

标准格式天气雷达 PUP 产品可视化应用 系统研究与实现^{*}

邱玲^{1,2} 吕爽^{1,2} 杨雪^{1,2} 谢晓林^{1,2} 向筱铭^{1,2}

(1.四川省气象探测数据中心 成都 610072; 2.高原与盆地旱涝灾害四川省重点实验室 成都 610072)

摘要: 为充分发挥标准格式雷达 PUP 产品的业务应用能力,设计并研发了天气雷达标准格式 PUP 产品可视化应用系统。研究设计了系统的总体架构,标准格式雷达 PUP 产品收集、解码、加工、共享应用方案,针对标准格式雷达 PUP 产品数据量大的特点,提出一种改进的 RLE 压缩算法和一种优化的雷达图像绘制方法,有效提升产品图像展示效率,实现标准格式雷达 PUP 产品高效可视化应用。基于 B/S 架构,采用 SpringMVC 框架、HTML5、CSS、WebGIS 等成熟技术对系统功能进行了实现,面向全省用户提供了丰富的雷达 PUP 产品同 GIS 数据叠加展示和共享应用,同时提供地面观测数据、闪电数据同雷达 PUP 产品分层叠加应用,投入使用后得到气象业务用户的好评,有效提升对强对流天气预报预测和灾害性天气的预警能力。该系统在全国范围内较早实现了标准格式雷达 PUP 产品在气象部门的业务应用,对其他各省对标准格式雷达 PUP 产品可视化应用有较好参考作用,具有广泛的推广应用价值。

关键词: 天气雷达;标准格式;PUP 产品;雷达图像;改进的 RLE

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research and implementation of standard format weather radar PUP product visualization application system

Qiu Ling^{1,2} Lyu Shuang^{1,2} Yang Xue^{1,2} Xie Xiaolin^{1,2} Xiang Xiaoming^{1,2}

(1. Sichuan Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu 610072, China;

2. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China)

Abstract: To fully leverage the business application capabilities of standard format radar PUP products, the visualization application system of PUP products of standard format weather radar is designed and developed. The overall architecture of the system, as well as solutions for the collection, decoding, processing, and sharing of standard format radar PUP products, were researched and designed. Considering the large volume of data characteristic of standard format radar PUP products, an improved RLE compression algorithm and an optimized radar image rendering method were proposed to effectively enhance the efficiency of product image display and achieve efficient visualization applications of standard format radar PUP products. Based on the B/S architecture, the system's functionalities were implemented using mature technologies such as SpringMVC framework, HTML5, CSS, and WebGIS. It provides rich radar PUP product overlay display and sharing applications with GIS data for users across the province. Additionally, it offers layered overlay applications of ground observation data, lightning data, and radar PUP products. Upon deployment, it received positive feedback from meteorological business users, effectively enhancing the forecasting and warning capabilities for severe convective weather and hazardous weather events. The system has achieved early implementation of the standard format radar PUP product in the operational applications of meteorological departments nationwide, providing valuable reference for the visualization standard format radar PUP products in other provinces. It has broad application value for promotion.

Keywords: weather radar; standard format; PUP product; radar image; improved RLE

0 引言

新一代天气雷达因其高时空分辨率和连续不间断观测

等特性提供高质量的大气探测资料,是短临天气预报和灾害性天气预警的最重要工具之一^[1]。充分发挥好新一代天气雷达探测数据优势,能大幅度提升暴雨、冰雹等灾害性天

气的预报预测能力和防灾减灾能力^[2]。目前,四川省部署的 12 部新一代天气雷达都已投入业务运行,在强对流天气预报预测和防灾减灾工作中发挥着重要作用。

近年来在雷达 PUP 产品共享应用方面,国内外开展了相关的研究工作。Burgess 等^[3]对雷达产品在龙卷风探测方面的应用做了研究论述;李红玉等^[4]通过建立通信链路等方法实现雷达产品跨区域展示;宋军军等^[5]基于 DirectX 组件实现雷达产品的实时展示;张杰等^[6]采用 DELPHI XE2 编程语言实现雷达产品的收集、解析、展示;黄锦灿等^[7]采用开源软件 GeoServer 和 OpenLayers 等技术实现雷达产品综合显示和对比分析。以上雷达产品应用系统均基于雷达厂家自定义格式的 PUP 产品研发的且存在分辨率不足、数据延迟等问题。

