

# 基于尺度不变特征变换的宽幅遥感影像 云阴影检测方法

李彩红<sup>1</sup>, 黄军杰<sup>2</sup>

(1. 西安思源学院 电子信息工程学院, 西安 710038;

2. 西安思源学院 基础部, 西安 710038)

**摘要:** 遥感影像中云阴影的尺度因拍摄高度、云层厚度等因素变化, 使得在不同拍摄角度下, 不能及时适应云阴影的尺度变化, 导致不能准确检测云阴影; 为此, 对基于尺度不变特征变换的检测方法展开了研究; 采用 SIFT 算法和梯度直方图对云阴影进行特征点提取; 根据提取的特征点, 计算每个特征点的 SIFT 描述子, 并对参考图像中的云阴影特征点的 SIFT 描述子进行标准化处理, 从而计算出 SIFT 描述子之间的间距; 采用云阴影区域灰度补偿的方法, 平衡不同光线条件下的影像质量, 并引入均方误差对经灰度补偿后的结果进行检验, 完成云阴影的检测; 实验结果表明, 在光照充足的条件下, 所提方法能够精确检测出两个云阴影的位置; 在光线较暗的条件下, 检测结果与实际位置之间的误差最大仅为 1 pt, 由此可以得出所提方法实现了对云阴影的准确检测。

**关键词:** 尺度不变特征变换; 宽幅遥感影像; 云阴影检测; 梯度直方图; 不透明度

## Cloud Shadow Detection Method for Wide Range Remote Sensing Images Based on Scale Invariant Feature Transformation

LI Caihong<sup>1</sup>, HUANG Junjie<sup>2</sup>

(1. School of Electronic Information Engineering, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China;

2. Foundation Department, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Due to the changes of shooting altitude and cloud thickness, The scale of cloud shadow in remote sensing images makes it impossible to adapt to the scale change of cloud shadows in time under different shooting angles, resulting in inaccurate detection of cloud shadows. For this purpose, research on the detection method based on scale-invariant feature transformation is conducted. The SIFT algorithm and gradient histogram are used to extract feature points from cloud shadows. Based on the feature points, the SIFT descriptor for each feature point in the reference image is calculated, and the SIFT descriptor of cloud shadow feature points in the reference image is normalized, thus calculating the spacing between the SIFT descriptors. An area gray scale compensation method for cloud shadows is adopted to balance image quality under different light conditions, and the mean square error is introduced to test the results compensated by the grayscale to complete the detection of cloud shadows. Experimental results show that the proposed method can accurately detect the position of two cloud shadows, and the maximum error between the detection result and the actual position is only 1 pt. From this, it can be concluded that the proposed method can achieve the accurate detection of cloud shadows.

**Keywords:** scale invariant feature transformation; wide range remote sensing images; cloud shadow detection; gradient histogram; opacity

收稿日期:2025-02-20; 修回日期:2025-04-08。

基金项目:陕西省教育科学规划 2024 年度课题(SGH24Y2716);西安思源学院校级科研项目(XASY-B1801)。

作者简介:李彩红(1980-),女,硕士,副教授。

黄军杰(1980-),男,大学本科,副教授。

引用格式:李彩红,黄军杰. 基于尺度不变特征变换的宽幅遥感影像云阴影检测方法[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(3): 18-24.

## 0 引言

宽幅遥感影像云阴影检测在气象预测、环境监测等多个领域具有广泛的应用价值。这类影像提供了广阔的地理覆盖和丰富的细节信息,为云阴影的精确检测提供了可能。然而,当前研究在这一领域仍面临显著挑战<sup>[1]</sup>。云阴影在影像中的表现复杂多变,受到光照条件、地形地貌以及大气状况等多重因素的共同作用,使得其准确检测变得尤为困难。同时,宽幅影像数据量庞大,对处理速度和存储资源提出了极高要求。

在文献对比分析中,现有的宽幅遥感影像云阴影检测方法存在多种应用缺陷。文献[2]提出了上下文信息融合网络检测方法,该方法通过多尺度卷积层提取影像中基础特征,利用上下文信息融合模块,将不同尺度、不同层次的特征图加权融合,捕捉影像中全局与局部上下文信息。引入注意力机制,动态调整特征图权重,检测云阴影。由于网络结构复杂,导致在处理光照条件多变的宽幅遥感影像时,引入不必要干扰,出现了检测偏差;文献[3]提出了基于BP神经网络的检测方法,其原理在于构建一个多层前馈网络模型,该模型通过输入层接收遥感影像数据,经由隐藏层进行特征提取与非线性变换,最终在输出层生成云阴影的预测结果。BP神经网络虽然能有效提取特征,但其特征提取能力受限于网络结构与参数设置,无法充分捕捉遥感影像中云阴影的复杂特性,如边缘细节、形态变化等,导致检测结果出现了偏差;文献[4]提出了动态阈值云检测方法,利用多光谱信息分析影像中各像素的光谱特性,识别潜在的云区域。针对每个潜在云区域,动态计算一个阈值,用于区分云区域内部的阴影部分与非阴影部分。在复杂地形或光照条件下,云与云阴影的界线可能变得模糊,动态阈值方法可能难以准确区分,产生检测误差。文献[5]提出了基于轻量化卷积神经网络模型的检测方法,采用卷积、激活函数和池化层相组合的模式,逐步抽象出云阴影的高阶特征。利用全连接层或卷积层将特征映射至分类空间,输出每个像素或区域为云阴影的概率。尽管轻量化设计减少了模型参数与计算量,但模型的特征表达能力受限,难以充分捕捉宽幅遥感影像中云阴影的复杂特性,使检测精度低。

