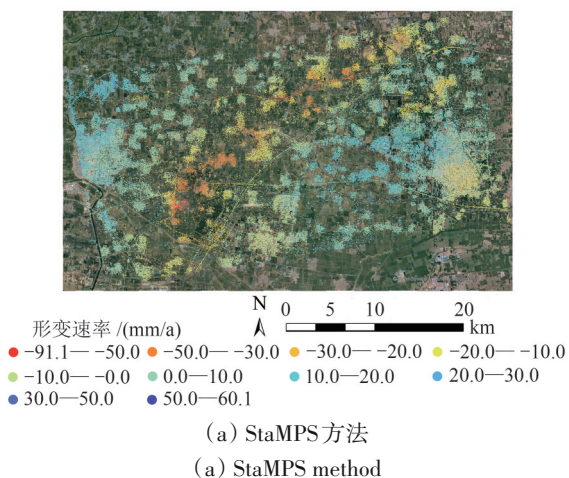


图10 不同算法的后验相干性全局分布曲线对比(I、II和III分别代表高相干性区间($\gamma > 0.95$)、中高相干性区间($0.5 < \gamma < 0.9$)和低相干性峰值区)

Fig. 10 Comparison of posterior coherence global distribution curves for different algorithms (High coherence interval ($\gamma > 0.95$), medium-high coherence interval ($0.5 < \gamma < 0.9$), and low coherence peak region)

图12和图13为DCGS与BWS、以及DCGS与HTCI的地表年平均形变速率直方图。可见BWS算法的形变速率大多 -90 — 60 mm/a，HTCI算法 -100 — 80 mm/a(图12)；相比之下，DCGS算法的结果覆盖范围更广，为 -128 — 100 mm/a，并在 -128 — -100 mm/a以及 80 — 100 mm/a这两个区间内监测到了其他算法未能捕捉到的形变信息(图13)。上述结果表明本文方法具备更宽的形变速率探测范围，并检测到了新的形变模式。此外，在大多数形变速率区间中，DCGS算法所识别出的数据点数量也明显多于对比算法。



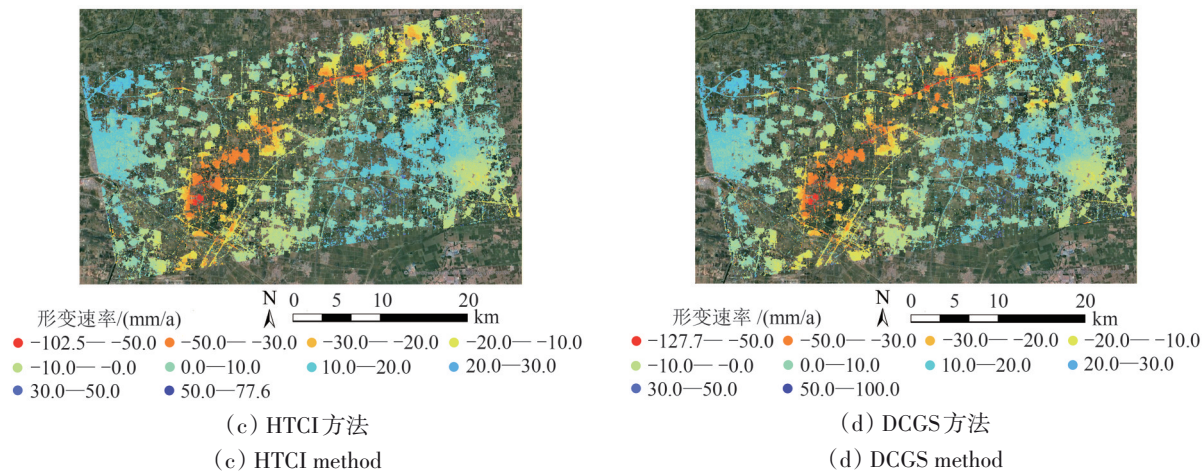


图 11 4种不同方法解算的地表年平均形变速率

Fig. 11 Annual average surface deformation rates derived from four different methods