以往不同雷达厂家对 PUP 产品文件的存储格式定义不同,给雷达资料的科学研究和业务应用造成诸多不便^[8-9]。针对雷达 PUP 产品格式缺乏统一性标准业务现状,2022 年中国气象局启动雷达 PUP 产品格式标准化工作,将产品格式统一为标准格式,与现行基于厂家自定义格式产品文件传输业务双轨运行。雷达 PUP 产品格式标准化后,导致基于厂家自定义格式开发的雷达产品应用系统因无法适应标准格式而不能使用。根据中国气象局要求,原格式雷达 PUP 产品会陆续停止,为有序地衔接新旧 PUP 产品以满足气象业务应用需求,因此有必要研发一套适用于标准格式雷达 PUP 产品的可视化应用系统。

针对四川省气象预报预测业务对标准格式雷达 PUP 产品迫切应用需求,基于省级统一气象数据环境,采用 B/S 架构建立新一代天气雷达标准格式 PUP 产品可视化应用系统,实现规范的、统一的标准格式 PUP 产品的实时收集、解码分析、加工处理、存储管理、共享应用。由于标准格式雷达 PUP 产品具有数据量大、结构复杂等特点,导致现有的雷达产品共享应用方法效率低下,因此,本文提出了一种改进的行程编码(run-length encoding, RLE)压缩算法和一种优化的雷达图像绘制方法,有效的提升了雷达产品共享展示效率,从而增强了对强对流天气临近预报和精细化预警能力。该系统在全国范围内较早实现标准格式雷达 PUP 产品在气象部门的业务应用,对其他各省对标准格式雷达 PUP 产品可视化应用有较好参考作用,具有广泛的推广应用价值。

1 系统设计

1.1 总体设计

从软件的性能、稳定性、可扩展性、可维护性等多方面综合考虑^[10],系统总体设计基于 B/S 架构,采用具有高内聚、低耦合特点的前后端分离和模块化开发模式^[11],主要分为数据采集与加工、数据存储与服务、产品 Web 展示 3 个部分,如图 1 所示。

产品 Web 展示作为系统前端以地图方式结合

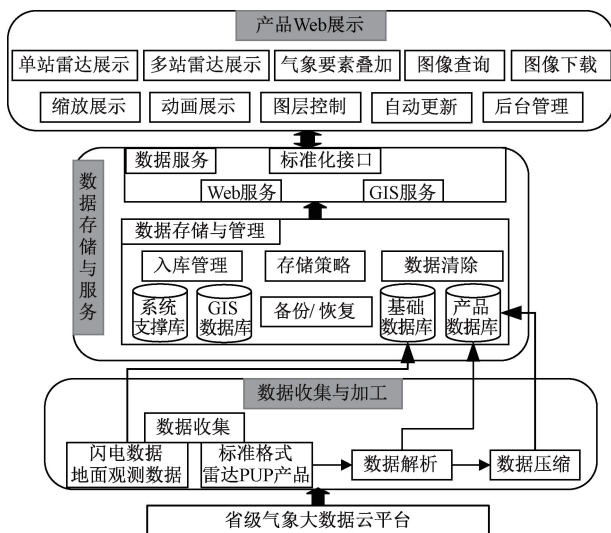


图 1 系统总体结构图

HTML5、jQuery、JS 等技术框架联合开发,提出一种优化的基于 OpenLayers 雷达图像绘制方法,实现标准格式雷达 PUP 产品同地理信息系统(geographic information system, GIS)数据叠加展示,同时提供雷达 PUP 产品同地面观测数据、闪电数据分层叠加显示。

系统后端分为数据收集与加工、数据存储与服务,采用 J2EE、SpringMVC、Spring 等成熟技术框架进行构建。系统前后端数据交互通过标准化封装数据接口。

1) 数据收集与加工子系统分为数据收集和加工。数据收集以省级气象大数据云平台为系统数据源,根据设定的数据收集策略,采用任务调度器 Quartz 定时获取标准格式雷达 PUP 产品、地面观测数据、闪电数据,其中地面观测数据、闪电数据直接存入基础数据库,雷达 PUP 产品进入数据加工环节。该环节首先将二进制文件解析成 JSON 文件,然后采用改进的 RLE 算法对 JSON 文件压缩处理,最终将压缩前后产品文件存入系统数据环境中。