针对宽幅遥感影像中云阴影检测存在的难题,提出了一种基于尺度不变特征变换(SIFT)的检测方法。在气象预测与环境监测领域,云阴影的精准识别意义重大。在气象预测方面,云阴影的分布与变化能直观反映云层动态,为气象模型提供关键数据支撑,有助于更精准地预测天气变化,从而提升气象预报的准确性,为人们的生活提供可靠保障。在环境监测领域,云阴影的变化与特定区域的生态状况密切相关,从而影响植被

的光合作用、地表温度等生态因子。SIFT算法在不同尺度上检测关键点,经灰度梯度方向直方图分析确定主要方位,具备尺度、旋转不变性及局部性,对图像局部变化鲁棒性强,能有效满足云阴影检测需求。

## 1 基于尺度不变特征变换的遥感影像云阴影特征点提取

宽幅遥感影像中的云阴影主要是由于太阳光倾斜照射时,云层自身遮挡了太阳光线而造成的影像上的暗色调。这种阴影反映了云层的位置、形状和高度,是遥感影像中常见的自然现象<sup>[6]</sup>。在遥感影像中,云阴影的存在可能会对地物的识别和信息的提取造成一定的干扰。云阴影在遥感影像中具有很高的独特性,这主要源于云层的形状、位置和高度随时间、气候等条件的变化而变化<sup>[7]</sup>。

因此,传统的影像处理方法往往难以准确捕捉和描述云阴影的特征。而SIFT算法作为一种尺度不变的特征提取方法,能够有效地提取出影像中的关键点,并生成与之对应的特征描述子。该描述子具有尺度不变性、旋转不变性,能够较好地适应云阴影在遥感影像中的变化特性<sup>[8]</sup>。遥感影像云阴影特征提取的核心在于精准定位其特征点,这一过程中,采用云阴影图像的SIFT特征点作为参考。为了从宽幅遥感影像中提取这些特征点,需通过如下计算公式来构建影像的尺度空间:

$$L(x, y) = \frac{\exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2}\right]}{2\pi} \quad (1)$$

式中, $L(x, y)$ 表示点 $(x, y)$ 像素值。

在图像处理领域,为了模拟人类视觉系统在不同观测距离下对物体尺度的自然感知变化,引入了图像的高斯金字塔结构<sup>[9]</sup>。高斯金字塔通常由5层图像组成,每一层图像都是通过对其上一层图像进行高斯平滑和下采样得到的,下采样率设定为1/2,即每层图像的宽度和高度均为上一层的1/2,从而有效减少数据量,同时保留图像的主要特征。这一结构在处理宽幅遥感影像时,因为其能够将影像分解为一系列分辨率逐渐递减的图像层,所以能够在多个尺度层次上有效地检测特征点。SIFT特征点被定义为在连续尺度空间中稳定存在的局部极值点,具有尺度不变性、旋转不变性和光照鲁棒性。这些特性使得SIFT特征点在应对遥感影像中的尺度变化、图像旋转以及光照条件波动时表现尤为突出<sup>[10]</sup>。通过高斯金字塔的多尺度表示,SIFT算法能够在不同分辨率的图像层上检测特征点,从而提高了特征点检测的准确性和稳定性。基于此,建立的图像高斯金字塔如下所示:

