

瓦片金字塔模型嵌套时空立方体优化多源异构时空数据统一技术研究

刘宏巍, 王 鲸, 越子桐

中国信息安全研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2025年4月24日; 录用日期: 2025年6月20日; 发布日期: 2025年6月30日

摘 要

在特定业务场景中, 时空数据统一具有核心战略价值。它是联合行动体系的神经网络, 是精确决策的关键基础, 也是环境态势感知的前提条件。时空数据不统一可能导致数据融合难度增大、环境态势感知受限、决策效率降低、资源调度和协同配合困难等问题, 这不仅影响行动任务的准确性和高效性, 还可能对行动安全和国家安全带来重大隐患。本研究基于业内瓦片金字塔模型与Gail Langran时空立方体模型的技术原理解, 本研究提出一种基于瓦片金字塔模型的嵌套优化方法。通过数学建模与算法设计, 并引入GRU网络实现时空特征融合, 探索利用瓦片金字塔模型结构弥补时空立方体模型中处理不同时间和空间分辨率的数据, 优化多源异构时空数据统一的管理和分析, 提高数据融合的可靠性和效率, 提升业务效能提供新思考。

关键词

多源异构数据, 时空数据统一, 瓦片金字塔模型, 时空立方体模型

Research on the Integration Technology of Multi Source Heterogeneous Spatiotemporal Data for Tile Pyramid Model Nested Spatiotemporal Cube Optimization

Hongwei Liu, Jing Wang, Zitong Yue

China Information Security Research Institute Co., Ltd., Beijing

Received: Apr. 24th, 2025; accepted: Jun. 20th, 2025; published: Jun. 30th, 2025

Abstract

In specific business scenarios, the unification of spatiotemporal data has core strategic value. It is the neural network of the joint action system, the key foundation for precise decision-making, and the prerequisite for environmental situational awareness. Inconsistent spatiotemporal data may lead to increased difficulty in data fusion, limited environmental situational awareness, reduced decision-making efficiency, and difficulties in resource scheduling and collaborative cooperation. This not only affects the accuracy and efficiency of operational tasks, but also may pose significant risks to operational and national security. This study proposes a nested optimization method based on the understanding of the technical principles of the tile pyramid model and the Gail Langran spatiotemporal cube model in the industry. By using mathematical modeling and algorithm design, and introducing GRU network to achieve spatiotemporal feature fusion, we explore the use of tile pyramid model structure to compensate for the processing of data with different temporal and spatial resolutions in spatiotemporal cube models, optimize the unified management and analysis of multi-source heterogeneous spatiotemporal data, improve the reliability and efficiency of data fusion, and provide new ideas for enhancing business efficiency.

Keywords

Multi Source Heterogeneous Data, Spatiotemporal Data Unified, Tile Pyramid Model, Spatiotemporal Cube Model

Copyright © 2025 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. 时空数据融合现状分析

时空统一特指时间和空间维度的静动态数据，即描述实体地理空间位置或该实体时间变换的现象。时空统一旨在突破原始数据仅记录单一时间属性或静态空间位置的局限，若某实体时间维度与空间维度的数据实现整合、关联和标准化，可描述该实体在“何时”（时间）、“何地”（空间）、“发生何事”（属性变化），可赋能实时动态决策与预测，并提高态势决策效果。在现代业务需求实时性、复杂性背景趋势下，多渠道多设备采集的海量时空数据亟需抽取，实现对数据进行解析、归一化，促成时空数据融合，并在模型算法叠加分析下不断反馈时空数据“缺口”，提高时空数据精度是解决时空数据最大内容。而现阶段，时空数据统一面临如下挑战：

1.1. 时空数据多模态与碎片化

对卫星遥感、物联网传感器、GIS 矢量、社交轨迹等不同数据源产生的多模态数据存在格式壁垒，如遥感数据多为栅格，表现为 TIFF、HDF 格式。GIS 数据多为矢量，表现为 Shapefile、GeoJSON 格式。轨迹数据为时序坐标流等等，这就需要时空粒度、坐标系、语义定义等格式进行复杂转换。