2) 数据存储与服务子系统分为数据存储管理和数据服务。数据存储管理采用 Mysql 数据库,制定加工后 PUP 产品存储方案,采用文件+文件索引信息相结合的方式进行存储,文件存入文件系统中,索引信息存入数据库中,并制定相应的数据入库、数据清除等存储策略。数据服务将产品数据发布成气象行业标准化的数据接口。

1.2 架构设计

系统遵循面向服务的体系结构(service-oriented architecture, SOA)原则,采用经典 3 层架构划分为数据层、应用逻辑层、应用层 3 大部分,各层之间以松散耦合方式进行数据交互,并始终遵循气象信息化标注体系^[12]。系统的总体架构如图 2 所示。

1) 表现层由 Web 浏览器组成是系统的用户端,主要接收用户各种交互操作,包括产品查询和播放、地图缩放、地图图层控制等基本操作。将数据请求发送给业务逻辑层并将

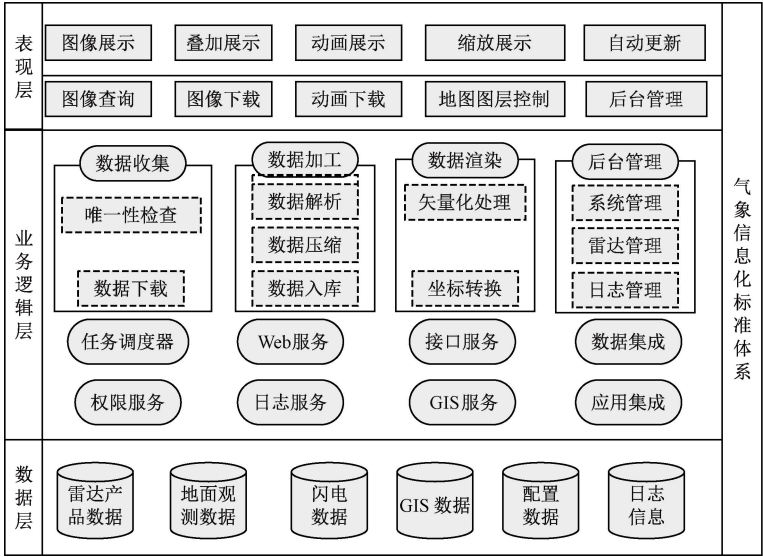


图 2 系统总体架构

返回的响应结果显示在 Web 浏览器上。

2)业务层逻辑层由业务层和逻辑层组成是系统的核心层次,负责接收表现层数据请求,实现系统业务逻辑和规则。业务层实现数据收集下载、解析、压缩、渲染、后台管理等系统功能。逻辑层提供任务调度器 Quartz、Web 服务、日志服务、GIS 服务等,同时提供标准化的接口服务将响应结果返回到表现层。

3)数据层是整个系统数据支撑,主要负责存储管理系统的所有数据,包括产品数据、配置数据、GIS 数据等,并响应业务逻辑层的数据请求。

2 核心功能及关键技术

2.1 天气雷达标准格式 PUP 产品解析

标准格式雷达 PUP 产品是二进制文件,需按照文件存储结构进行解析,加工成轻量级、易读的 JSON 文件。标准格式雷达 PUP 产品由公共数据块、产品头块、产品数据块组成如表 1 所示。公共数据块和产品头块提供雷达站点和产品描述性信息,产品数据块分为径向格式、栅格格式、特定格式,存储具体的雷达产品数据。

径向产品数据块包含径向头和 M 个径向数据块,其中径向数据块由径向数据头和 K 个径向数据构成。径向数据块采用极坐标以雷达站为中心以距离库为步径顺序存储 K 个径向数据,径向头和径向数据头提供极坐标等相关信息。栅格产品数据块包括栅格头和栅格数据块两部分,栅格数据块采用矩阵形式顺序存储行 $N \times N$ 数据,雷达站位于矩阵中心,栅格头提供矩阵边长和分辨率等信息。特定格式产品数据块主要存储数据量小且数据块不具规律性的产品,不同产品数据长度 I 不同。

