

国产化环境下地图大批量线状符号高效交互方法研究

刘云 冯俊 陈佰权

中国电子科技集团公司第二十八研究所

DOI:10.32629/gmsm.v9i3.2490

[摘要] 针对国产化GIS终端算力薄弱,大批量地图线状符号存在渲染卡顿、选取延迟等问题,本文提出一种适配国产化环境的线状符号高效交互优化方案。该方案采用双线程架构分离界面交互与后台计算任务,依托最小包围矩形构建空间索引,消除全局遍历带来的算力损耗,同时结合浏览、编辑两类业务场景,自适应切换栅格与矢量渲染模式。基于飞腾国产终端开展对照实验,结果表明:该方案可显著降低线状符号选取延迟,有效提升国产化GIS地图交互流畅度,可满足GIS日常业务运行需求。

[关键词] 国产化环境; 电子地图; 线状符号; 多线程; 空间索引

中图分类号: G255.4 文献标识码: A

Research on Efficient Interactive Method for Mass Linear Symbols of Maps Under Domestic Independent Environment

Yun Liu Jun Feng Baiquan Chen

THE 28TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION

[Abstract] Given the insufficient computing power of domestic GIS terminals, massive linear map symbols suffer from rendering lag and selection delay. This paper proposes an efficient interactive optimization method for linear symbols applicable to domestic GIS environments. This method separates interface interaction and background computing via a dual-thread structure, and establishes a spatial index based on minimum bounding rectangles to reduce computational cost caused by global traversal. Besides, it realizes adaptive switching between raster and vector rendering modes for map browsing and editing scenarios. Comparative tests on Feiteng domestic terminals verify that the proposed method can greatly reduce symbol selection delay, improve map interaction fluency, and meet the daily operational demands of GIS services.

[Key words] domestic environment; electronic map; linear symbol; multi-thread; spatial index

1 引言

1.1 研究背景

国内信创国产化改造全面落地,党政、应急、自然资源、市政管网等行业GIS系统逐步完成从Windows+英特尔架构到国产麒麟系统+国产CPU的全栈适配^[1]。线状符号是GIS地图核心要素,常用于表达道路、管线、行政边界、巡检轨迹等线性地理数据,实际业务中单地图线状符号数量常达上千条,对地图渲染、线路选取与节点编辑性能要求较高。

相较于商用计算机,国产低配终端存在CPU单核性能弱、集成显卡图形加速能力不足、系统图形调度优化不足等短板。目前多数国产化GIS软件直接沿用国外商用GIS交互逻辑,未针对国产硬件做轻量化适配,存在主线程任务过载、渲染模式单一、检索效率低下等问题,地图拖拽卡顿、线路选取延迟明显,无法满足应急指挥、管网抢修等实时性业务需求。因此,设计一套轻

量化、高适配的线状符号交互优化方案,对国产化GIS系统性能提升具有重要现实意义。

1.2 国内外研究现状

国外GIS技术发展成熟, ArcGIS、QGIS等平台依托硬件图形加速、成熟空间索引和线程解耦技术,可支撑海量线状符号高效交互。但其底层接口、调度逻辑均适配Windows与商用显卡,移植至国产Linux系统会出现兼容故障,且核心算法闭源,存在技术依赖风险,无法满足国内信创自主可控要求。

国内现有GIS国产化优化研究多集中于地图瓦片加载、面要素渲染适配,针对线状符号跨度大、节点多、编辑精度要求高的专属特性研究不足。多数方案仅简单拆分线程或引入通用空间索引,未结合栅格矢量双渲染模式做场景化适配,整体功耗偏高,依旧难以适配低配国产办公终端。基于现有研究缺口,本文开展针对性优化研究。