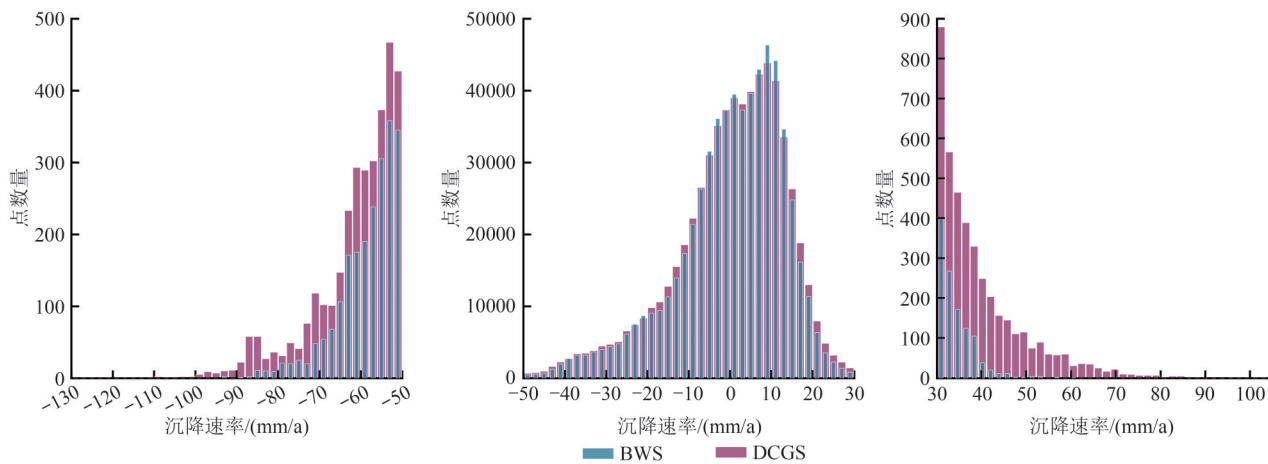


图 12 DCGS和BWS的地表年平均形变速率直方图

Fig. 12 Histograms of annual average surface deformation rates for DCGS and BWS

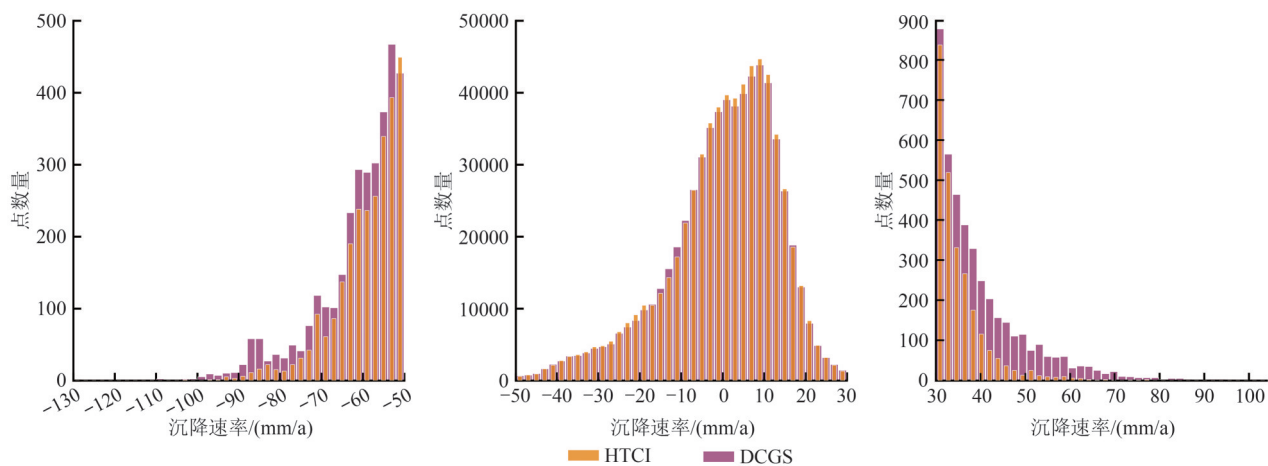


图 13 DCGS和HTCI的地表年平均形变速率直方图

Fig. 13 Histograms of annual average surface deformation rates for DCGS and HTCI

4 结 论

为解决现有同质点选取算法在小样本及弱异质场景下鲁棒性差、难以平衡计算效率与精度的问题, 本研究提出了一种融合区域生长的动态同质像元选取算法, 并利用蒙特卡洛模拟实验和河北省雄安新区的 Sentinel-1 影像进行验证。主要结论如下:

(1) 蒙特卡洛模拟实验表明, 相较于 GLRT、KS、BWS 和 HTCI, DCGS 在低对比度情况下减少了两类错误, 且在有限影像条件下也能实现更高的平均功率和更低的平均标准差。此外, 对于不同影像数, DCGS 均取得最优性能, 表明本文算法对样本数量变化具有更好的鲁棒性。

(2) 对于河北省雄安新区的 Sentinel-1 影像, DCGS 得到的同质点选取结果最为清晰, 能在保证精度条件下识别更多的同质点 (点密度较 StaMPS 方法提高 10.2 倍)。在噪声抑制和分辨率保持方面, DCGS 算法要优于 BWS 和 HTCI 算法, 其 SPD、PSD 以及 RPN 指标均取得最低。

(3) 尽管 DCGS 计算速度略慢于 HTCI, 但准确性和鲁棒性的提高证明了牺牲计算效率是合理的。

参考文献 (References)

- Baumgartner W, Weiß P and Schindler H. 1998. A nonparametric test for the general two-sample problem. *Biometrics*, 54(3): 1129 [DOI: 10.2307/2533862]
- Blanco P, Mallorqui J, Duque S and Navarrete D. 2006. Advances on DInSAR with ERS and ENVISAT data using the coherent pixels technique (CPT)//2006 IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing. Denver: IEEE: 1898-1901 [DOI: 10.1109/IGARSS.2006.490]
- Chen B Q, Yang J L, Li Z H, Yu C, Yu Y, Qin L, Yang Y and Yu H. 2023. A new sequential homogeneous pixel selection algorithm for distributed scatterer InSAR. *GIScience and Remote Sensing*, 60(1): 2218261 [DOI: 10.1080/15481603.2023.2218261]
- Even M and Schulz K. 2018. InSAR deformation analysis with distributed scatterers: a review complemented by new advances. *Remote Sensing*, 10(5): 744 [DOI: 10.3390/rs10050744]
- Fan H D, Liu Y F, Xu Y Z and Yang H L. 2022. Surface subsidence monitoring with an improved distributed scatterer interferometric SAR time series method in a filling mining area. *Geocarto International*, 37(25): 8979-9001 [DOI: 10.1080/10106049.2021.2007300]
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks:

- SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]
- Fornaro G, Verde S, Reale D and Paucillo A. 2015. CAESAR: an approach based on covariance matrix decomposition to improve multibaseline-multitemporal interferometric SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(4): 2050-2065 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2352853]
- Goldstein R M and Werner C L. 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25(21): 4035-4038 [DOI: 10.1029/1998GL900033]
- Hooper A, Segall P and Zebker H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07407 [DOI: 10.1029/2006JB004723]
- Huang J L, Su X N, Shi R J, Bao Q H, Zhao L and Xu W X. 2024. Temporal and spatial characteristics of ground subsidence in Wuwei City based on PS-InSAR technology. *Chinese Journal of Geology*, 59(2): 575-587 (黄家乐, 苏小宁, 石睿娟, 鲍庆华, 赵立, 徐炜祥. 2024. 基于 PS-InSAR 技术的武威市地面沉降时空变化特征. *地质科学*, 59(2): 575-587) [DOI: 10.12017/dzqx.2024.040]
- Jiang M, Ding X L, Hanssen R F, Malhotra R and Chang L. 2015. Fast statistically homogeneous pixel selection for covariance matrix estimation for multitemporal InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(3): 1213-1224 [DOI: 10.1109/TGRS.2014.2336237]
- Jiang M, Ding X L and Li Z W. 2014. Hybrid approach for unbiased coherence estimation for multitemporal InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5): 2459-2473 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2261996]
- Jiang M, Ding X L and Li Z W. 2018. Homogeneous pixel selection algorithm for multitemporal InSAR. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(12): 4767-4776 (蒋弥, 丁晓利, 李志伟. 2018. 时序 InSAR 同质样本选取算法研究. *地球物理学报*, 61(12): 4767-4776) [DOI: 10.6038/cjg2018L0490]
- Lee J S and Pottier E. 2009. *Polarimetric Radar Imaging: from Basics to Applications*. Boca Raton: CRC Press [DOI: 10.1201/9781420054989]
- Li Y X, Zhang Y, Su X J, Zhao F M, Liang Y W, Meng X M and Jia J. 2021. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 677-690 (李媛茜, 张毅, 苏晓军, 赵富萌, 梁懿文, 孟兴民, 贾俊. 2021. 白龙河流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究. *遥感学报*, 25(2): 677-690) [DOI:

- 10.11834/jrs.20210094]
- Li Z L, Zou W B, Ding X L, Chen Y Q and Liu G X. 2004. A quantitative measure for the quality of InSAR interferograms based on phase differences. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(10): 1131-1137 [DOI: 10.14358/PERS.70.10.1131]
- Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 332-341 (廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. *遥感学报*, 25(1): 332-341) [DOI: 10.11834/jrs.20210162]
- Marozzi M. 2013. Nonparametric simultaneous tests for location and scale testing: a comparison of several methods. *Communications in Statistics-Simulation and Computation*, 42(6): 1298-1317 [DOI: 10.1080/03610918.2012.665546]
- Ming X Y, Tian Y C, Zhang Q, Tao J, Zhang Y L and Lin J L. 2024. Monitoring and analysis of surface deformation of tidal flat in Maowei Sea on the basis of sentinel active and passive remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(9): 2306-2319 (明小勇, 田义超, 张强, 陶进, 张亚丽, 林俊良. 2024. 基于哨兵主被动遥感的茅尾海潮滩地表形变监测与分析. *遥感学报*, 28(9): 2306-2319) [DOI: 10.11834/jrs.20232468]
- Niu Y F. 2022. Applications of SAR interferometry for co-seismic, interseismic and volcano deformation monitoring, modeling and interpretation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(3): 471 (牛玉芬. 2022. 基于InSAR技术的地震构造和火山形变获取及模型解译研究. *测绘学报*, 51(3): 471) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20200528]
- Papoulis A and Pillai S U. 2002. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, Fourth Edition. Europe: Mc Graw-Hill
- Yang M S, Liao M S, Chang L and Hanssen R F. 2023. Interpretation of multi-epoch InSAR deformation for urban scenes: a problem analysis and literature review. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(10): 1643-1660 (杨梦诗, 廖明生, 常玲, Hanssen R F. 2023. 城市场景时序InSAR形变解译: 问题分析与研究进展. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(10): 1643-1660) [DOI: 10.13203/j.whugis20230289]
- Yu J R, Lai T, Huang H F and Mo Y H. 2025. WSHT algorithm for improved SHP selection in DS-InSAR: robust performance across sample sizes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22: 4002305 [DOI: 10.1109/LGRS.2024.3516354]
- Zhang Z Y, Yan S Y, Zhang H L and Zhao F. 2024. Nonlocal phase linking for distributed scatterer interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5201913 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3347562]
- Zhou J, Li Z, Guo X T, Li Y, Wu Z H and Zhu L Y. 2019. Evidences for replacing legacy per- and polyfluoroalkyl substances with emerging ones in Fen and Wei River basins in central and western China. *Journal of Hazardous Materials*, 377: 78-87 [DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.050]
- Zhu J J, Yang Z F and Li Z W. 2019. Recent progress in retrieving and predicting mining-induced 3D displacements using InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(2): 135-144 (朱建军, 杨泽发, 李志伟. 2019. InSAR矿区地表三维形变监测与预计研究进展. *测绘学报*, 48(2): 135-144) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180188]