大多数标准格式雷达 PUP 产品是基于径向和栅格存储的,具有数据量大,结构复杂紧凑、数据块嵌套紧密等特

点,须严格按照存储结构读取数据才能确保产品文件的解析正确。针对径向产品数据块,依次读取每一个径向的 K 个数据,直到 M 个径向数据读取完毕;针对栅格数据块,依次读取每一行的 N 个数据,直到 $N \times N$ 数据读取完毕;针对特定格式数据块,按照特定格式头、数据块格式依次读取数据,直到内容读取完毕。

2.2 一种改进的 RLE 压缩算法

雷达图像展示效率主要取决于产品数据传输效率和渲染效率。由于径向和栅格的雷达 PUP 产品标准化后数据量激增,导致图像数据传输效率和渲染效率大幅降低。因此,需对解析后 JSON 格式产品文件压缩处理,以减少数据传输量提高文件传输效率,同时用尽可能少的数据来表示图像能提高图像渲染效率^[13-14]。

RLE、霍夫曼编码、字串表编码 (lempel-ziv-welch, LZW) 是几种常用的无损压缩算法,其中霍夫曼编码和 LZW 适用于时效性不高的场景^[15-16]。针对实际气象业务对雷达产品图像高质量和高实时性需求,结合雷达产品数据大多是连续相同或者相近的特性,以适用于实时传输场景的无损压缩算法—RLE 为基础,提出一种改进的 RLE 压缩算法实现标准格式雷达 PUP 产品实时压缩,优化 RLE 算法的一些弊端,达到更高压缩效率。

1)改进的 RLE 压缩算法设计

(1)RLE 压缩算法

RLE 压缩算法基本原理是连续重复出现多次的字符,用重复次数和字符本身来表示^[17-18]。例如:fff111hhhh 则可用 3f314h 表示,该算法简单易实现且压缩无失真,但适用于字符连续重复出现 2 次以上的场景。例如:无重复的字符 hijk 用 1h1i1j1k 表示后数据量反而增大。实际业务中雷达产品文件中常出现连续相近而不相同的数据值,此时采用 RLE 压缩算法效果较差甚至可能造成数据膨胀现

表 1 天气雷达标准格式 PUP 产品的整体结构

区块		内容	字节
Common Block 公共数据块		GENERIC HEADER/通用头	32
		SITE CONFIGURATION/站点配置	128
		TASK CONFIGURATION/任务配置	256
		CUT # 1 CONFIGURATION/仰角配置 # 1	256
		⋮	⋮
Product Header Block 产品头块		CUT # N CONFIGURATION/仰角配置 # X	256
		PRODUCT HEADER/产品头信息	128
		PRODUCT-DEPENDENT PARAMETER 产品参数	64
Radial Format 径向格式		RADIAL HEADER/径向头	64
	Radial 1 第 1 个径向	MOMENT HEADER/径向数据头	32
		DATA # 1/第 1 个距离库径向数据	2
		⋮	⋮
		DATA # K /第 K 个距离库径向数据	2
		⋮	⋮
Product Data Block 产品数据块	⋮	⋮	⋮
	Radial M 第 M 个径向	⋮	⋮
		RASTER HEADER/栅格头	64
	Row 1 第 1 行	DATA COLUMN # 1/第 1 行第 1 列栅格数据	2
	栅格格式	⋮	⋮
	Raster Format	DATA COLUMN # N /第 1 行第 N 列栅格数据	2
	⋮	⋮	⋮
	Row N 第 N 行	⋮	⋮
	特定格式	SPECIAL HEADER/特定格式头	64
	Special Format	SPECIAL BLOCK/数据块	1

象,因此如何增加雷达产品文件中相同数据值是提高压缩效果的关键,基于该问题开展 RLE 算法的改进研究。

(2)改进 RLE 压缩算法

雷达图像是由叠加在 GIS 数据上的不同颜色色块构成,不同颜色代表不同数据值。根据气象行业规定的标准色标规范,即产品数据值和颜色对应关系,将产品数据值用对应颜色表示,构成雷达产品图像。不同的雷达产品色标规范各有差异,以雷达基本反射率产品色标为例,如图 3 所示,色标分为 16 等级,0 等级是图像背景色,表示小于-5 dBZ 数据;1~15 等级表示-5~65 dBZ 的数据范围,对应区间间隔为 5 dBZ 的 15 个数据区间[-5,0),[0,5)⋯≥65,其中 15 等级表示大于 65 dBZ 所有数据值。