1.2. 时空基准与精度不统一

时空基准不统一是时空数据统一的重点和难点，直接造成时空数据无法准确对齐、叠加分析，造成某实体实际发生轨迹与时间形成“错位”，可能导致重大作战风险。从时间基准看，一是时区差异、时间粒度不同背景下异步数据对齐问题。如传感器的毫秒级数据和年度统计数据，时间系统里阳历和农历的

问题。二是不同设备下时钟精确度不同步造成时间戳误差。从空间基础看，以栅格、矢量、坐标系为代表的空间数据不统一，导致位置无法直接对齐。此外，我国常用的空间数据格式与国际数据存在差异，转换时可能有偏移，也会影响叠加分析。

1.3. 存储计算效率与实时检索的高要求

面对特定区域的常态化监控时，时空数据往往呈现指数级增长，如每日新增遥感影像、监控目标的行进轨迹数据等，传统数据库难以处理多维索引(时空 + 属性的三维索引)。瓦片金字塔模型嵌入到时空立方体模型优势在：一是在特定区域，金字塔模型可通过预先将数据分层、分块处理，将计算压力转移到离线阶段。在实时检索时，直接读取预处理的瓦片，避免实时生成数据的计算开销。二是支持分布式部署和缓存机制，可扩展性强，适用于成熟区域部署。

2. 瓦片金字塔模型嵌套时空立方体现实优化

时空立方体模型最早由瑞典学者 T.哈格斯特朗(Torsten Hagerstrand)于 1970 年提出。是一种用于整合、分析和可视化时空数据(同时包含空间位置和时间维度的数据)的核心框架。其核心价值在将时间坐标、空间坐标与属性结合，构建三维立方体结构，以揭示数据在空间和时间上的动态演变规律。但其弱点典型体现在三维可视化在二维平面上的表达困难，处理多时间维度或复杂计算时出现延迟[1]。

相较之下，瓦片金字塔模型是一种二维化的多分辨率层次模型，其本质在通过将地图不断切片分层，切成一系列等比例图片(瓦片)，每一层级图片大小相等且分辨率相同[2]。瓦片金字塔从底层到顶层，分辨率逐渐降低，但表示的地理范围不变，只是将提供的地图不断缩放，把比例尺最大的地图图片作为金字塔的底层，然后进行不断分块，从地图图片，从上至下、从左至右，不断进行缩放切割。从底层(默认 0 层)切割至意向需求清晰度(N 层)，构成整个瓦片金字塔模型，如图 1 所示。