$$W(x, y) = L(x, \tau y) - L(x, y) \quad (2)$$

式中, $\tau$ 表示影像尺度空间 $L(x, y)$ 中不同尺度级的索引。

在 高 斯 金 字 塔 的 多 尺 度 空 间 中，若 某 像 素 值 在 其 当 前 层 及 邻 近 层 中 均 展 现 出 局 部 极 值 的 特 性，则 该 像 素 被 视 为 宽 幅 遥 感 影 像 云 阴 影 检 测 中 的 一 个 关 键 特 征 点。鉴 于 关 键 特 征 点 源 自 特 定 条 件 下 的 极 值 点 筛 选，首 要 步 骤 就 是 定 位 这 些 极 值 点。为 了 在 高 斯 尺 度 空 间 内 精 确 识 别 高 斯 差 算 子 的 极 值 点，需 逐 一 比 较 图 像 中 每 个 像 素 点 与 其 周 边 像 素 值 的 大 小。假 设 高 斯 差 分 金 字 塔 的 每 组 构 成 包 含 四 层 图 像，鉴 于 极 值 检 测 需 与 相 邻 两 层 图 像 进 行 对 比，因 此 首 尾 两 层 需 被 剔 除，仅 余 中 间 两 层 参 与 比 较。此 外，考 虑 到 在 构 建 高 斯 差 分 金 字 塔 过 程 中 会 损 失 一 层 图 像 信 息，故 原 始 高 斯 金 字 塔 的 层 数 设 计 需 比 实 际 进 行 极 值 检 测 的 层 数 多 出 三 层<sup>[11-12]</sup>。在 宽 幅 遥 感 影 像 的 云 阴 影 检 测 中，若 云 阴 影 定 位 准 确 无 误，则 按 照 统 一 的 切 割 标 准 所 得 影 像 在 云 阴 影 的 边 缘、形 态 等 关 键 特 征 上 必 然 呈 现 出 一 致 的 相 对 位 置 关 系。反 之，若 云 阴 影 定 位 出 现 较 大 偏 差，则 切 割 后 的 影 像 在 上 述 关 键 特 征 上 与 标 准 云 阴 影 影 像 将 无 法 实 现 有 效 配 准。值 得 注 意 的 是，在 不 同 的 检 测 算 法 应 用 中，标 准 云 阴 影 影 像 的 SIFT 特 征 点 位 置 和 数 量 可 能 有 所 不 同。然 而，选 取 标 准 云 阴 影 影 像 的 SIFT 特 征 点 作 为 构 建 标 准 特 征 模 板 的 基 准，并 对 所 有 待 检 测 云 阴 影 影 像 统 一 采 用 这 些 特 征 点，能 够 在 配 准 评 估 中 保 持 高 度 的 统 一 性 和 可 比 性<sup>[13]</sup>。同 时，这 种 特 征 点 的 选 择 不 仅 具 有 SIFT 特 征 点 定 位 的 理 论 基 础，也 符 合 遥 感 影 像 分 析 的 实 践 经 验。对 于 定 位 准 确 的 云 阴 影 影 像，这 些 特 征 点 通 常 位 于 信 息 最 为 密 集 且 最 具 代 表 性 的 位 置。

SIFT 算 法 对 旋 转 图 像 的 强 忍 耐 度 源 于 其 独 特 的 主 方 向 机 制，在 SIFT 特 征 提 取 过 程 中，将 每 一 关 键 点 都 赋 以 一 条 由 其 周 边 像 素 梯 度 分 布 确 定 的 主 方 向。该 主 方 向 是 一 种 旋 转 不 变 的 变 换，即 不 管 图 像 如 何 转 动，其 中 心 点 的 主 方 向 都 是 固 定 的<sup>[14]</sup>。如 此，即 便 图 像 出 现 了 旋 转，也 可 以 通 过 对 关 键 点 附 近 像 素 的 梯 度 及 方 向 进 行 计 算，并 依 据 主 方 向 进 行 校 正，SIFT 算 法 仍 能 准 确 识 别 并 匹 配 特 征 点。这 种 特 性 使 得 SIFT 算 法 在 宽 幅 遥 感 影 像 云 阴 影 检 测 等 应 用 中，面 对 复 杂 多 变 的 图 像 旋 转 情 况，依 然 能 够 保 持 高 度 的 稳 定 性 和 准 确 性。基 于 此，构 建 关 键 点 周 围 像 素 梯 度 和 方 向 的 计 算 公 式：

$$\begin{cases} \psi(x,y) = \sqrt{\frac{[W(x+1,y) - W(x-1,y)]^2 + [W(x,y+1) - W(x,y-1)]^2}{2}} \\ \theta(x,y) = \arctan \frac{W(x,y+1) - W(x,y-1)}{W(x+1,y) - W(x-1,y)} \end{cases} \quad (3)$$

在 基 于 尺 度 不 变 特 征 变 换 (SIFT) 的 宽 幅 遥 感 影 像 云 阴 影 检 测 过 程 中，计 算 关 键 点 邻 域 内 各 像 素 的 梯 度 与 方 向 信 息，并 对 这 些 信 息 汇 总。鉴 于 一 个 完 整 的 圆 周 包 含 360°，若 对 每 个 方 向 逐 一 统 计 极 为 繁 琐<sup>[15]</sup>。为 简 化 处 理，以 45°为 间 隔 划 分 方 向，将 整 个 圆 周 划 分 为 8

个 方 向 区 间，如 图 1 所 示。

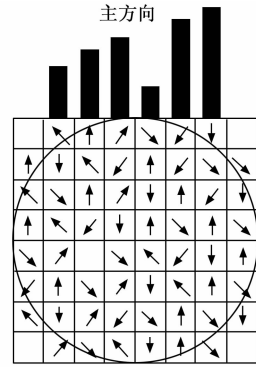


图 1 关键点梯度直方图

为 了 降 低 后 续 特 征 描 述 和 匹 配 的 计 算 复 杂 度，保 障 量 化 后 的 方 向 信 息 对 旋 转 具 有 一 定 的 鲁 棒 性，确 保 在 宽 幅 遥 感 影 像 云 阴 影 检 测 等 应 用 中 特 征 点 的 稳 定 性，需 要 将 各 单 元 (如 SIFT 关 键 点 邻 域) 中 像 素 点 的 梯 度 幅 值 和 方 向 量 化 到  $n$  个 方 向，公 式 为：

$$\vartheta = \frac{2\pi n}{m} \quad (4)$$

式 中， $m=0, 1, \dots, n$ ，表 示 方 向 个 数<sup>[16]</sup>。为 了 能 够 有 效 地 汇 总 并 表 达 该 单 元 内 像 素 点 的 梯 度 分 布 特 征，对 于 单 元  $c$ ，统 计  $n$  个 方 向 上 的 加 权 梯 度 幅 值 以 构 建 方 向 梯 度 直 方 图：

$$H_{b(c)} = \begin{cases} H_{b(c)} + \omega \psi_c(x,y) & \theta_c(x,y) = \vartheta \\ H_{b(c)} & \theta_c(x,y) \neq \vartheta \end{cases} \quad (5)$$

