

CPU 与 GPU 平台下遥感影像 JPEG2000 解压缩效率提升研究

马若琳¹ 李 帅¹ 赵 可¹ 公雪霜¹

MA Ruolin LI Shuai ZHAO Ke GONG Xueshuang

摘 要

针对 JPEG2000 因计算复杂度高而制约遥感影像实时解压缩的问题, 文章分别在 CPU 与 GPU 平台开展解压缩效率优化工作。研究构建了串行、CPU 包内并行、CPU 组合并行、GPU 流水线批处理并行四类实验方案, 选取不同数据量、压缩比、分辨率的遥感影像作为实验对象, 从解压缩时间、处理速度、加速比三个维度开展量化评估, 以此明确 CPU 与 GPU 平台的性能边界。实验结果表明, 并行度的深化可显著提升解压缩效率, 其中 CPU 组合并行与 GPU 流水线批处理两种方案的处理速度均可突破 400 Mbit/s。二者效能受数据规模与硬件参数约束, 场景差异明显: 小数据量时 CPU 包内并行平衡开销与效率, 高计算量任务需 CPU 组合并行与 GPU 协同突破瓶颈, I/O 占比高的轻量任务更适配 CPU 优化资源利用, 所提出的场景化并行策略, 为相关并行方案选型提供参考。

关键词

遥感影像; JPEG2000; CPU 并行优化; GPU 批处理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.044

0 引言

遥感卫星技术的迅猛发展推动影像在空间、光谱和时间分辨率上不断提升, 致使数据量爆炸式增长。我国高分系列卫星单星日数据量已达 TB 级, 对数据存储、传输和实时处理带来巨大挑战。因此, 高效数据压缩技术成为突破的关键^[1]。

1. 中国四维测绘技术有限公司 北京 100096

JPEG2000 凭借离散小波变换 (DWT) 与优化截断嵌入式块编码 (EBCOT) 等先进技术, 在压缩比、无损 / 有损兼容性、渐进传输及感兴趣区域 (ROI) 编码等方面展现显著优势^[2]。但其算法解压缩过程具备高计算度的特点, 严重制约遥感信息快速获取的实时性。传统的基于 CPU 的解码方案多采用单线程串行方式或标准格式码块内多线程并行方式, 在处理高分辨率、大数据量遥感影像时, 往往难以满足严格

[3]ZHANG L, HU Y Q, ZHAO L J, et al. Multichannels information fusion and deep transfer learning for rotating machinery fault diagnosis[J]. China mechanical engineering, 2023, 34(8): 966-975.

[4] 刘雯. 基于推理机的机械臂故障诊断专家系统优化设计 [J]. 液压气动与密封, 2023, 43(2):3-6.

[5]FERNANDES M, CORCHADO J M, MARREIROS G. Machine learning techniques applied to mechanical fault diagnosis and fault prognosis in the context of real industrial manufacturing use-cases: a systematic literature review[J]. Applied intelligence, 2022, 52: 14246-14280.

[6] 高升, 张海龙, 张伟, 等. 基于自适应超螺旋观测器的空间机械臂鲁棒故障诊断 [J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(4): 1287-1296.

[7] 周雅, 栗心怡, 武喜艳, 等. 基于 DT-LIF 神经元与 SSD 的脉冲神经网络目标检测方法 [J]. 电子与信息学报, 2023,

45(8):2722-2730.

[8]SOUALHI M, NGUYEN K T P, MEDJAHHER K, et al. Intelligent monitoring of multi-axis robots for online diagnostics of unknown arm deviations[J]. Journal of intelligent manufacturing, 2023, 34: 1743-1759.

[9] 张剑, 刘佳, 万贤杰, 等. 用于图像识别的高能效脉冲神经网络加速器设计 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1):211-220.

[10] 李伟, 朱卫纲, 朱霸坤, 等. 基于转换脉冲神经网络的雷达辐射源识别方法 [J]. 兵工自动化, 2022, 41(7):8-20.