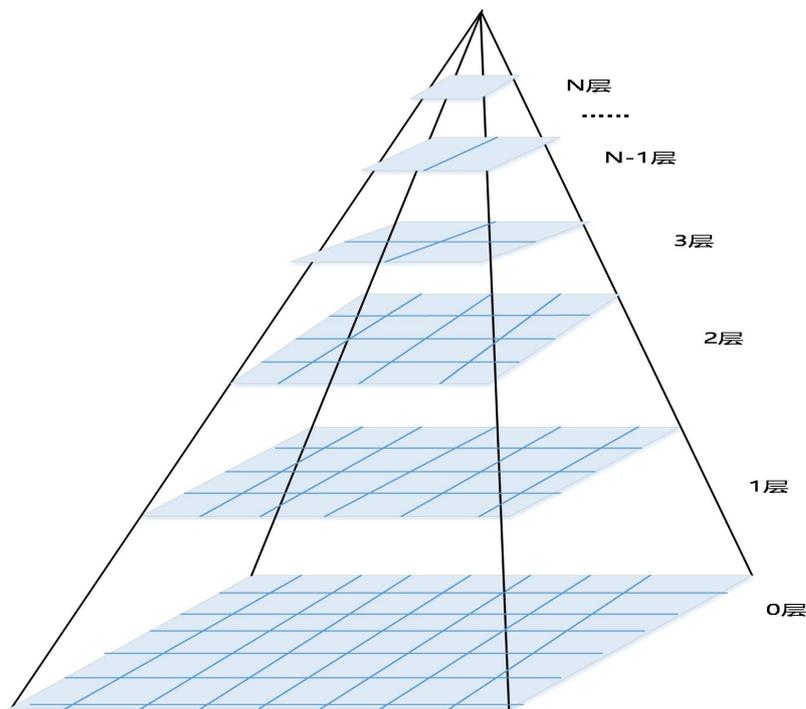


Figure 1. Schematic diagram of tile pyramid model
图 1. 瓦片金字塔模型示意图

2.1. 瓦片金字塔模型的数学推导分析

1) 分辨率公式推导

瓦片金字塔模型分辨率 R_z 定义为单位像素对应的地理距离，其推导基于地球赤道周长和层级划分规则：

地球赤道周长： $C_{earth} = 2\pi R_{earth} \approx 40075 \text{ km}$ ，其中 $R_{earth} = 6378.1 \text{ km}$ 。

层级划分规则：

在 Web 墨卡托投影中，层级 $z = 0$ 将地球映射为一个 256×256 像素的瓦片，因此其分辨率为：

$$R_0 = \frac{C_{earth}}{256} = \frac{40075 \times 10^3 \text{ m}}{256} \approx 156543 \text{ m/像素}$$

每增加一级 z ，分辨率提升一倍，故层级 z 的分辨率为：

$$R_z = R_0 \times 2^{-z} = \frac{C_{earth}}{256 \times 2^z}$$

最大层级计算：

若目标分辨率 $R_{target} = 1 \text{ m}$ ，则最大层级满足：

$$Z_{\max} = \left\lceil \log_2 \left(\frac{C_{earth}}{256 \times R_{target}} \right) \right\rceil = \left\lceil \log_2 \left(\frac{40075 \times 10^3}{256} \right) \right\rceil \approx 20$$

2) 瓦片行列号的投影转换证明

给定经纬度 (lon, lat) ，其对应的瓦片行列号计算基于 Web 墨卡托投影的正反解公式：

投影正解：将经纬度转换为平面坐标 (x, y) ：

$$x = \frac{lon + 180}{360} \times 2^z, \quad y = \left\{ 1 - \frac{\ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{lat}{2} \cdot \frac{\pi}{180} \right) \right]}{\pi} \right\} \times 2^z$$

瓦片行列号计算：

$$tileX = [x], \quad tileY = [y]$$

反解验证：通过 $tileX$ 和 $tileY$ 可反推瓦片左上角经纬度：

$$lon_{\min} = \frac{tileX}{2^z} \times 360 - 180, \quad lat_{\max} = \arctan \left\{ \sinh \left[\pi \left(1 - \frac{tileY + 1}{2^z} \right) \right] \right\} \times \frac{180}{\pi}$$

该过程保证投影连续性和瓦片边界无缝对齐。

2.2. 时空立方体张量定义与动态扩展

1) 三维张量定义

时空立方体定义为张量 $C \in R^{X \times Y \times T}$ ，其中：

空间维度： $X \times Y$ ：由瓦片金字塔层级 Z 确定的空间网格数：

$$X = \left\lceil \frac{\text{区域宽度}}{R_z} \right\rceil, \quad Y = \left\lceil \frac{\text{区域高度}}{R_z} \right\rceil$$

时间维度 T ：按固定间隔 Δt 划分的时间切片数，总时间跨度为 $T = \frac{t_{end} - t_{start}}{\Delta t}$ 。

张量元素 $C(x, y, t)$: 表示在位置 (x, y) 和时间 t 的属性值。

2) 动态扩展数学机制

时间切片扩展: 当新增时间片 t_{new} 时, 张量扩展为 $C' \in R^{X \times Y \times (T+1)}$, 并更新哈希表索引:

$$HashTable(t_{new}) = T + 1$$

时间复杂度为 $O(1)$ 。

空间扩展: 若区域范围扩大, 重新计算 X 和 Y , 并填充新网格数据, 复杂度为 $O(X_{new} \times Y_{new} \times T)$ 。

