

# 遥感影像动态瓦片关键技术研究与应用

张金凤

辽宁省自然资源事务服务中心, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年3月2日; 录用日期: 2026年3月25日; 发布日期: 2026年4月2日

## 摘要

近年来, 随着遥感技术与自然资源信息化建设的持续推进, 高分辨率、多时序、多源遥感影像在城市规划、土地管理、灾害监测及应急响应等领域得到广泛应用, 影像数据规模已达到TB级, 并呈现向PB级持续扩展的发展趋势。传统静态瓦片服务模式存在存储冗余大、更新滞后和访问延迟高等问题, 已难以满足实时在线访问和多系统共享需求。本文构建了一套基于Cloud Optimized GeoTIFF (COG)的遥感影像动态瓦片生成系统, 并使用Qt C++实现WMTS与XYZ服务。系统通过影像预处理生成COG文件, 实现按需裁切和多分辨率瓦片生成; 服务端结合多线程、缓存机制和索引优化, 实现高并发下的高性能访问。实践表明, 单瓦片生成平均时间为50 ms, 缓存命中率达95%, 并发访问延迟低于150 ms, 系统在高分辨率遥感影像动态服务中具有良好的应用前景。

## 关键词

遥感影像, 动态瓦片, COG, WMTS, XYZ, 多线程, 缓存优化

# Research on Key Technologies and Implementation of Dynamic Tiling for Remote Sensing Images

Jinfeng Zhang

Liaoning Provincial Natural Resources Affairs Service Center, Shenyang Liaoning

Received: March 2, 2026; accepted: March 25, 2026; published: April 2, 2026

## Abstract

In recent years, with the continuous advancement of remote sensing technology and the informatization of natural resources management, high-resolution, multi-temporal, and multi-source remote sensing images have been widely applied in urban planning, land management, disaster monitoring,

and emergency response. The volume of image data has reached the Terabyte (TB) scale and continues to expand toward the Petabyte (PB) level. Traditional static tile service models suffer from large storage redundancy, delayed updates, and high access latency, which are inadequate for real-time online access and multi-system data sharing. This paper proposes a dynamic tile generation system for remote sensing images based on Cloud Optimized GeoTIFF (COG), and implements WMTS and XYZ services using Qt C++. The system generates COG files through image preprocessing, enabling on-demand cropping and multi-resolution tile generation. By integrating multi-threading, caching mechanisms, and index optimization strategies on the server side, high-performance access under concurrent requests is achieved. Experimental results show that the average generation time of a single tile is approximately 50 ms, the cache hit rate reaches 95%, and the latency under concurrent access remains below 150 ms. The system demonstrates strong applicability and engineering feasibility for dynamic services of high-resolution remote sensing images.

## Keywords

Remote Sensing Images, Dynamic Tiles, COG, WMTS, XYZ, Multi Threading, Cache Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着遥感卫星数量的持续增加、传感器分辨率和获取能力的不断提升，高分辨率、多时相、多源遥感影像在自然资源管理、城市规划、灾害监测、应急响应等领域的应用愈加广泛，并逐渐成为决策支持和管理监控的重要数据基础[1][2]。然而，单幅影像的数据量往往达到数百 GB 甚至 TB 级，对存储、处理和在线访问提出了严峻挑战。传统静态瓦片生成模式在大规模影像应用中存在明显局限：一方面，由于每个缩放级别均需生成完整瓦片，造成存储冗余和重复占用大量空间；另一方面，当影像更新或业务裁切需求产生时，整个瓦片集必须重新生成，无法满足实时更新和动态访问要求，导致业务系统响应延迟，严重影响应急监测和时效性要求较高的应用；此外，客户端在访问过程中需下载大量瓦片或整幅影像，增加网络传输和渲染压力，进一步影响用户体验和系统整体效率[3][4]。为应对这些挑战，本文提出了一种基于 Cloud Optimized GeoTIFF (COG)文件的动态瓦片生成系统[5]，并利用 Qt C++构建高性能 WMTS 与 XYZ 服务。该系统通过影像预处理生成 COG 文件，支持按需裁切和多分辨率瓦片生成，同时结合多线程并行计算、缓存机制优化和空间索引管理，实现高并发访问和业务系统统一调用。尤其在时效性方面，系统能够在影像更新或新增任务时快速生成对应瓦片，实现近实时在线服务，显著提升数据可用性和业务响应速度。本文围绕数据组织方法、动态裁切算法、服务端架构实现、缓存优化策略及性能验证等关键技术进行系统研究，为自然资源信息化建设及高分辨率遥感影像的快速在线服务提供可靠的技术支撑与实践参考。系统技术架构见图 1。