式 中， $b \in c$ ， $b$  表 示 单 元 中 像 素 点 索 引<sup>[17]</sup>。通 过 构 建 梯 度 直 方 图，可 以 突 出 显 示 云 阴 影 边 缘 等 关 键 特 征 信 息，为 后 续 特 征 匹 配 与 识 别 提 供 了 更 加 精 确、鲁 棒 的 基 础。

通 过 直 方 图 的 量 化 表 达，高 效 地 捕 捉 了 图 像 局 部 的 结 构 和 纹 理 特 征。同 时，将 各 个 单 元  $c$  中 所 构 建 的 方 向 梯 度 直 方 图 进 行 组 合，构 建 该 关 键 点 的 特 征：

$$h_{(o)} = H_{b(c)} (b = 1, 2, \dots, c) \quad (6)$$

式 中， $o$  表 示 关 键 点 数 量，将 所 有 关 键 点 的 特 征 组 合 起 来 得 到 遥 感 影 像 云 阴 影 特 征 点。

基 于 此，完 成 了 遥 感 影 像 云 阴 影 特 征 点 的 提 取。为 宽 幅 遥 感 影 像 的 云 阴 影 检 测 提 供 了 有 力 的 数 据 支 持。

## 2 宽幅遥感影像云阴影检测

在 遥 感 影 像 处 理 与 分 析 过 程 中 流 程 如 下，首 先 需 计 算 特 征 点 SIFT 描 述 子 之 间 的 距 离，以 此 为 基 础 获 取 SIFT 匹 配 点 集 合，为 后 续 目 标 识 别 与 分 离 提 供 数 据 支 撑。然 后，针 对 遥 感 影 像 中 的 特 定 目 标，开 展 云 阴 影 的 分 离 工 作，通 过 精 准 算 法 与 模 型 识 别，将 云 阴 影 区 域 从 复 杂 背 景 中 有 效 提 取 出 来。随 后，对 分 离 出 的 云 阴 影 进 行 评 估，分 析 其 形 态、分 布 及 对 影 像 整 体 质 量 的 影 响 程 度。通 过 增 强 处 理、特 征 提 取 等 手 段，使 这 些 区 域 的 细

节信息更加清晰可辨。同时, 注重平衡影像质量, 在去除云阴影干扰的同时, 尽可能保留影像的原始信息与色彩平衡。最后, 对处理后的图像质量进行全面检验, 确保各项处理措施达到预期效果, 满足后续分析与应用的需求, 根据上述内容具体的流程如图 2 所示。

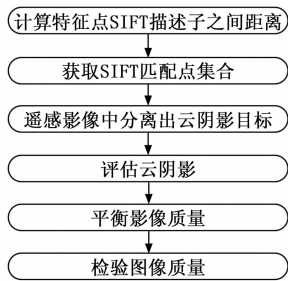


图 2 云阴影检测流程图

基于上述流程, 具体的检测操作如下: 通过将遥感影像中提取到的云阴影特征点与预先构建的云阴影特征数据库进行比对分析, 能够精确确定云阴影在遥感影像中的具体位置。比对流程如下, 首先, 计算特征点 SIFT 描述子之间的距离, 具体计算公式为:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^{k=128} (h_{(i)} - h_j)^2} \quad (7)$$

式中,  $k$  表示特征向量序号, 特征向量共有 128 维;  $h_j$  表示宽幅遥感影像中第  $j$  个规范化 SIFT 描述子的关键点<sup>[18]</sup>。然后, 利用标准化 SIFT 描述子, 对参考图像中每个云阴影特征点进行标准化 SIFT 描述, 并对其进行检索。该方法利用公式 (7) 公式, 可以准确地求出两种规范化 SIFT 描述子的间距。最后, 将计算得到的间距与设定阈值进行对比。当最短距离和次短距离之比超过预设的阈值时, 就可以认为该描述子是有效的。反之, 则是无效的。至此, 完成 SIFT 描述子间距计算。

通过设置较高的初始阈值, 可以有效地提高 SIFT 匹配点的数目, 从而提高 SIFT 匹配的精度和稳定性。当整个搜索流程结束后, 将获得一个包含众多 SIFT 匹配点集合, 这些匹配点能够精确地映射出云阴影在基准影像与待检测的宽幅遥感影像之间的空间对应关系。