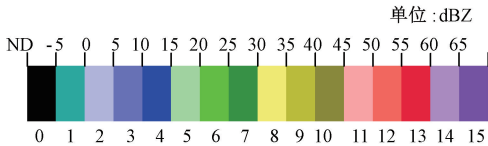


图 3 雷达基本反射率产品色标规范

根据雷达产品标准色标规范,同区间不同数据值对应

相同等级的色标,即相同的颜色,因此将区间内所有数据值转换成相同数据值后不会改变其对应色标等级,在此基础上设计改进的 RLE 压缩算法。

首先,过滤产品文件中公共数据块和产品头块中的冗余信息,保留图像展示关键信息,初步缩减产品数据量。然后,针对产品数据块中的数据进行算法处理。首先,判断数据是否在色标所对应数据范围[MIN,MAX]内,若在则无需处理;若不在,则判断是否小于 MIN。若是,则将数据赋值为 MIN-1,若不是,则将数据赋值为 MAX。然后将数据除以色标区间间隔 m 取整并加上整数 n。除以 m 取整目的是将同区间所有数据值转化成连续相同数据值,增加文件中相同数据值,提高压缩效果;再加上整数 n 使数据值恰好等于对应的色标等级,保证数据对应的颜色结果不变,从而确保图像显示质量不受影响。最后采用 RLE 编码思想进行数据压缩。改进的 RLE 压缩算法流程图如图 4 所示。

从解析后基本反射率产品中随机抽取一组数据(122 KB):

[-33.0, -33.0, 0.5, 0.5, 1.0, -2.0, -2.0, 2.0, 2.5, 2.5, 0.5, 4.0, 0.5, 0.5, 4.5, 4.5, 1.0, 5.0, -0.5,