3) 模型复杂度与效率分析

从时间复杂度分析看, 在瓦片索引查询方面, 四叉树索引将空间范围查询复杂度从线性 $O(N)$ 降至对数级: $O(\log_4 N)$, 其中 $N = 4^{Z_{max}}$ 为总瓦片数; 在 GRU 特征提取方面, 设输入序列长度为 T , 隐藏单元数为 H , 则时间复杂度为: $O(T \times H^2)$; 在动态加载策略方面, 视口匹配算法的计算复杂度 $O(1)$, 预加载相邻层级瓦片的复杂度为 $O(4^{\Delta z})$, 其中 Δz 为层级差。从空间复杂度分析看,

瓦片金字塔存储: 层级 z 的瓦片数为 4^z , 总存储量为:

$$S_{pyramid} = \sum_{z=0}^{z_{max}} 4^z \times S_{tile} = \frac{4^{z_{max}+1} - 1}{3} \times S_{tile}$$

其中 S_{tile} 为单瓦片存储大小。

时空立方体存储: $S_{cube} = X \times Y \times T \times S_{value}$ 。

总而言之, 瓦片金字塔模型最大优势在应用系统中预设立多类别多套瓦片金字塔模型后, 在某个固定地理位置可快速缩放图片, 方便常态化特定区域的监控或态势评估, 除对计算存储量有要求外, 对高新技术投入或对 GPU 要求均一般, 是满足业务需求又经济实用性策略方法。

3. 面向特定区域监控需求下瓦片金字塔模型对时空立方体优化的技术实现路径

针对时空大数据多来源、多粒度、多模态、海量和时空关联复杂等特点, 首先进行数据时空序列特征提取, 对时空序列数据归一化处理, 进而考虑利用瓦片金字塔模型对时空立方体优化, 完成时空数据统一[3], 技术实现逻辑如图 2 所示。

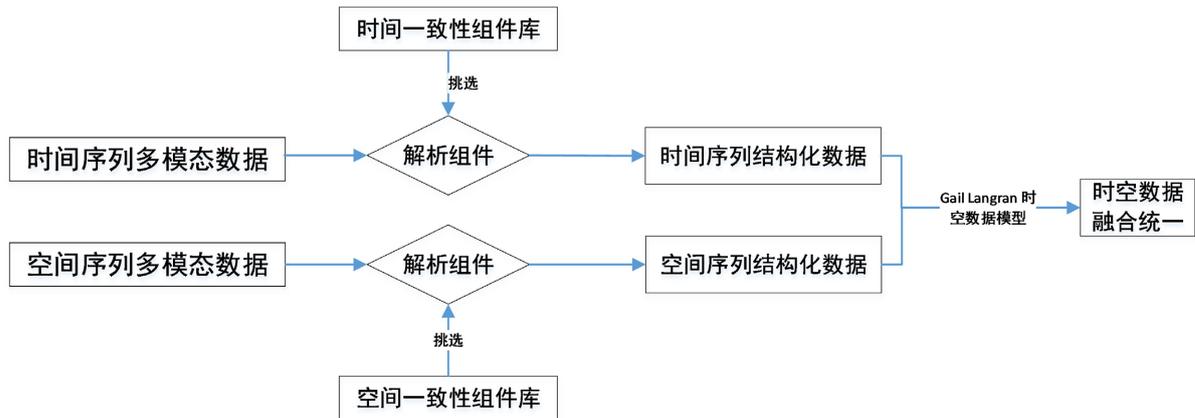


Figure 2. Implementation logic of spatiotemporal data unification technology

图 2. 时空数据统一技术实现逻辑

3.1. 数据时空序列特征提取

采用深度学习模型从时间与空间角度对抽取到的原始数据进行特征提取, 为面向业务需求和场景,

进一步挖掘环境、事件、装备和人员配置等量化数据本体属性奠定基础。其中，空间类特征反映的是目标对象的空间位置、地理信息及空间拓扑关系；时间类特征贯穿整个业务行动的全过程，可以分析不同环境、事件、装备和人员在同一时间的关联关系，也可以分析同一环境、事件、装备和人员在不同时间的表现[4]。鉴于全景态势评估与多种数据指标之间存在复杂的关联关系和因果关系等，采用门控循环单元网络(Gated Recurrent Unit, GRU)能够有效捕捉多模态数据中复杂的时间依赖关系，同时支持对时间间隔、波动率、自相关性等关键特征的定量分析。时间类特征与空间类特征融合，形成评估对象的时空特征[5]。