【作者简介】

张召志 (1989—), 男, 江苏徐州人, 本科, 中级职称 (一级实习指导), 研究方向: 机械方向研究。

(收稿日期: 2025-07-07 修回日期: 2026-01-13)

的时效性要求^[3]。张人愉等^[4]针对卫星双通道高传输速率（450 Mbit/s）基带数据的实时处理需求，传统 Hadoop 集群（MapReduce）存在成本高、部署复杂的问题。其提出了通过帧级分发的 CPU 多核并行方案，显著提升了系统的吞吐能力，为高码率数据实时处理提供了可扩展路径。近年来，GPU 凭借其大规模并行计算架构和高显存带宽，为计算密集型任务提供了强大的加速潜力。Wu 等^[5]开发了一种在 GPU 上进行 JPEG2000 解压缩的实现方法，利用 CUDA 块解码一帧图像，其中 Tier-1 和 IDWT 部分采用并行处理。实验结果表明，与串行 CPU 实现相比，该方法实现了明显的加速。陈腾等^[6]设计了一种 CPU 和 GPU 协同进行 JPEG2000 解码的优化算法，重点研究了 CPU 和 GPU 对解码阶段的映射和分工机制。实验结果表明，该方法能够充分利用计算机多核 CPU 和 GPU 架构的强大计算能力，显著提高单路压缩图像的解码速度。

当前研究多集中在单个功能模块的并行化设计或平台优化，对多核 CPU 上粗粒度的帧间并行提升系统吞吐量的关注不足，同时 CPU 与 GPU 高效协作的研究也较少，基于流水线的负载均衡方案效果欠佳^[7-9]。因此，本文从全局对 JPEG2000 解压缩系统进行并行设计与实现，兼顾包内与包间并行，并探索平衡 CPU 和 GPU 负载的方案以进一步提升系统性能。

1 解压缩分析

JPEG2000 是联合图像专家组制定的新一代支持渐进式传输，支持无损和有损压缩模式的静止图形压缩标准。其包括压缩和解压缩两个过程。其中，解压缩是对压缩模式的码流数据进行 EBCOT 熵编码（先 Tier-2 解码，后 Tier-1 解码）、反量化、小波逆变换、反向分量变换、反向电平移位操作，最终恢复原始数据格式^[10]。

压缩码流包含主头、包体和结尾标识。Tier-2 解码先获取码流主头，从主头中依次解析图像尺寸、位深、码流字节数等关键参数，重组图像数据格式。受头部信息读取强制性约束，该模块适配串行处理模式。Tier-1 解码由比特平面解码和 MQ 算术解码组成，二者双向依赖^[11]。MQ 解码需要比特平面输出的上下文模型（CX），其结果又将比特平面作为输入。由于编码阶段已完成码块划分，解码时可利用码块的独立性，在码块级别实现并行处理；但 MQ 算术解码存在大量分支操作，而 GPU 缺乏分支预测，并行处理会影响性能，需串行处理。即 Tier-1 模块需采用“码块级并行和 MQ 算术解码串行”的混合优化策略。遥感影像的压缩和解压缩属于可逆转变，即在小波变化模块解码无需反量化。基于编码阶段的层级与自带系数重构。在逆变换中，行列内转化无数据依赖，属于密集型数据处理与像素级细粒度并行模式，此模

块适合并行处理^[12]。最后，反向电平移位模块针对单分量无符号图像，需还原压缩时的电平移位操作；因每个像素的操作独立且相同，具备像素级细粒度并行特性，适合并行处理^[13]。

2 实验方案

2.1 基于 CPU 的解压缩设计

针对串行解压缩系统在多核处理器上资源利用不足、效率欠佳的问题，基于 JPEG2000 解压缩算法的模块的并行性分析，本节设计了一种 CPU 分层并行系统，即采用包间粗粒度并行和包内细粒度并行（OpenMP）的分层方案。

CPU 具备多个独立计算核心架构，每个核心均配备专属的寄存器组、算术逻辑单元（ALU）及层级缓存（Cache），其为核心间的并行运算提供了支撑，从而实现多任务的并行运行^[6]。遥感数据多帧序列具备空间和时间上的独立性，为包间粗粒度并行奠定基础，可通过多线程并发实现包间加速。结合算法特性与多核优势：首先，由主线程对输入码流进行全局解析，精准识别并提取每一包的压缩数据，并将其分别映射至独立的内存地址空间，创建多个工作线程分别进行完整包的解码任务；其次，在整包内部解压中，由于 Tier-2 头部信息解码的顺序约束，采用线程内串行处理避免并发冲突；然后，针对 Tier-1 解压码、小波变换、反向电平移位模块等计算密集模块，采用 OpenMP 共享内存实现细粒度加速。将 k 个码块分配至多个核心并行执行熵解码与逆量化操作，利用码块间的独立性降低跨核调度冲突与通信开销，同时通过预设的校验机制确保包内及包间的数据一致性。该并行架构在多核 CPU 平台兼顾了解压缩效率和硬件资源利用率，实现对计算资源的高效利用，为实时解压缩应用提供了切实可行的轻量化解决方案。