在上述得到的 SIFT 匹配点集合中, 匹配点精准展现出了云阴影在基准影像与宽幅遥感影像间的空间映射关系。为进一步实现在遥感影像中分离出云阴影的目标, 首先, 将影像中的像素值视为背景与前景色彩的线性融合, 其中融合的权重即为不透明度。不透明度的取值范围为 0 到 1, 0 表示全部都是背景的一部分, 1 表示整个像素都是前景的一部分, 它的数值愈大, 说明这个像素是云阴影前景对象的可能性就愈大。在该方法的基础上, 将图像中的阴影部分看作是前景, 而不是阴影部分作为背景, 从而将不透明度概念融入云阴影检测过程中。

在尺度  $d_{ij}$  的遥感影像层面, 计算每个像素不透明

度, 进而生成对应的不透明度直方图。利用这一直方图, 能够自动地判定出不透明度与亮度两者在检测过程中有效作用值。不透明度计算公式为:

$$\delta_{ij} = \operatorname{argmin} \delta^T \mathbf{G} \delta + d_{ij} (\delta^T - r^T) \mathbf{Z} (\delta - r) \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{G}$  表示拉普拉斯算子矩阵<sup>[19]</sup>;  $r$  表示特征向量, 其元素取值为 0 或 1, 其中云阴影特征点对应值为 1, 非云阴影特征点及其他非特征点对应值为 0;  $\mathbf{Z}$  表示对角特征权重矩阵。

接着, 考虑到遥感影像中光照角度的多样性、散射效应以及地表物体反射特性的不同, 云阴影区域在同一图像中的光谱特性呈现出明显的差异性。为此, 提出了一种云阴影概率的计算方法。该方法通过计算每个像元的投影概率来评估其成为云阴影的可能性, 概率值越高, 意味着该像素点越有可能是云阴影区域。当概率值达到 1 时, 可以确信该像素点完全属于云阴影区域。这种计算方法基于不透明度的特征场条件概率:

$$\begin{cases} P = \delta_{ij} \\ P = 1 - \delta_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

利用上述公式, 标记特征场, 并依据极大后验概率原则得出检测结果。若达到当前尺度下的最大迭代次数, 则获取该尺度的检测结果; 否则, 继续上述步骤。令尺度  $d_{ij}$  递减, 若  $d_{ij}$  小于 1, 则迭代终止, 此时所得概率对应的区域即为云阴影。

最后, 为平衡在光照充足和光线较暗的两种条件下的影像质量, 并提高云阴影区域的细节辨识度, 采用了云阴影区域灰度补偿的方法。这种算法是建立在图像的局部平稳的前提下, 假设云阴影区与周围的非云阴影区具有相似的地表反射率。在此基础上, 当云阴影区被识别出来后, 利用直方图灰度的线性匹配方法, 将云阴影区和非云阴影区进行比较, 从而突出非云阴影区内地物的特征。

阴影区域灰度补偿公式, 可表示为:

$$f' = P v + \left( \frac{f - v}{\tau} \right) \cdot \gamma \quad (10)$$

式中,  $v$ 、 $\gamma$  分别表示非云阴影区域的平均亮度和亮度离散度<sup>[20]</sup>;  $f$  表示补偿处理前云阴影区域像素的灰度值。

在进行云阴影区域进行灰度值的补偿处理后, 使用均方误差 (MSE) 来检验处理后的图像质量。MSE 的计算公式为:

$$\text{MSE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [f'(i, j) - \hat{f}'(i, j)]^2 \quad (11)$$

其中, 通过计算得到的 MSE 值越低, 则表示经灰度值补偿处理后的图像与原始图像更为接近, 处理效果更为理想。相反的, MSE 值越高, 则说明对云阴影区域进行灰度值补偿处理后的图像与原始图像之间的差异越大, 这通常意味着处理效果并不理想或者处理过程中

引入了较多的误差。

至此，完成了云阴影的检测，上述步骤旨在显著提升云阴影与周围非云阴影区域之间的对比度，从而凸显云阴影的独特特征，并确保非云阴影区域的信息得以完整保留。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验环境

选取了一幅 2023 年 9 月 4 日拍摄的某市 QuickBird 卫星影像作为实验数据，该影像具备 0.6 m 的高分辨率，并且经过了彩色融合处理，色彩信息丰富且细节清晰。示例区域宽幅遥感影像，如图 3 所示。

本次研究的焦点区域选取在该城市的一个特定区域内，该区域的具体范围被精确地划定在卫星图像的第 2 109 列至第 2 318 列（含首尾列）以及第 2 937 行至第 3 146 行（含上下行）之间。经过精确计算，这一选定区域的总面积大约为 2 109 列×210 行像素，形成了一个既充分又精简的研究规模。该区域不仅地理位置得天独厚，其图像特征也异常丰富，为对象导向的阴影检测技术提供了一个近乎理想的验证舞台。通过卫星图像分析，观察到山脉高低错落与延展态势在影像中形成了多层次的阴影效果，这些层次分明的阴影不仅构成了对阴影检测算法精确性的高标准验证，同时也为算法提供了丰富的实际案例数据。