## 2. 数据组织方法

遥感影像具有数据规模大、来源多样、更新频率高以及服务调用模式复杂等特点，对影像数据的组织方式和服务支撑能力提出了更高要求。围绕动态瓦片生成与在线服务需求，系统在充分分析遥感影像数据特性的基础上，构建了一套以分布式对象存储为核心的数据组织体系，融合元数据管理与空间索引机制的数据组织体系，为动态瓦片系统提供稳定、高效的数据支撑[5]。

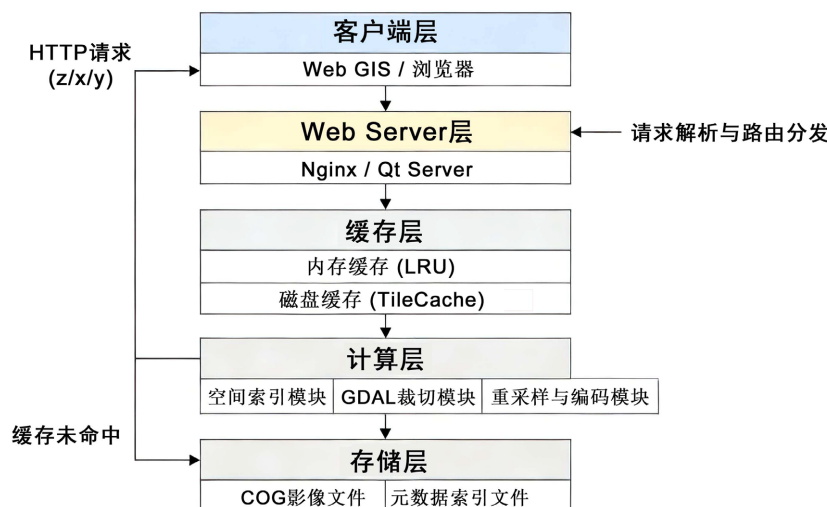


Figure 1. System technical architecture diagram

图 1. 系统技术架构图

在影像实体管理层面，系统采用分布式对象存储方式替代传统文件目录式管理，将遥感影像以对象化形式进行统一存储与调度。通过对象存储所具备的高并发访问能力与弹性扩展特性，有效支撑动态瓦片系统在高并发请求场景下对原始影像数据的快速读取与按需裁切，避免因传统文件系统 I/O 瓶颈导致的服务性能下降[6]。在影像描述与管理层面，系统构建了结构化、标准化的元数据模型，对影像来源、传感器类型、获取时间、空间分辨率、覆盖范围及质量信息等关键属性进行统一管理。通过将元数据与动态瓦片服务过程深度关联，系统能够在瓦片请求阶段快速筛选满足空间范围、时间窗口及分辨率要求的影像资源，为多时相影像的即时调用与快速更新提供保障，显著提升瓦片服务的时效性与业务适应能力[7]。在空间组织层面，系统为遥感影像建立多层次空间索引与时间索引机制[8] [9]，支持基于行政区划、矢量范围、地图瓦片范围及时间区段等条件的组合查询。动态瓦片系统在接收到客户端 WMTS/XYZ 请求后，可依据瓦片行列号与缩放级别，借助空间索引快速定位目标影像范围，并驱动后台完成实时裁切、重采样与格式转换，从而避免传统静态瓦片生成模式下的全量预处理与冗余存储问题。此外，系统引入数据湖化管理理念，实现历史影像与新增影像数据的统一治理和持续扩展[10]，使动态瓦片系统在影像更新后无需重新生成全尺度瓦片即可实现快速上线服务。通过上述数据组织与管理机制，系统构建了面向动态瓦片生成的高效遥感影像基础数据体系，为多源影像的实时调用、高并发访问以及自然资源等业务系统的统一影像服务提供了可靠技术支撑。