2.2 基于 GPU 的解压缩设计

CPU 受核心数量和架构特征限制，在解压缩并行度和效率方面具有固有瓶颈。GPU 具有大规模并行处理能力、高内存带宽、SIMT 架构、专用硬件加速等关键优势，适配高数据并行性任务，为遥感数据实时高效处理提供技术支撑^[7]。NVIDIA NVJPEG 2000 加速库充分利用 GPU 的 SIMT 架构通过基于图像块划分子任务、并行处理编码块数据、流水线多阶段协同的混合并行策略，最大化 GPU 算力，在批量与实时场景中实现高吞吐、低延迟解压缩，性能显著优于传统 CPU 实现^[14]。

本节基于该库构建了基于 GPU 的解压缩方案。针对遥感数据高数据量、高分辨率特性，采用流水线批处理模式提升资源利用率、降低延迟、平衡内存和计算资源。基于 GPU 流式多处理器 SM 资源，创建数据传输、码流解析、熵解码、小波变换等动态适配 SM 数量的流水线；依据压缩数据规模

设置批处理数量,采用显存合并访问机制优化全局内存管理以保障较高带宽利用效率;结合压缩块码头格式,编写调用接口,完成封装;并通过调优内存分配阈值、批处理数量等关键参数,实现 GPU 计算效率与硬件资源的最优配置。

2.3 对比测试

本文利用层级对比原则设计四组对照实验:实验一(基线串行)、实验二(CPU 包内并行)、实验三(CPU 分层并行)、实验四(GPU 流水线批处理)。通过解压缩时间、吞吐量、加速比等指标,揭示并行粒度、计算架构与数据特征对解压缩效率的影响机制。实验环境配置如表 1 所示。

表 1 实验硬件参数

CPU	
型号	Intel(R) Xeon(R) Gold 6230R
核心	52 核; 52 线程
主频	2.10 GHz
L1 缓存	32 kB
L2 缓存	1 024 kB
L3 缓存	36 608 kB
GPU	
型号	NVIDIA GeForce RTX 3090
计算能力	8.6
CUDA 核心	82 × 128 CUDA Cores
基础 / 加速频率	1 707 MHz/1733 MHz
最大线程数	2 048
全局 / 常量内存	24 GB GDDR5X/65536 Bytes

四维高景宽幅一号卫星具备高数据量、高分辨率特性,搭载 32 片成像传感器,其多光谱与全色数据采用标准 JPEG2000 压缩模式。选取不同数据量、压缩比及分辨率的数据作为测试数据,以验证解压缩性能。遥感基线数据处理包括预处理、解压缩、分景、0 级生产模块。首先通过解扰、解交织、译码解析 AOS 帧格式,提取多光谱和全色虚拟信道有效数据进行解压缩处理;而后根据格网分景并归档。为此,需基于该卫星数据规范,设计解压缩模块的 API 接口。实验一、二设计基于支持串行和包内并行的 OpenJPEG 库设计 API;实验三基于 JPEG2000 算法设计,采用包间多线程(Thread)+包内细粒度并行(OpenMP)开发;实验四则针对 NVIDIA NVJPEG 2000 加速特性,设计兼容流水线批处理模式的 API。

为对比不同并行方法的性能差异,结合硬件指标和算法特性确定四组实验线程配置。实验一串行处理,线程数为 1,OpenJPEG 并行核心是将图像预处理划分为独立 Tile 分块,再将 Tile 划分为 Code Block 分配给不同线程处理^[15];实验二基于 CPU 核心设线程数为(13, 26, 52),通过效能对比确定最优线程数;实验三设(T_p, T_b)组合{(13, 4), (26, 2),

(52, 1)}(满足 T_p×T_b=52),探究两级并行线程最优分配。流水线数 PIP 决定 SM 空间划分,过多导致资源切换频繁,即设置 PIP<SM;批处理数决定 SM 的时间利用率,通常 Batch=SM×k(k 为 SM 内线程数)^[16]。基于 SM,设 batch 尺寸(10、20、30、40、50、80、160、320)与 PIP 梯度(10、20、30、40、50、80)交叉实验,确定高性能参数阈值。测试采用定量化控制确保可比性:多光谱数据选取 512 MB、1 GB、2 GB 三类样本;3:1, 4:1 压缩比样本;全色数据 4:1 用于分辨率分析。通过多维度量化评估 4 种方法解压缩性能。