Dynamic homogeneous pixel selection algorithm integrated with region growing

LI Jian, FAN Hongdong, TIAN Zeming, WANG Jun

School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

Abstract: Homogeneous pixel selection constitutes a fundamental preprocessing stage in distributed scatterer interferometric synthetic aperture radar (DS-InSAR), exerting a direct influence on the precision and dependability of subsequent phase unwrapping procedures. Conventional methodologies encounter limitations, including diminished performance with restricted image stacks and inherent difficulties in reconciling Type I/Type II error trade-offs. This research presents a novel algorithmic framework specifically designed to enhance the robustness and accuracy of homogeneous pixel identification across variable sample sizes and heterogeneous scene characteristics.

The proposed Dynamic Center Growing Selector (DCGS) algorithm synergistically combines region-growing methodology with rigorous statistical hypothesis testing protocols. The computational workflow comprises three sequential stages. At the first stage, locally homogeneous pixel subsets are identified within 7×7 analysis windows through likelihood ratio testing (F-test). The mean intensity value derived from this preliminary subset subsequently replaces the central pixel magnitude to establish a robust seed point. At the second stage, adaptive region expansion is implemented using gamma distribution testing. Commencing from the validated seed pixel, eight-connected neighborhood pixels undergo iterative evaluation via breadth-first search methodology. A dynamically updated statistical parameter enables real-time adaptation during region growth, ensuring precise boundary delineation. At the third stage, the fully developed spatial region

constitutes the definitive homogeneous pixel set. This algorithmic architecture minimizes the dependency on potentially skewed initial reference values while optimizing discrimination capability in regions exhibiting subtle heterogeneity.

Monte Carlo simulations conducted under six sample sizes ($N=10$ to 60) demonstrated that DCGS achieved an average standard deviation of 0.014, outperforming the generalized likelihood ratio test, Kolmogorov-Smirnov test, Baumgartner-Weiss-Schindler test, and Hypothesis Test of Confidence Interval (HTCI) by 68.4%, 63.2%, 67.9%, and 10.7%, respectively. In real-data experiments utilizing 22 Sentinel-1 images from the Xiong'an area, Hebei Province, DCGS generated superior homogeneous pixel maps with distinct differentiation of roads, vegetation, and buildings. Quantitative assessment of phase optimization quality revealed that DCGS attained minimal values in the sum of phase differences, phase standard deviation, and residue point number, exceeding HTCI's performance by 2.6%, 8.9%, and 18.4%, respectively. Furthermore, DCGS-based DS-InSAR processing enhanced the point density by a factor of 10.2 relative to the StaMPS method and detected deformation signals within ranges (i. e., -128 mm/a to -100 mm/a and 80 mm/a to 100 mm/a) undetectable by alternative approaches.

The proposed DCGS algorithm substantially enhances accuracy and robustness in homogeneous pixel selection for DS-InSAR applications. It exhibits exceptional performance in low-contrast, small-sample scenarios through improved control of Types I and II errors. Although the proposed algorithm is computationally less efficient than parametric methods, such as HTCI, its substantial improvements in selection precision, phase optimization quality, and deformation monitoring resolution justify this trade-off. This methodology demonstrates considerable potential for reliable surface deformation monitoring in complex environments characterized by diverse scattering mechanisms.

Key words: distributed scatterers, DS-InSAR, homogeneous pixel selection, region growing, non-parametric hypothesis test, deformation monitoring

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42274054); Regional Development Innovation Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. U23A20598)