1.3 研究内容与创新点

本文针对国产化环境下大批量线状符号渲染卡顿、检索缓慢、编辑延迟问题,设计轻量化优化方案。搭建双线程异步调度架构,分离界面交互与后台渲染、计算任务,避免UI主线程阻塞;基于线状要素最小包围矩形构建空间索引树,替代传统全局遍历检索,降低检索算力消耗;设计栅格-矢量动态渲染策略,区分地图浏览与线路编辑场景,兼顾运行性能与编辑功能;构建空间索引粗筛+距离加权精筛的二级选取机制,同时实现线路编辑后索引数据动态更新。

主要技术创新点为,贴合国产低算力CPU特性,采用完全隔离双线程架构,从源头解决主线程卡顿问题;适配线状符号空间特征,采用二级筛选机制,以极低算力开销实现线路精准选取;无硬件图形加速依赖,通过软件动态切换渲染模式,平衡地图浏览与精细化编辑需求;

2 相关技术基础

本文研究涉及多线程技术、栅格与矢量图形渲染、最小包围经纬度矩形、空间索引树以及距离加权算法五大核心基础技术,各项技术共同支撑本文大批量地图标号高效交互方案的设计与落地。

其中线程是操作系统资源调度的最小单元,多线程技术能够实现多任务并行处理,充分挖掘CPU多核运算能力,避免单一线程阻塞卡顿^[2]。在GIS可视化界面中,主线程专门负责界面绘制、鼠标与键盘响应等实时人机交互工作,一旦承载大批量图形渲染、空间数据计算等耗时任务,就会直接造成界面无响应、操作延迟等问题,而辅助线程可独立承接后台重型运算任务,与主线程异步运行,实现前后台任务完全解耦,不过国产操作系统虽全面兼容多线程调度机制,但国产硬件单核运算性能偏弱,主线程承压能力远低于商用平台,因此必须通过严格的线程任务划分,将所有耗时操作迁移至后台线程运行,保障前端交互流畅性。

在地图标号渲染层面,栅格图形与矢量图形是两种主流渲染方式,二者特性互补且各有应用短板,栅格图形依托像素点阵完成图像绘制,渲染逻辑简单、硬件资源消耗低,适合大批量标号静态展示场景,但存在无法精细编辑、放大失真、交互性差的缺陷^[3],矢量图形依靠数学坐标与几何路径描述图形形态,支持无损缩放、实时拖拽与节点编辑,交互性能优异,但大批量矢量图形同步渲染会产生巨大算力开销,极易造成国产化终端界面卡顿,因此结合两种图形的优缺点设计动态切换渲染模式,是平衡地图渲染性能与编辑交互能力的关键思路。

在空间数据处理层面,最小包围经纬度矩形是地理空间要素检索的基础支撑,该矩形能够以极简的边界坐标完整包裹单个或批量地图标号,无需解析复杂的图形轮廓即可判定要素空间范围,坐标运算难度低、算力消耗小,十分适配国产化硬件的运算能力,同时可以快速完成空间图形相交、包含关系判断,为后续空间索引构建提供标准化基础数据^{[4][5]};依托最小包围经纬度矩形可以搭建分层空间索引树,该树形索引结构能够对海量

量地图标号进行空间分区管理,摒弃传统全局遍历检索模式,从根节点到叶子节点逐层匹配空间范围,将要素检索时间复杂度大幅降低,标号数量越多,索引优化带来的检索效率提升效果越突出,可有效解决传统标号点击选中延迟过高的问题。

最后在标号精准拾取环节,距离加权算法是完成候选标号精准匹配的核心算法,该算法依托欧式距离计算鼠标点击位置与候选标号的空间间距,通过距离权重判定用户真实想要选中的目标标号,算法逻辑简单、匹配准确率高,搭配空间索引筛选后的小规模候选标号集使用,能够以极低的算力开销完成高精度标号拾取,进一步优化地图人机交互体验。以上五类基础技术相互配合、各司其职,共同构成本文国产化环境下地图大批量标号高效交互方法的理论底层支撑。