3 结果分析

3.1 不同方法并行参数分析

实验二以多光谱载荷(压缩比 3:1)三组数据样本测试不同线程性能。图 1 结果显示,三组数据的线程数从 13 增加到 26 时解压缩效率提升,但超 26 后效率下降。52 核 CPU 环境下,线程数与效率并非线性正相关,26 线程为最优值,实际应用中可根据数据量配置线程数于较优区间以优化性能。另外,解压缩效率与数据量无线性关系,受内存带宽限制、算法复杂度、调度开销等多因素综合作用,导致其数据量变化规律复杂。

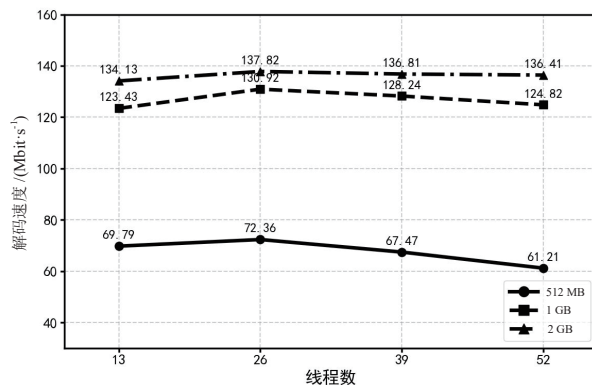


图 1 实验二不同线程数的解压缩速度

实验三与实验二测试数据相同。由图 2 可知,不同线程组合对不同数据量的解压缩效率存在适配关系。

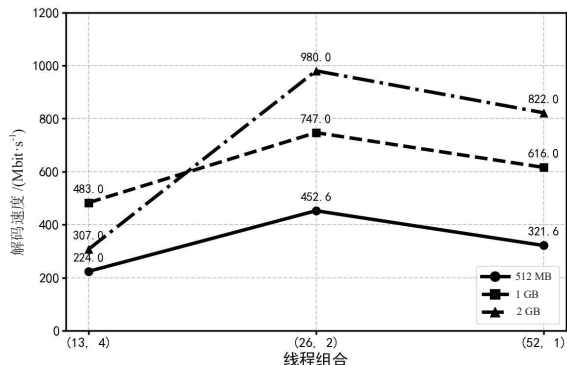


图 2 实验三不同线程组合的解压缩速度

三组数据中(26, 2)组合的解压缩效率最优,(52, 1)次之,(26, 2)最差。因 JPEG2000 包内解压缩算法细粒度运算特性与 CPU 在大规模并细粒度并行上的局限。数据量与线程组合呈非线性关系,需结合数据量及 CPU 性能适配线程组合以保障高效解压缩。

实验四与实验二测试数据相同。由图 3 可知,512 MB 数据下,流水线增加提升解压缩效率,批处理量则先增后降;1 GB 数据下,在流水线 ≤ 40 时,解压缩效率与 512 MB 趋势相同,当流水线达到 80 时,批处理量与效率正相关。但 2 GB 数据下,流水线和批处理量变化对效率波影响甚微。结果表明,数据量决定流水线优化上限。受 GPU 资源和内存带宽限制,小数据量因任务粒度较小致流水线利用率不足;当数量与 GPU 架构匹配时,流水线和批处理与效率呈正相关;但大数据量受调度瓶颈,不同组合变化对效率影响很小。故数据量和参数组合呈非线性适配关系,需基于数据量和关键参数,保证解压缩效率。

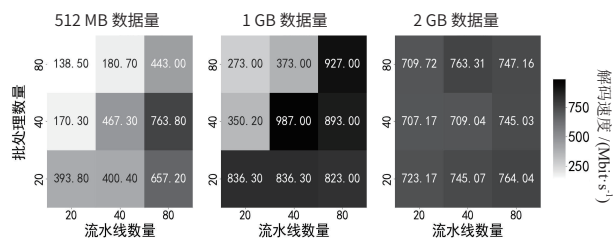


图 3 实验四交叉组合的解压缩速度

3.2 方法性能分析

本节选用多光谱载荷（压缩比 3:1）的三组数据作为测试数据。基于此前分析结果,选取实验二到四的最优解压缩结果,作为本节对比数据。由图 4 可知,数据量 ≤ 1 GB 时,实验一到四解压缩效率显著提升。512 MB 时实验四较实验一加速比为 12.91（时间从 112.3 提升到 8.7）；1 GB 时实验二到四加速比依次 3.35、19.63、25.26。实验三、四较实验一、二性能提升明显且差距小。数据量为 2 GB 时,受资源调度限制,实验四效率低于实验三。