#### 3.2 实验装置

使用 ZDTX-9000 型号的遥感卫星接收平台作为实验装置，该装置结构如图 4 所示。

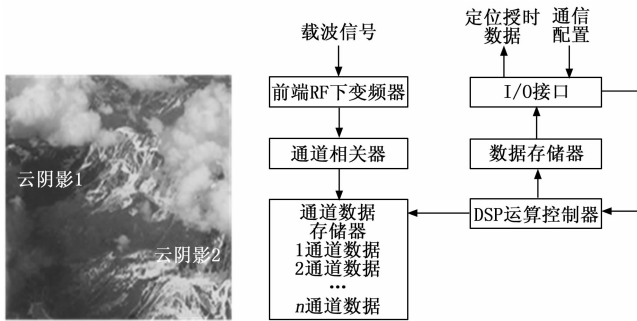


图 3 宽幅遥感影像 图 4 ZDTX-9000 型号的遥感卫星接收平台

ZDTX-9000 型号的遥感卫星接收平台中的前端 RF 下变频器负责将接收到的卫星下行频率的信号进行低噪声放大并变频；相关器用于处理和解调接收到的卫星信号；IO 接口可能用于连接存储设备、显示设备或其他处理设备，实现数据的输入输出功能；数据存储用于保存接收到的卫星数据、处理后的数据以及可能需要的临时文件等；DSP 控制器负责处理接收到的卫星信号，提取有用信息，并控制平台的整体运行。

该平台技术参数，如表 1 所示。

表 1 平台技术参数

参数名称	参数数值
几何校正数据质量	1B 级
单颗卫星数据处理时间	<30 min
最大处理数据量	20 G 字节
最大输出电平	+10 dBV
人工干预最大时长	15 min

该遥感卫星接收平台具备自动化接收与处理卫星数据的能力，它能对接收到的遥感数据进行几何和辐射校正，确保数据质量达到指定标准。若自动处理图片失败，软件会在空闲时自动重启预处理流程，或由用户手动触发预处理操作。在人工干预环节，用户主要通过图形界面来定义数据的取舍范围，包括数据的起始和结束部分。此外，该装置还能自动生成遥感数据的 HDF 或 Tiff 格式图片，以及便于快速浏览的 Jpg 格式图片，并通过局域网将这些数据上传至服务器进行存储。

#### 3.3 实验数据

选取的遥感影像数据来源于 ZDTX-9000 型号遥感卫星接收平台所捕获的云与云阴影数据集，ZDTX-9000 搭载了先进的遥感传感器组件，其中关键部分具备高分辨率和时间频率特性，具体为空间分辨率达到 16 m，且能以 4 天的时间间隔进行观测。该系统采用了多个摄像机模组，各模组可涵盖 4 个多波段，且具有宽达 800 km 的视场。该数据集包括 108 幅遥感影像，涵盖了多个地物类型。根据遥感影像的特点，建立了对应的标记，然后通过手工标记，将其转化成灰度图像格式。对于灰度影像，使用了 0（黑）、128（灰）、255（白）的灰度来表示地表像素、云阴影像素和云的像素。在此基础上，对已有的遥感图像和其标注进行归一化处理，得到具有 1 024 pixel×1 024 pixel 大小的图像，并从中选出 87 个用于训练和检验，剩下的 21 个作为测试集。

由于实际获取的遥感影像数据集往往规模有限且图像尺寸较大，因此对 ZDTX-9000 接收的遥感影像及其标签实施了数据增强处理，包括旋转、亮度调整、噪声注入、饱和度变换、颜色变换以及裁剪等操作。经过增强处理后，对 ZDTX-9000 采集到的遥感图像和标签进行剪切，得到 12 528 幅（256 pixel×256 pixel）大小的图像，其中 10 100 幅进行训练，2 428 幅作为验证。在测试阶段，针对一个 256 pixel×256 pixel 的遥感图像进行基于像元尺度的云阴影检测。

#### 3.4 实验指标

实验设计涵盖了两种截然不同的光照条件以深入分析宽度遥感影像的直方图特性并检测云阴影。

1) 光照充足条件：

该条件下宽度遥感影像的直方图往往展现出更为均

衡的分布, 像素值范围广泛且差异明显, 这有助于更清晰地识别出云阴影区域, 因为阴影与周围亮区的对比度较高。

## 2) 光线较暗条件:

该条件下直方图可能趋向于集中, 像素值范围缩小, 云阴影与背景的差异变得模糊, 增加了准确检测云阴影的难度。

这两种条件下的宽度遥感影像直方图, 如图5所示。

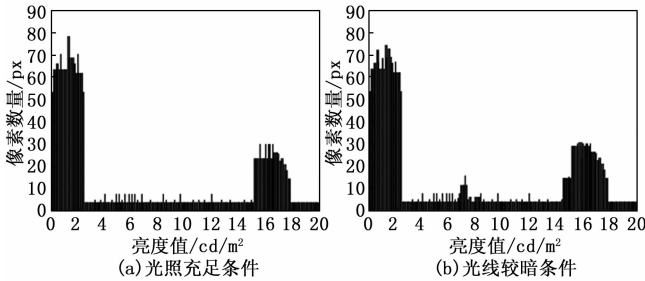


图5 宽度遥感影像直方图

当直方图呈现出明显的双峰夹一谷的形态时, 波峰位置即为分割阈值, 也就是遥感影像中的云阴影位置。由图5(a)可知, 当亮度值在 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 时, 像素数量出现最大值为78 px, 该位置为第一个云阴影; 当亮度值在 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 时, 像素数量出现最大值为30 px, 该位置为第二个云阴影。由图5(b)可知, 当亮度值在 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 时, 像素数量出现最大值为74 px, 该位置为第一个云阴影; 当亮度值在 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 时, 像素数量出现最大值为32 px, 该位置为第二个云阴影。