1) GRU 网络架构设计

输入层：

输入维度：\$(T, X, Y, F)\$，其中 \$T = 24\$ (时间步长，按小时划分)，\$X \times Y = 100 \times 100\$ (空间网格分辨率)，\$F = 4\$ (特征数：温度、湿度、人口密度、事件频率等多模态数据)。

数据展平：将空间网格展平为向量，输入维度调整为 \$(T, X \times Y \times F) = (2440000)\$。

隐藏层，采用门控循环单元网络(GRU)。

双层 GRU 结构：

第一层 GRU：128 单元，返回完整时间步序列；

第二层 GRU：128 单元，仅返回最后时间步输出；

双曲正切(tanh)：\$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}\$

门控机制：

更新门 \$z_t\$：控制历史信息的保留比例；

重置门 \$r_t\$：控制历史信息的遗忘比例；

计算公式：

$$z_t = \sigma(w_z \cdot [h_{t-1}, x_t]), r_t = \sigma(w_r \cdot [h_{t-1}, x_t])$$

$$\tilde{h}_t = \tanh(W \cdot [r_t \otimes h_{t-1}, x_t]), h_t = (1 - z_t) \otimes h_{t-1} + z_t \otimes \tilde{h}_t$$

其中 \$\sigma\$ 为 Sigmoid 函数，\$\otimes\$ 表示逐元素乘法。

输出层：

全连接层(Dense)：输出维度，激活函数为 ReLU，形成评估对象的时空特征：\$ReLU(x) = \max(0, x)\$

Dropout 层：支持对时间间隔、波动率、自相关性等关键特征的定量分析。

2) 训练参数与超参数设置

优化器采用 Adam。损失函数采用均方误差(MSE)：

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2$$

其中，\$L\$ 代表损失函数，模型预测的整体误差度量。\$N\$ 代表样本数量，当前批次(batch)中的样本总数。\$y_i\$ 代表真实值，第 \$i\$ 样本的 ground truth 值。\$\hat{y}_i\$ 代表预测值，模型对第 \$i\$ 样本的输出结果。

3.2. 时空序列数据归一化处理

1、时间序列数据归一化处理

时间序列数据特殊性在于发现异常模式或者异常值。在归一化方法选用上，采用成熟的全局归一化。但考虑到时间序列数据涉及时间范围广，数据的测量设备可能中途更换、测量条件不同，导致同一信号

的幅值差异巨大，因此在全局归一化的基础上，融入加窗最大最小归一化。窗口大小 $w=t$ 小时，公式：

$$y_t = \frac{x_t - \min_{\tau \in [t-w, t]}(x_\tau)}{\max_{\tau \in [t-w, t]}(x_\tau) - \min_{\tau \in [t-w, t]}(x_\tau)}$$

其中， y_t 代表归一化后的值，时间步 t 的标准化输出，范围 $[0, 1]$ 。 x_t 代表原始输入值，时间步 t 的原始观测值。 τ 代表时间索引，滑动窗口内的局部时间点。 w 代表窗口大小，滑动时间窗口的长度(单位：时间步)。 $[t-w, t]$ 代表时间窗口范围，从 $t-w$ 到 t 的闭区间。 $\min(\cdot)$ 代表窗口内最小值，局部最小值的鲁棒性提取。 $\max(\cdot)$ 代表窗口内最大值，局部最大值的动态捕获。