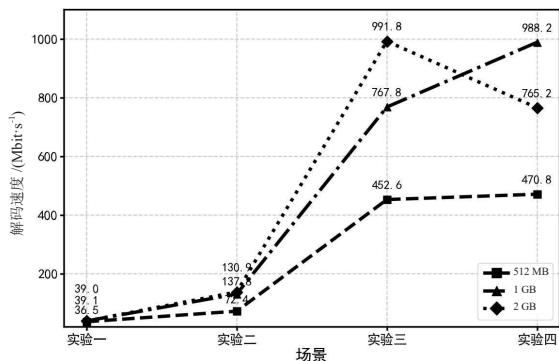


图 4 四组实验解压缩结果对比

结果表明,并行化是解压缩的核心加速器,且并行层级越丰富,效率提升越快。结合数据量和硬件成本分析,小数据量宜采用 GPU 异构加速,流水线批处理可最大化利用硬件资源;大数据量采用包间粗粒度+包内细粒度并行方法,可突破 CPU 瓶颈,平衡效率和资源保障高效运行。

3.3 压缩比效应分析

本节选用多光谱载荷（压缩比 3:1/4:1）两组数据作为测试数据。选取与此前相同的并行参数。由图 5 可知,压缩比越高计算复杂度越大,均解压缩时间越长。除实验三外,4:1 压缩比解压缩时间长于 3:1。实验三则因并行策略与硬件架构适配,抵消了复杂度损耗,性能更优。除实验三外,随着实验并行度提升,压缩速度和速率均显著增长。因此,压缩复杂度和并行能力互相制衡。多级并行策略可最大程度平衡高压压缩比的复杂度,实现存储和计算效率平衡;GPU 异构加速虽存损耗,仍优于 CPU 单级并行,为高压压缩比场景次优方案。

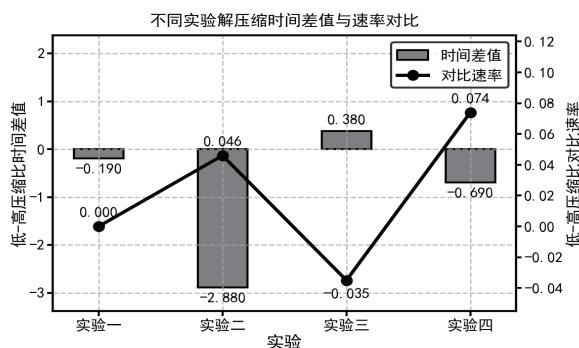


图 5 压缩比效能分析

3.4 分辨率效应分析

本节选用压缩比 4:1 的多光谱和全色的两组数据作为测试数据。选取与此前相同的并行参数。由图 6 可知,前三个实验中,MUX 解压缩耗时均短于 PAN,MUX 解压缩速度均高于 PAN,体现常规场景下,MUX 不仅吞吐量优势更显著,且与并行策略的适配性更优。

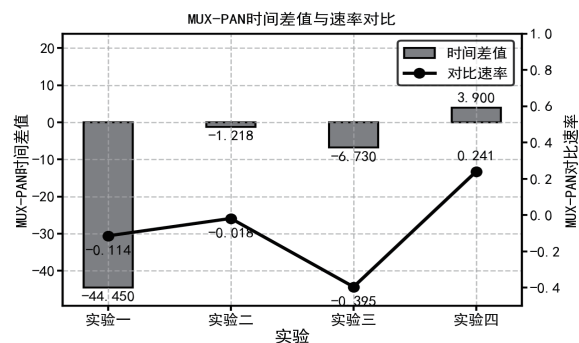


图 6 分辨率效能分析

可见, MUX 与 PAN 的解压缩效能差异, 核心是“压缩格式 - 分辨率 - 并行策略 - 硬件架构”的适配性权衡, 其优劣取决于两者协同匹配度: MUX 适配 CPU 主导的多级并行、高分辨率场景, PAN 适配 GPU 主导的异构加速、高分辨率场景。实际应用需依据分辨率、硬件架构及并行策略选压缩格式, 以最大化效能。