## 3.5 实验过程

首先进行图像预处理: 在获取光线充足的图像后, 将其转换为灰度图像, 以降低计算复杂度。同时, 运用直方图均衡化等技术提升图像对比度, 让云阴影与背景的区别更为显著。

接着开展特征提取工作: 利用边缘检测、纹理分析等手段, 提取云阴影的潜在特征, 包括形状、边缘轮廓以及灰度分布等, 为后续识别环节奠定坚实基础。

然后进行分类识别: 把提取到的特征输入到预先训练好的分类器中, 例如支持向量机、神经网络等, 借助模式识别技术判断图像中是否存在云阴影, 并精准定位其位置。

最后完成后处理与验证: 对识别结果进行形态学处理, 去除噪声和误检区域。同时, 结合地理信息和气象数据对检测结果进行验证, 并将实验结果进行汇总。

## 3.6 实验结果与分析

实验设置了对比实验分别为文献[2]提出的上下文信息融合网络检测方法、文献[3]提出的基于BP神经网络的检测方法、文献[4]提出的动态阈值云检测方法、文献[5]提出的基于轻量化卷积神经网络模型的检测方法与基于尺度不变特征变换的检测方法在光

线充足的条件下进行对比实验, 得到的云阴影检测结果如图6所示。

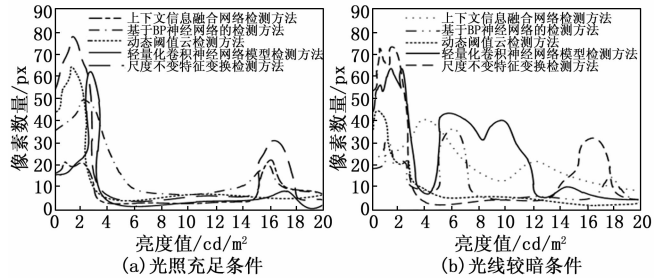


图6 不同方法直方图对比结果

由图6(a)可知, 使用上下文信息融合网络检测方法, 只检测出亮度值为 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为25 px的第二个云阴影位置, 没有检测出第一个云阴影位置; 使用基于BP神经网络的检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为25 px的位置。第二个云阴影是在亮度值为 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为18 px的位置; 使用动态阈值云检测方法, 只检测出亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为65 px的第一个云阴影位置, 没有检测出第二个云阴影位置; 使用基于轻量化卷积神经网络模型的检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为22 px的位置。第二个云阴影是在亮度值为 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为11 px的位置; 使用基于尺度不变特征变换的检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为78 px的位置。第二个云阴影是在亮度值为 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为30 px的位置。

由图6(b)可知, 使用上下文信息融合网络检测方法, 只检测出亮度值为 $13\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为31 px的第二个云阴影位置, 没有检测出第一个云阴影位置; 使用基于BP神经网络的检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为32 px的位置。第二个云阴影是在亮度值为 $5\sim 7\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为38 px的位置; 使用动态阈值云检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为65 px的位置。第二个云阴影是在亮度值为 $5\sim 12\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为43 px的位置; 使用基于轻量化卷积神经网络模型的检测方法, 只检测出亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为22 px的第一个云阴影位置, 没有检测出第二个云阴影位置; 使用基于尺度不变特征变换的检测方法, 检测出的第一个云阴影是在亮度值为 $0\sim 2\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为73 px的位置; 第二个云阴影是在亮度值为 $15\sim 18\text{ cd/m}^2$ 、像素数量最大值为31 px的位置。通过上述分析结果可知, 只有使用基于尺度不变特征变换检测方法, 检测的结果与实验指标最接近, 仅存在在最

大为 1 px 的误差。

为更直观地评估 SIFT 的检测方法对云阴影的检测效果, 针对云层处于不同薄厚状态时该方法对云阴影的实际检测表现进行了检测, 结果进一步验证了该方法的有效性, 检测结果如图 7 所示。

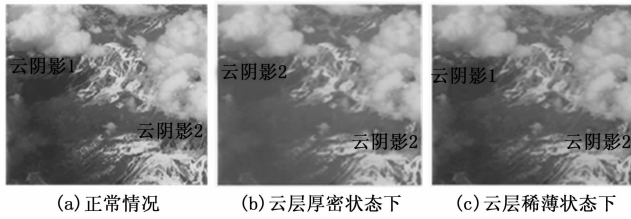


图 7 不同光照条件下阴影检测结果图

根据图 7 所示, 无论是在云层厚密状态还是云层稀薄状态下, 采用所提方法均能准确无误地定位出两个云阴影的位置。这些检测结果与在正常条件下所得到的结果基本一致, 呈现出高度的吻合性, 从而验证了本文方法在云阴影检测中的稳定性和可靠性。