3 传统地图线状符号交互方案及国产化环境下的缺陷分析

传统线状符号交互流程全部运行于UI主线程,依次完成全量线路矢量渲染、鼠标点击全局遍历检索、选中线路矢量重构编辑三步操作。该方案结构简单,但未做任务拆分与场景适配,仅能适配高性能商用计算机,无法适配低配国产化终端。传统方案所有渲染、检索、计算任务均堆积于主线程,线状符号数量达到1000条时,主线程无法及时响应拖拽、缩放、选取操作,地图交互迟滞明显,影响业务操作效率。传统方案采用全局遍历检索线路,无论点击位置如何,都需要比对全部线路数据,千条线路场景下单次检索延迟较高,快速点击时易出现操作堆积、界面卡死问题。依托普通数组存储线路数据,无空间分区管理机制,地图视野切换、局部筛选均需要全局遍历,进一步加剧硬件资源消耗,且线路渲染数据与编辑数据高度耦合,后期维护难度大。

对应优化方向:实现前后台线程解耦;动态切换栅格与矢量渲染模式;以空间索引树替代全局遍历;线路编辑后同步更新索引数据。本文优化方案围绕以上方向完整设计。

4 国产化环境下大批量线状符号高效交互方法设计

本文提出的轻量化优化方案包含后台栅格批量渲染、空间索引树构建、二级筛选线路选取、矢量编辑与索引动态更新四大核心模块,整套流程依托双线程异步机制运行,能够适配国产终端低算力硬件运行条件。

方案整体架构分为主线程与辅助线程两大执行单元,完整业务流程如下:由辅助线程完成线状要素包围盒求解与栅格图层批量渲染,同步完成空间索引树的搭建并将只读索引数据推送至主线程;主线程接收鼠标交互指令,结合索引粗筛与距离加权精筛实现线路选取,被选中要素切换至矢量渲染模式以开展节点编辑,同时后台线程同步完成索引信息更新。两类线程具备清晰的职责边界,主线程仅负责人机交互、线状要素矢量编辑与选取判定,不承担各类高耗时计算及渲染工作;数据加载、栅格渲染、索引构建与索引更新等全部后台运算任务均交由辅助线程执行,二者完全异步隔离。

在辅助线程栅格图形批量生成环节,后台线程预加载全部线状符号的线型、坐标、线宽参数,批量渲染融合生成单张栅格

线路图层叠加于底图之上，并以30ms固定周期跟随地图视域实时刷新。该方法仅执行像素贴图操作，算力消耗极低，可在无硬件图形加速的国产集成显卡环境下稳定运行。

空间索引树的构建以线状要素最小包围矩形为基础，依据各条线路经纬度极值求解专属包围矩形 $Polygon_i = \{ (Lon_{left}, Lat_{top}), (Lon_{right}, Lat_{bottom}) \}$ ，以此作为索引树分层搭建的前置基础数据。索引树采用分层拓扑结构设计，根节点覆盖场景内所有线状符号的完整地理范围，中间节点逐层对半分地理空间以划分下级子区域，叶节点存储单条线路的最小包围矩形与唯一线路编号；完整索引数据在后台生成并设置为只读属性，持续实时同步至前端主线程供交互查询调用。

线状符号选取采用双层筛选逻辑，首先依据鼠标点击坐标与预设选取容差生成点击包围矩形，消除人工点击点位偏移带来的选取误差，提升交互容错性。筛选流程分为粗筛与精匹配两步，粗筛阶段主线程遍历索引树节点，快速剔除与点击区域无空间交集的线路分支，仅保留少量周边候选要素，从根源削减检索计算量；粗筛得到候选线路集合后，通过点到线段最短距离算法完成精准匹配。设鼠标点击点为 $P(x_0, y_0)$ ，线状符号线段两端为 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ ，构建向量 $\vec{AB}$ 与 $\vec{AP}$ ，通过投影系数 t 判断垂足位置，分三类情况计算最短距离：

当投影系数 $t \leq 0$ 时，垂足落在端点A外侧，最短距离为点P到A的直线距离；当投影系数 $t \geq 1$ 时，垂足落在端点B外侧，最短距离为点P到B的直线距离；当投影系数 $0 < t < 1$ 时，垂足落在线段AB区间内，最短距离为点到线段垂直距离。P点到线段AB最短距离计算公式为：

$$d = \frac{|(x_2 - x_1)(y_1 - y_0) - (x_1 - x_0)(y_2 - y_1)|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$$