针对设备更换或测量条件变化的数据，采取全局归一化：

$$y = \frac{x - \mu}{\sigma}, \quad \mu \text{ 为均值, } \sigma \text{ 为标准差。}$$

2、空间序列数据归一化处理

空间序列数据归一化是将具有不同尺度和范围的空间数据转化为统一的尺度和范围，以便进行比较和分析。空间序列数据通常包括地理位置坐标、图像像素值、地物属性等。由于这些数据具有不同的度量单位和取值范围，直接进行分析和比较可能会导致结果不准确或失去实际意义[6]。因此，归一化核心用于解决空间数据间的尺度差异问题，提高数据的可比性和可解释性。空间序列数据归一化采用线性归一化算法，即将数据线性映射到一个固定的范围内，常见的范围为 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$ 。线性归一化算法公式如下：

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

其中， X' 为归一化后的值， X 为原始数据， X_{\min} 和 X_{\max} 分别为原始数据的最小值和最大值。

3、运用时空立方体，聚合时空数据

时空数据模型是描述时空数据的概念模型，用于组织和管理与时间、空间相关的数据。时空数据模型表达了随着时间变化，地理空间数据随之位移的时态变化。

时空立方体模型以抽取特定时间区间 Z 作为模型基线，以地理空间位置为横标 X ，牵引出目标区域下涉及多类态势数据属性 Y ，即由二维的几何位置和一维的时间组成三维立方体，时空对象描述为由具有关联属性和特征的一个或多个相联的时间序列构成的特征对象，形成相同时间序列集：

$$\text{object}(\{ \text{Chrono-Voxel}(i, [x, y, t]) \})$$

当锚定区域圈定给定时间区间，可从三维立方体中获取相应的目标场景下映射的相关事件，如图 3 示例。

4、瓦片金字塔模型嵌套式时空立方体优化原时空数据模型技术实现路径

采集的时空序列数据具有超海量性、泛多样性、广时空性及高演化性等特征，时空立方体模型在反映低层坐标数据较具实力，但其在高层结构数据标识存在短板。为强化时空数据模型的表达和计算能力，采用嵌套时空立方体模型改进时空立方体模型[7]。此外，可利用瓦片金字塔模型辅助嵌套时空立方体模型不断集成压缩数据，协助嵌套时空立方体聚合相关二维层面数据进入时空立方体模型。金字塔模型是一种静态多分辨率层次模型，它可直接提供不同分辨率的数据而无需进行实时重采样。金字塔模型能够减少完成场景绘制时间，分块的瓦片金字塔还能够进一步减少数据访问量，提高系统的输入输出执行效率，从而提升系统的整体性能。高度压缩的栅格数据瓦片金字塔模型利用模型算法库预先设置的配置参数，针对综合或泛化立方体模型内部同一时间或时间段的时空数据自动匹配计算瓦片金字塔的层级与底层瓦片行列跨度，并以瓦片二叉树结构对原始栅格数据不断进行切片处理，自动识别缺失数据，无数据区域会形成“黑色”标识，代表模型会继续向上发出数据抓取要求，不断填充“黑色”区域，直至其区域显示“透明”状态，如图 4 所示。