#### 4 结束语

在宽幅遥感影像云阴影检测领域, 传统方法面临诸多挑战, 该方法往往受限于噪声干扰和光照变化, 导致在复杂地形条件下特征提取不准确, 云阴影检测精度欠佳。尤其是在处理大规模遥感数据时, 传统算法的计算复杂度高, 检测效率低, 难以满足实际应用的需求。鉴于此, 提出了一种基于尺度不变特征变换的宽幅遥感影像云阴影检测方法。该方法通过引入尺度不变特征变换, 有效增强了算法对云阴影特征的识别能力, 即使在复杂光照条件下也能实现稳定且高精度地检测。通过实验验证结果可知, 使用所研究方法能够精准检测出两个云阴影的位置。

综上所述, 本研究不仅克服了传统方法在云阴影检测中的局限性, 还展现了在宽幅遥感影像处理方面的独特优势。该方法具有高精度、高效率的特点, 为遥感影像云阴影检测提供了新的思路和技术手段, 具有广泛的应用前景和重要的实际意义。

#### 参考文献:

- [1] 张雍, 江洪, 郭家. 顾及水域的 Sentinel-2 数据地形阴影检测方法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2024, 39 (2): 492-501.
- [2] ZHANG X, LI J, YANG C, et al. CIFNet: context information fusion network for cloud and cloud shadow detection in optical remote sensing imagery [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2023, 17 (1): 1-14.
- [3] 杨光义, 薛若尧, 张若茜, 等. 基于 BP 神经网络的特征融合遥感图像阴影检测 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2023, 56 (6): 757-763.
- [4] 魏孔亮, 刘效江, 马博文, 等. 高分光学影像动态阈值云

/阴影检测方法及应用 [J]. 遥感信息, 2024, 39 (1): 139-145.

- [5] 杨昌军, 张昊, 张秀再, 等. 基于轻量化卷积神经网络模型的云与云阴影检测方法 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23 (32): 13681-13687.
- [6] 梁燕, 易春霞, 王光宇. 基于编解码网络 UNet3+ 的遥感影像建筑变化检测 [J]. 计算机学报, 2023, 46 (8): 1720-1733.
- [7] 张银胜, 单梦姣, 陈昕, 等. 基于多模态特征提取与层级感知的遥感图像分割 [J]. 地球信息科学学报, 2024, 26 (12): 2741-2758.
- [8] 唐晔, 刘小燕, 崔耀平, 等. 基于高分可见光遥感指数的城市阴影高效提取研究 [J]. 遥感技术与应用, 2023, 38 (4): 945-955.
- [9] 张昊, 焦瑞莉, 乔聪聪, 等. 基于纹理特征的深度学习云和云阴影检测 [J]. 计算机工程与设计, 2024, 45 (5): 1580-1587.
- [10] 胡昌苗, 张正, 唐娉. 国产卫星多光谱数据云与云阴影检测算法研究 [J]. 遥感学报, 2023, 27 (3): 623-634.
- [11] 张枫幸, 黄健, 李浩. 轻量级双侧输入 D-WNet 航空影像建筑物变化检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61 (8): 305-314.
- [12] 杜永峰, 马天军, 韩博, 等. 基于尺度不变特征变换算法 (SIFT) 立体匹配的结构三维振动位移监测 [J]. 工业建筑, 2023, 53 (12): 105-112, 134.
- [13] 姚婷婷, 肇恒鑫, 冯子豪, 等. 上下文感知多感受野融合网络的定向遥感目标检测 [J]. 电子与信息学报, 2025, 47 (1): 233-243.
- [14] 程宁, 侯德林. 基于尺度与对比度不变的图像边缘检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (1): 140-148.
- [15] 易见兵, 彭鑫, 曹锋, 等. 多尺度特征融合的点云配准算法研究 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2024, 42 (3): 108-120.
- [16] 唐佳林, 林寿南, 周壮, 等. 基于特征变换结合 KD 树改进 ICP 的快速点云配准方法 [J]. 计算机科学, 2023, 50 (S02): 248-252.
- [17] 李绕波, 袁希平, 甘淑, 等. 点面特征约束下利用对偶四元素描述的点云配准模型求解方法 [J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2023, 48 (9): 1546-1554.
- [18] 张华, 徐瑞政, 郑南山, 等. 融合颜色信息和多尺度几何特征的点云语义分割方法 [J]. 地球信息科学学报, 2024, 26 (6): 1562-1575.
- [19] 欧鑫, 高飞, 崔浩, 等. 基于特征点匹配的点云配准方法研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2023, 46 (6): 808-812.
- [20] 夏晓华, 赵倩, 向华涛, 等. 多聚焦图像离焦模糊区域的 SIFT 特征提取 [J]. 光学精密工程, 2023, 31 (24): 3630-3639.