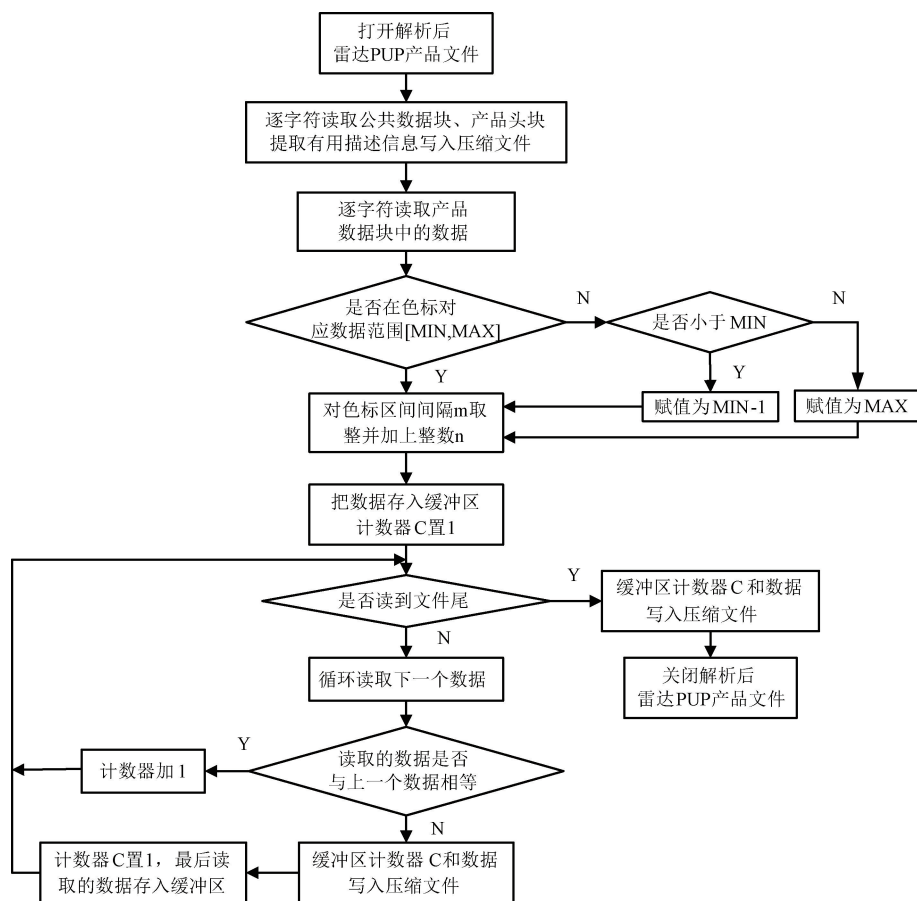


图 4 改进的 RLE 压缩算法流程图

2.0,2.0,2.0,3.5,3.5,3.5,6.0,6.0,6.0,]

采用 RLE 算法压缩后结果为(131 KB):[2,-33.0],[2,0.5],[1,1.0],[2,-2],[1,2.0],[2,2.5],[1,0.5],[1,4.0],[2,0.5],[2,4.5],[1,1.0],[1,5.0],[1,-0.5],[3,2.0],[3,3.5],[3,6.0]

采用改进的 RLE 算法,根据标准色标规范 $MIN = -5$, $MAX = 65$, $m = 5$, $n = 2$,数据经算法处理后:[0,0,0,2,2,2,1,1,2,2,2,2,2,2,2,2,2,2,1,2,2,2,2,2,3,3,3],对其压缩结果为(42 KB):[2,0],[3,2],[2,1],[11,2],[1,1],[6,2],[3,3]。

从以上例子可以看出,采用 RLE 算法压缩后数据量反而增大,采用改进的 RLE 算法压缩后数据量大幅减小,压缩效果显著。改进的 RLE 算法在不改变雷达图像质量的前提下,通过算法处理增加文件中的相同数据值提高数据压缩效果,提高文件传输效率;将数据值预处理为对应色标等级,数据渲染时无需色标映射处理,提高图像渲染效率。

2) 实验结果及分析

压缩率是度量压缩效果好坏的指标,压缩前后文件大小分别为 L_1, L_2 字节,则文件压缩数据量为 $L_1 - L_2$,压缩率为 $(L_1 - L_2) / L_1 \times 100\%$,压缩后文件越小,则压缩率

越高。

为验证改进的 RLE 算法的压缩效果,选取 2023 年 7 月 25 日,2023 年 8 月 29 日降水过程中成都雷达站的标准格式 PUP 产品进行测试。选取 3 种不同仰角的基本反射率、3 种不同仰角的基本速度、垂直液态水含量、组合反射率 230、组合反射率 460、回波顶高实际气象业务中重点关注的产品进行压缩。

从表 2 实验结果可以看出,RLE 算法的产品数据压缩率约为 23%~42%,改进的 RLE 算法的产品数据压缩率约为 82%~97%,改进的 RLE 算法比 RLE 算法的产品数据压缩率提高约 55%。改进的 RLE 算法压缩效果显著,能大幅降低产品数据量,有效的提高产品文件传输效率和图像渲染效率。

2.3 一种优化的雷达图像实时绘制方法

OpenLayers 在 WebGIS 客户端开发中实现地图展示和交互等功能,支持矢量数据和栅格数据的渲染^[19-20],本系统基于 Openlayers 实现雷达产品图像的实时绘制。针对基于极坐标存储的径向产品数据,需处理成经纬度定位矢量数据才能进行图像绘制,针对仅存储雷达站经纬度信息的栅格产品数据,需计算出所有栅格点的经纬度才能进行图像绘制。

表 2 改进前后 RLE 压缩算法测试结果

产品时间/yyyy/mm/dd hh:mm	产品类型	压缩前/ KB	RLE 算法		改进的 RLE 算法	
			压缩后/KB	压缩率/%	压缩后/KB	压缩率/%
2023/7/25 20:01	基本反射率 0.5°230 km	1 884	1 434	23.89	323	82.85
2023/7/25 20:13	基本反射率 2.4°230 km	1 879	1 417	24.59	315	83.23
2023/7/25 20:01	基本速度 0.5°115 km	948	656	30.80	91	90.40
2023/8/29 11:14	基本反射率 0.5°460 km	1 918	1 508	21.38	285	85.14
2024/8/29 11:37	基本反射率 1.5°460 km	1 941	1 396	28.08	232	88.05
2023/8/29 12:17	基本速度 6.0°230 km	980	624	36.33	67	93.16
2023/7/25 20:24	垂直液态水含量	15 158	8 913	41.20	347	97.71
2023/7/25 20:36	回波顶高	16 119	9 313	42.22	450	97.21
2023/8/29 11:25	组合反射率 230	18 594	11 998	35.47	1 520	91.83
2023/8/29 11:48	组合反射率 460	4 873	2 942	39.63	179	96.33