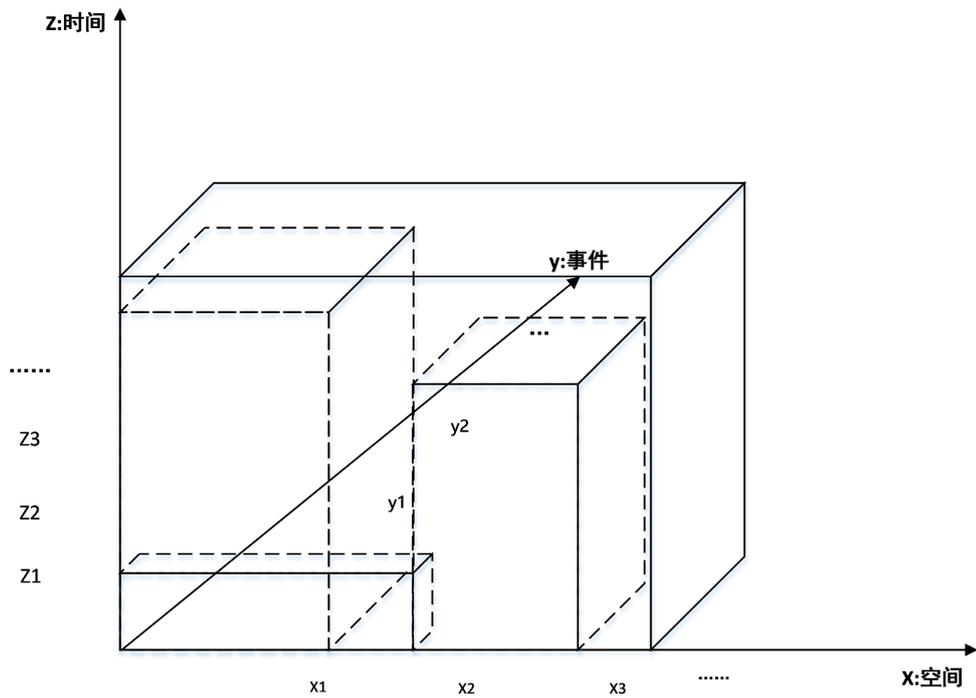


Figure 3. Spatiotemporal cube model in spatiotemporal data unification
图 3. 时空立方体模型在时空数据统一