4 结论

本文针对 JPEG2000 遥感影像解压缩任务, 通过设计 CPU 与 GPU 多维度并行实验, 系统探究了不同并行策略的效能特征及适用场景。研究表明: 并行化是提升解压缩效率的核心加速手段, 且并行层级越丰富, 效率提升越显著。解压缩效能深度依赖数据特征与硬件架构的耦合关系。数据量决定并行策略的优化上限, 小数据量适配 GPU 异构加速以最大化硬件利用率, 大数据量则需依托 CPU 混合并行平衡效能与资源; 压缩比与并行能力存在制衡关系, 多级并行可有效抵消高压缩比带来的复杂度损耗; 分辨率与压缩格式的适配性受硬件约束, 体现为压缩格式、分辨率、并行策略、硬件架构的协同适配规律。本研究结论为构建面向不同应用场景的遥感影像处理系统, 在异构硬件平台选型与并行策略设计方面提供了关键性的量化依据与工程实践指导, 对提升遥感数据实时处理能力具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 张亚杰. 基于 GPU 实现 JPEG2000 高速遥感图像的解压缩技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [2] CHRISTOPOULOS C, SKODRAS A, EBRAHIMI T. The JPEG2000 still image coding system: an overview[J]. IEEE transactions on consumer electronics, 2000, 46(4): 1103-1127.
- [3] WANG W. JPEG2000 image compression method based on GPGPU[J]. Advanced materials research, 2013, 756-759: 1314-1319.
- [4] 张人愉, 李景山. 通用遥感卫星基带数据二级并行处理算法设计与实现 [J]. 遥感信息, 2019, 34(3): 54-61.
- [5] WU X Y, LI Y S, LIU K, et al. Massive parallel implementation of JPEG2000 decoding algorithm with multi-GPUs[EB/OL]. (2014-05-22)[2025-12-31]. <https://www.semanticscholar.org/paper/Massive-parallel-implementation-of-JPEG2000-with-Wu-Li/b1d60ae1a2308cf57063a3dd6fbc18bdc30e4946>.
- [6] 陈腾, 李微. 基于 GPU 和 CPU 协同加速的 JPEG2000 解码优化算法设计 [J]. 电子世界, 2020(10): 99-101.
- [7] CIZNICKI M, KIERZYNKA M, KOPTA P, et al. Benchmarking JPEG 2000 implementations on modern CPU and GPU architectures[J]. Journal of computational science, 2014, 5(2): 90-98.
- [8] 李皎皎. 超光谱数据无损压缩及 CUDA 并行加速研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
- [9] CIZNICKI M, KUROWSKI K, PLAZA A. GPU implementation of JPEG2000 for hyperspectral image compression[C/OL]. Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering. Washington: SPIE, 2011[2025-12-31]. https://www.researchgate.net/publication/253881559_GPU_Implementation_of_JPEG2000_for_Hyperspectral_Image_Compression.
- [10] 程晓飞. 基于 CPU/GPU 的 JPEG2000 遥感图像解压缩系统的设计与实现 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2018.
- [11] 王振宇. 基于 JPEG2000 的卫星图像压缩/解压技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [12] 张静. 光学影像在轨处理对 JPEG2000 算法压缩质量及效率的影响分析与评估 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [13] 白兆峰. 基于 GPU 的 JPEG2000 图像压缩编码技术的研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院西安光学精密机械研究所), 2016.
- [14] DATLA S, GIDIJALA N S. Parallelizing motion JPEG 2000 with CUDA[C/OL]. // 2009 Second International Conference on Computer and Electrical Engineering. Piscataway: IEEE, 2009[2025-12-31]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5380169>. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5380169>.
- [15] 刘方敏, 吴永辉, 俞建新. JPEG2000 图像压缩过程及原理概述 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002(10): 905-911.
- [16] 彭琰. 基于 GPU 的 JPEG2000 高速解码软件系统的研究与实现 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.

【作者简介】

马若琳 (1993—), 女, 河北邢台人, 硕士, 中级工程师, 研究方向: 遥感影像处理, email: m15652668862@163.com。

(收稿日期: 2025-11-24 修回日期: 2026-01-06)