再结合距离权重公式完成线路排序匹配： $w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^n d_i}$ ，权重值越小，代表点击距离该线状符号越近，在拾取容差范围内时，系统自动选取权重最小的目标线状符号。

完成线路选取后，系统对当前操作线路单独启用矢量渲染，支持节点拖动、坐标微调等编辑操作；若线路几何坐标发生改动，后台线程会同步更新该要素对应的最小包围矩形与索引节点，保障后续空间检索数据准确可靠，场景内其余未编辑线路维持低功耗栅格渲染状态，有效控制终端整体硬件负载。

5 实例验证与性能分析

本次实验采用控制变量对照实验，仅保留算法差异单一变量，每组实验重复5次并剔除极值取平均值，保证实验结果客观可靠。采用低、中、高三档线路负载，分别为100条、500条、1000条线状符号，分别对应均匀分布、局部密集、全域交织三种真实业务场景。统一地图层级、线宽、选取容差等参数，实验期间关闭后台无关进程，排除外界干扰。

设定固定鼠标测试点位，依托空间索引完成候选线路粗筛，摒弃传统中心点距离算法，采用点到线段最短距离完成精准距

离求解，结合距离权重公式完成线路匹配。线路完成拖拽、节点编辑等操作后，后台同步更新线段坐标、最小包围矩形与空间索引数据，彻底规避检索错位、选取失效等问题，保证实验数据真实贴合实际地图交互场景。本次实验选取两项核心性能指标：单次主线程绘制耗时、线状符号选取响应延迟，全面衡量方案渲染性能与交互实时性。

两种方案性能测试数据如表1所示：

表1 性能测试数据

线状符号数量	测试方案	单次主线程绘制耗时 (ms)	线状符号选取响应延迟 (ms)
100	传统方案	26	15
100	本文优化方案	22	8
500	传统方案	121	75
500	本文优化方案	24	13
1000	传统方案	235	174
1000	本文优化方案	26	23

结合实验数据可得出两点结论：一是动态渲染模式大幅缩短主线程地图绘制耗时，主线程绘制耗时低于30ms，地图拖拽无卡顿；二是二级检索机制将选取延迟稳定控制在30ms以内，优于传统方案，人机交互体验大幅提升。同时方案可兼顾线路编辑性能，无选取错位等问题，适配国产化GIS实际业务场景。

6 结语

针对国产化低配终端加载海量线状符号时存在交互卡顿、要素检索效率低下等痛点，本文提出一种融合双线程调度、动态渲染与空间索引技术的轻量化优化方案。该方案实现UI线程与后台计算线程完全解耦，根除主线程阻塞引发的地图操作卡顿；提出栅格-矢量协同动态渲染策略，在无硬件加速条件下兼顾地图漫游浏览与线状要素编辑两类业务需求；搭建二级线状要素选取检索机制，显著降低检索过程算力开销，可良好适配低算力国产硬件终端。

[参考文献]

[1]范炜,秦雨姝,杜永乐.信创环境下的三维管线管理系统建设与应用[J].北京测绘,2024,38(9):1289-1294.
[2]唐富强,于鸿洋,张萍.Linux下通用线程池的改进与实现[J].计算机工程与应用,2012,48(28):77-83.
[3]王昌,滕艳辉.矢量栅格一体化数据结构设计与应用[J].计算机工程,2010,36(20):88-89,101.
[4]郑坤,朱良峰,吴信才.3D GIS空间索引技术研究[J].地理与地理信息科学,2006,22(4):35-39.
[5]叶常春,罗金平,周兴铭.一种加快WebGIS服务器响应速度的空间索引[J].软件学报,2005,16(5):819-826.

作者简介：

刘云(1991—),男,汉族,湖北荆州人,硕士研究生,从事地理信息系统开发相关工作。