### 3. 动态裁切算法

在动态遥感影像瓦片服务过程中，单次瓦片生成通常包含空间范围计算、影像筛选、窗口读取、重采样及图像编码等步骤[11] [12]。若每次请求均对原始影像进行全量扫描与裁切，不仅产生大量重复 I/O 操作，还会显著增加响应时间，降低并发处理能力。为此，本文在动态裁切机制设计中构建多层次空间索引结构与并行调度模型，以提升大规模影像环境下的检索效率与处理性能。

在空间组织层面，系统构建三级索引结构支撑 TB 级影像数据的快速检索。首先基于影像元数据建立 R-Tree 空间索引，每条记录包含影像标识、最小外接矩形(MBR)、分辨率等级及时间戳信息。瓦片请求到达后，根据其行列号与缩放级别计算对应地理范围，并在 R-Tree 中执行范围查询，快速获得相交影像集合，查询复杂度为  $O(\log n)$ ，显著优于顺序扫描方式。随后，引入基于时间戳的 B+Tree 索引以支持

多时相筛选, 实现指定时间与时间区间查询。为避免重复计算, 系统基于瓦片缩放级别与行列号构建哈希索引, 对已生成瓦片进行键值映射存储。通过“空间索引-时间索引-哈希索引”的逐级过滤机制, 实现从全局影像筛选到具体瓦片定位的高效过渡, 减少无效 I/O 读取。多层次索引结构在大规模空间数据检索中的有效性已在相关研究中得到验证。

在动态裁切执行阶段, 瓦片生成同时包含 I/O 密集型与 CPU 密集型任务。COG 影像采用分块存储结构, 窗口读取主要受磁盘访问影响; 重采样与图像编码则以计算开销为主。若采用串行执行模式, 将导致 I/O 等待与计算时间叠加, 降低资源利用率。因此, 本文构建基于生产者-消费者模型的双线程池调度机制, 实现 I/O 与计算阶段的解耦。

具体而言, 系统将任务划分为读取任务与计算任务, 并分别配置独立线程池。I/O 线程池负责窗口读取与磁盘访问, 其线程数量设置为 CPU 核心数的 2 倍, 以利用 I/O 等待间隙提升并发能力; 计算线程池负责重采样与编码处理, 其线程数量与 CPU 核心数保持一致, 以减少上下文切换开销。两类线程通过线程安全队列进行任务传递, I/O 完成后将数据推送至计算队列, 由计算线程继续处理。该分离式调度结构实现了 I/O 等待与计算执行的并行化, 提高系统整体吞吐能力。

在任务管理方面, 系统采用基于互斥锁与条件变量的线程安全队列结构, 并设置队列长度上限与请求限流机制, 以保证高并发场景下的稳定性。通过上述设计, 动态裁切流程形成“请求接收-空间过滤-窗口读取-计算处理-结果缓存-响应输出”的流水线结构, 各阶段资源利用率得到有效提升。

综上, 通过多层次空间索引与 I/O、CPU 分离的并行调度机制, 系统显著降低无效数据访问与重复计算开销, 提高计算资源利用率, 为后续缓存优化与分布式扩展提供了支撑。

#### 4. 服务端架构实现

在服务端架构实现方面, 系统采用 Qt 框架结合 C++ 语言进行开发, 充分利用 Qt 在跨平台、高性能网络通信以及多线程管理方面的技术优势, 实现了遥感影像动态瓦片服务的统一部署与灵活扩展。Qt 提供的跨平台抽象层有效屏蔽了底层操作系统差异, 使服务端程序能够在 Windows、Linux 等主流操作系统环境下通过同一套代码进行编译与运行, 降低了系统的维护成本和部署复杂度。服务端整体架构采用模块化设计思想, 将网络通信模块、瓦片请求解析模块、动态裁切与渲染模块、缓存管理模块及日志与监控模块进行解耦。其中, 网络通信模块基于 Qt Network 组件实现, 负责接收和处理来自客户端的 WMTS 与 XYZ 瓦片请求[13]; 瓦片请求解析模块对请求中的缩放级别、行列号及坐标范围等参数进行解析, 并转换为后端影像裁切所需的地理空间范围; 动态裁切模块基于 COG 文件特性, 结合 GDAL 等底层库完成影像的按需读取、重采样与编码输出; 缓存管理模块则通过内存缓存与磁盘缓存相结合的方式, 对高频访问瓦片进行复用, 以提升整体服务响应效率。