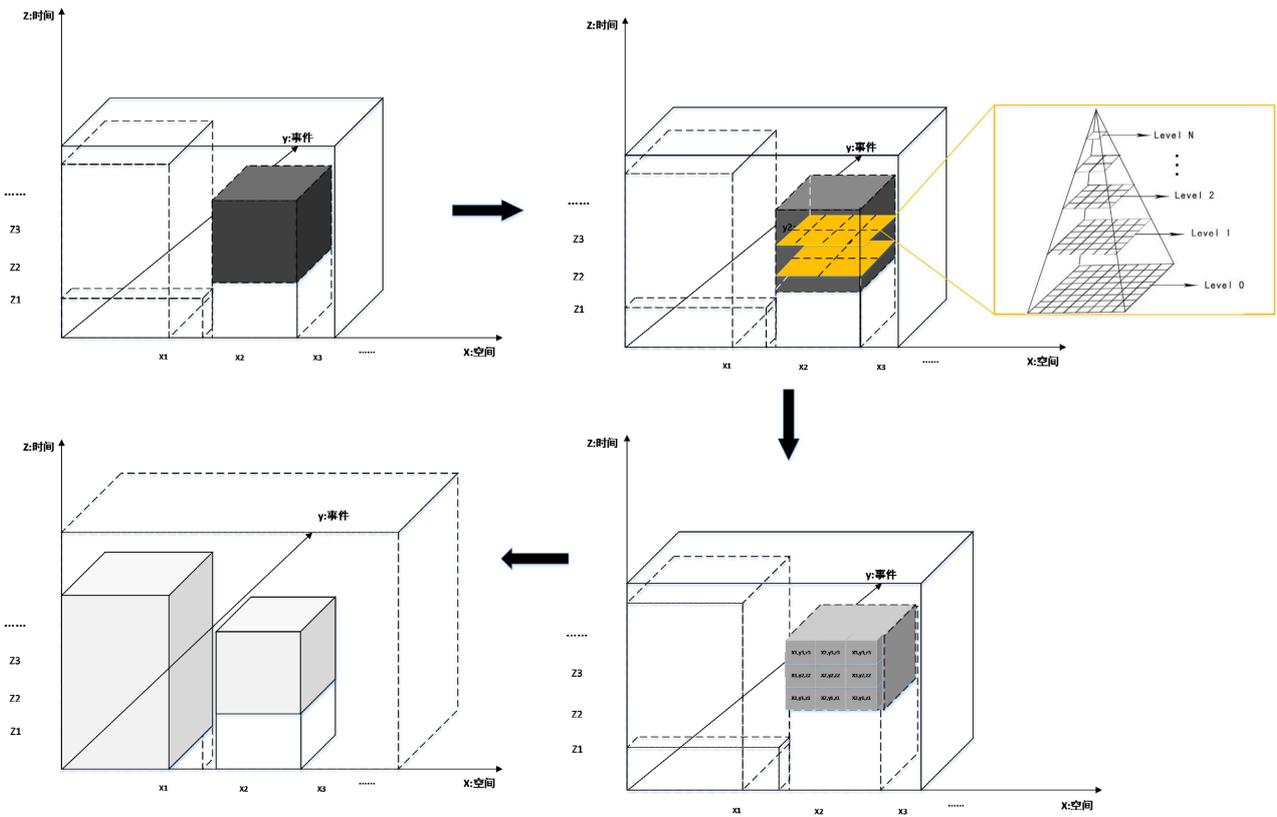


Figure 4. Logical strategy of nested spatiotemporal cube model in tile pyramid model
图 4. 瓦片金字塔模型嵌套时空立方体模型逻辑策略

(1) 时空立方体构建流程

1) 时间切片划分, 聚合时空数据

按固定时间间隔切割数据, 依据监控时间段切割为时间片总数 T ;

每个时间片对应二维网格 $X \times Y$, 网格分辨率由瓦片层级 z 决定。

2) 属性填充, 加速时空特征融合

将 GRU 输出的特征向量 $h_t \in R^r$ 映射至网格属性值:

$C(x, y, t) = \text{MLP}(h_t)_{x,y}$, MLP 结构: 输入维(假设 64 维)→隐藏层维(假设 32 维)→输出 1 维。

(2) 嵌套优化算法

步骤 1: 时空立方体切片匹配

根据空间网格分辨率选择瓦片层级 z , 公式: $z = \left\lceil \log_2 \left(\frac{C_{earth}}{\text{网络分辨率} \times 256} \right) \right\rceil$

步骤 2: 瓦片索引关联

建立网络 (x, y) 与瓦片 $(z, \text{tile}X, \text{tile}Y)$ 的映射关系:

$$\text{tile}X = \left\lceil \frac{X}{256} \right\rceil, \text{tile}Y = \left\lceil \frac{Y}{256} \right\rceil$$

步骤 3: 动态渲染与更新

用户请求视口瓦片时, 从时空立方体提取当前时间片数数据填充。若数据缺失, 返回低层级瓦片并触发异步生成任务。

4. 结语

瓦片金字塔模型凭借其二维地图不断切片特点, 通过分层分块的数据组织方式确实可优化时空立方体的存储与可视化效率, 降低海量时空数据的计算与传输负载, 但其在时间维度连续性处理、时空动态关联特征保留以及高维时空查询效率等方面仍存有不足。未来应探索利用机器学习技术自适应金字塔构建、时空编码优化、动态瓦片生成策略与多维度语义感知的瓦片划分等技术研究, 结合边缘计算与混合存储架构, 实现多精度时空数据的高效压缩、实时融合与精准分析, 推动时空立方体模型在需求场景中的深度应用与高度契合。

参考文献

- [1] 舒红. Gail Langran 时空数据模型的统一[J]. 武汉大学学报, 2007, 32(8): 723-726.
- [2] 朱光, 杨耀东. 静态多分辨率层次模型技术的研究与实践[J]. 测绘通报, 2014(2): 55-58.
- [3] 郑扣根, 谭石禹, 潘云鹤. 基于状态和变化的统一时空数据模型[J]. 软件学报, 2001(9): 1360-1365.
- [4] 李仕峰. 多源异构数据时空融合关键技术研究与应用[J]. 地理空间信息, 2021, 19(10): 19-21.
- [5] 霍亮, 杨耀东, 刘小勇, 乔文昊, 朱王璋. 瓦片金字塔模型技术的研究与实践[J]. 测绘科学, 2012, 37(6): 144-146.
- [6] 李阳, 岳英洁, 单长贺. 多源数据融合的山东省智慧海域平台系统设计与应用[J]. 海洋信息技术与应用, 2023, 38(3): 178-186.
- [7] 郭凤娟, 李超. 多平台时空统一研究[J]. 现代导航, 2014, 10(5): 353-356.