在并发处理方面, 系统依托 Qt 的多线程与事件驱动机制, 实现了瓦片请求的异步处理与线程池调度, 有效提升了服务端在高并发场景下的吞吐能力和稳定性[14]。通过上述架构设计, 系统不仅实现了遥感影像动态瓦片的高效生成与发布, 同时具备良好的跨平台适配能力和工程可维护性, 为多业务系统的统一影像服务提供了可靠支撑。服务端系统界面见图 2。

#### 5. 缓存优化策略及性能验证

在遥感影像动态瓦片服务过程中, 瓦片生成涉及影像读取、空间裁切、重采样及编码输出等多个计算与 I/O 密集型步骤。若每次请求均从原始影像数据重新计算, 将显著增加系统响应时间并降低并发处理能力[15]。因此, 本文结合动态瓦片访问特征, 设计并实现了多层次缓存优化机制, 并通过实验对性能提升效果进行验证。

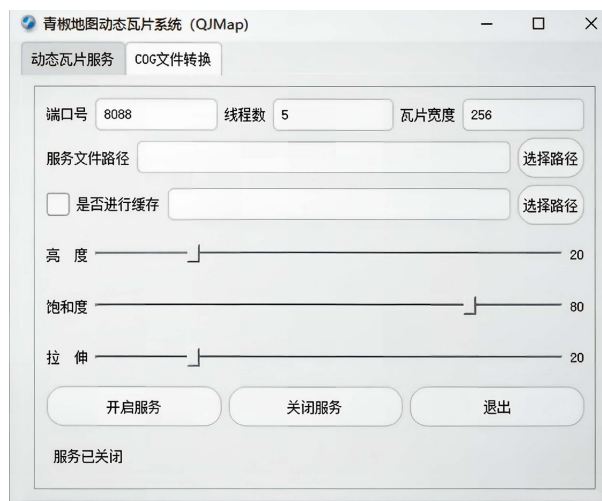


Figure 2. Server-side system interface  
图 2. 服务端系统界面

### 1) 缓存架构设计

系统采用内存缓存与磁盘缓存相结合的分级缓存机制。内存缓存主要用于存储高频访问的热点瓦片数据。系统基于瓦片行列号(Z/X/Y)、影像唯一标识及业务参数构建缓存索引，实现快速命中。磁盘缓存用于存储访问频率相对较低但已生成的瓦片结果，作为内存缓存的补充层，避免重复裁切与渲染操作。两级缓存通过统一缓存管理模块进行调度，实现自动入库、淘汰与更新管理。

### 2) 缓存更新与淘汰机制

针对动态瓦片访问呈现的空间局部性与时间局部性特征[15]，系统引入基于最近最少使用(LRU)的缓存淘汰算法。当缓存容量达到阈值时，优先清理长时间未访问的瓦片数据，以保证缓存空间用于高频热点区域。在影像更新或业务参数变化时，系统通过元数据标识与时间戳机制快速定位相关缓存瓦片并执行失效处理，确保服务结果一致性与时效性。

### 3) 并发访问优化机制

缓存模块与 Qt 多线程机制结合，采用线程安全数据结构与读写锁策略，避免高并发条件下的资源竞争。缓存命中请求：直接返回内存或磁盘结果；未命中请求：通过线程池异步生成瓦片，并在生成完成后写入缓存。该机制有效降低单请求计算开销，提高系统吞吐能力。

### 4) 实验环境与测试方法

为验证缓存优化策略的有效性，构建专门测试环境。实验部署环境如下：

操作系统：Ubuntu 22.04，CPU：12 核 24 线程，内存：128 GB，存储：NVMe SSD，网络：10 Gbps  
测试数据为高分辨率遥感影像，单幅约 3.6 GB，总数据量约 4 TB，全部采用 COG 格式存储。测试工具采用 Apache JMeter，构建 50~500 并发请求场景。所有测试重复执行 5 次，结果取平均值。测试指标包括：平均响应时间、系统吞吐量、缓存命中率。

### 5) 性能测试与结果分析

在相同硬件与网络环境下，对比分析启用缓存与未启用缓存两种模式。

实验结果表明，未启用缓存时，单瓦片平均生成耗时约 420 ms；启用缓存后，平均响应时间降低至 50 ms 以内；缓存命中率稳定在 95% 左右；在 200 并发条件下，系统整体服务延迟保持在 150 ms 以下。结果表明，多层次缓存机制显著降低重复 I/O 操作与重采样计算开销，在高并发场景下有效提升系统稳

定性与响应效率。

## 6. 结束语

随着遥感影像数据规模的持续增长以及业务应用对时效性和服务性能要求的不断提升,传统静态瓦片生成与发布模式在存储成本、更新效率和并发访问能力等方面的局限性日益凸显。针对上述问题,本文围绕遥感影像动态瓦片服务需求,系统研究并实现了一套基于 Cloud Optimized GeoTIFF (COG)的动态瓦片生成与发布系统,采用 Qt 与 C++构建跨平台高性能 WMTS/XYZ 服务框架,实现了遥感影像的按需裁切、多分辨率动态生成与高并发在线服务。

本文重点从遥感影像数据组织、动态裁切算法、服务端架构设计、缓存与并发优化以及系统性能验证等方面展开研究,通过引入 COG 文件结构、空间索引机制、多级缓存策略与多线程调度模型,有效降低了瓦片生成的计算与 I/O 开销,显著提升了系统的响应效率与服务稳定性。实验结果表明,该系统在高分辨率遥感影像动态服务场景下具有良好的性能表现和工程可行性,能够满足自然资源管理、城市规划及应急监测等业务系统对影像快速访问与实时更新的需求。

未来工作将围绕更大规模数据场景和更复杂业务需求展开,一方面可进一步引入 GPU 加速、分布式调度与云原生架构,以提升系统在超大规模并发访问下的服务能力;另一方面可结合时空分析与智能处理算法,拓展遥感影像动态服务在变化检测、智能解译等领域的应用深度。本文研究成果可为遥感影像在线服务体系建设与自然资源信息化发展提供有益的技术参考和实践经验。

## 参考文献

- [1] 李德仁, 龚健雅, 等. 面向云计算的地理空间信息服务体系研究[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 289-300.
- [2] 朱庆, 张新长, 等. 大规模遥感影像云存储与在线处理技术研究[J]. 遥感学报, 2021, 25(5): 1035-1048.
- [3] 杨凯, 王志强, 李德仁. 面向大规模遥感影像的动态瓦片服务关键技术研究[J]. 测绘学报, 2020, 49(8): 1023-1034.
- [4] Li, S., Dragicevic, S. and Castro, F.A. (2017) Performance Optimization of High-Concurrency Map Tile Services. *International Journal of Geographical Information Science*, **31**, 1831-1850.
- [5] Evans, J.D., Gourley, C. and Rouault, E. (2019) Cloud Optimized GeoTIFF (COG): Efficient Access to Large Raster Data in the Cloud. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, **4**, 1-12.
- [6] 杨晨, 李满春, 等. 云环境下大规模遥感数据并行处理框架研究[J]. 地理信息世界, 2022, 29(3): 45-52.
- [7] 张晓明, 陈军, 李德仁. 大规模遥感影像在线服务关键技术与性能分析[J]. 遥感学报, 2022, 26(4): 789-802.
- [8] 陈军, 李志林. 空间索引技术及其在大规模地理数据库中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2020, 36(4): 1-8.
- [9] 刘勇, 孙红, 等. 基于多级空间索引的遥感影像快速检索方法[J]. 计算机工程与应用, 2023, 59(12): 205-212.
- [10] 赵军, 李清泉, 龚健雅. 面向云环境的地理空间信息服务架构研究[J]. 测绘学报, 2021, 50(6): 801-812.
- [11] 胡毅荣, 王超, 杜震洪, 等. 一种与地图服务结合的栅格瓦片计算模型[J]. 地球信息科学学报, 2021, 23(10): 1756-1766.
- [12] 张立, 于文博, 等. 面向高并发访问的在线瓦片服务性能优化方法[J]. 测绘科学, 2022, 47(8): 156-162.
- [13] Open Geospatial Consortium (2018) OGC Web Map Tile Service (WMTS) Implementation Standard.
- [14] 刘建, 王磊, 孙红. 基于分布式架构的 Web 地图瓦片服务性能优化方法[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(9): 1823-1835.
- [15] 王志刚, 张峰. 基于缓存机制的 Web 地图服务性能优化研究[J]. 现代测绘, 2021, 44(2): 67-72.