1) 雷达数据处理

(1) 径向数据矢量化处理

径向产品数据转化为矢量数据分为 2 步: 将产品数据抽象成点、线、面等开放式地理数据互操作规范 (open geodata interoperation specification, OpenGIS) 的几何对象模型; 基于极坐标定位几何对象模型转换为基于地理经纬度坐标定位。

OpenGIS 几何对象模型: OpenLayers 支持点、线、多边形、多多边形等几何图形即各类矢量要素的渲染^[21], 因此, 需将径向产品数据抽象成 OpenGIS 的几何对象模型。如图 5 所示, 径向 PUP 产品是由多条径向数据构成, 每条径向数据包含若干个颜色距离信息, 每个颜色距离构成扇形环。新一代天气雷达的波束宽度小于 1°, 因此, 每个扇形环可看作等腰梯形, 每个梯形可看作 OpenGIS 的几何对象模型中的多边形, 颜色相同相邻梯形可进行合并处理抽象为几何模型中的多多边形。

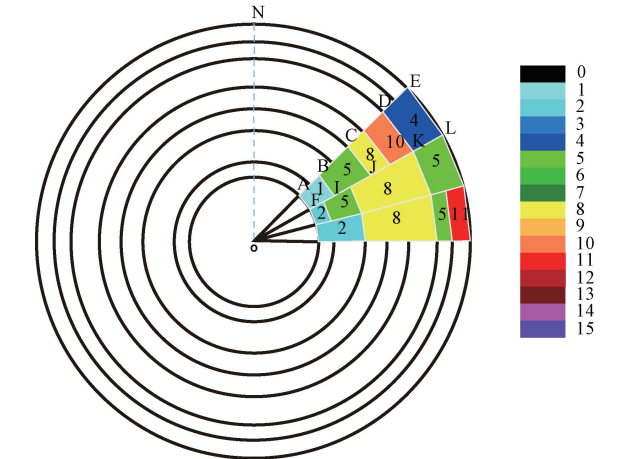


图 5 雷达 PUP 产品径向数据示意图

坐标转换: 径向产品数据块存储是以雷达站为中心的极坐标形式的圆锥面上的数据, 因此, 需将极坐标转化成地理经纬度坐标, 根据经纬度值确立数据在地图上的位

置, 其计算方法如下:

径向数据极坐标为 (α, θ, L) , α 是仰角, θ 是方位角, L 是探测斜距。假设径向数据地理位置为 (λ, φ, H) , λ 是经度, φ 是纬度, H 是海拔高度。已知雷达站位于 $(\lambda_r, \varphi_r, h_r)$ 处, 将地球看作半径为 R_e 球体, R_m 是等效地球半径, 数据海拔高度 H 计算公式为:

$$H = h_r + L \sin \alpha + \frac{L^2 \cos^2 \alpha}{2R_m}$$

(1)

地理经纬度计算公式为:

$$\varphi = \arcsin(\cos \beta \sin \varphi_r + \sin \beta \cos \varphi_r \cdot \sin \beta \cos \varphi_r \cdot \cos \theta)$$

(2)

$$\lambda = \arcsin \frac{\sin \theta \sin \beta}{\cos \varphi} + \lambda_r$$

(3)

其中, β 为探测距离对应的地心角, h_r 是雷达高度, 则 $k = L / (R_e + h_r)$, β 计算公式如下:

$$\beta = \frac{R_m}{R_e} \arctan \frac{k \sin \alpha}{1 - k \cos \varphi} + \lambda_r$$

(4)

已知雷达站和梯形 4 个点的极坐标信息以及地球半径 R_e 和等效半径 R_m , 根据式 (1)~(4) 计算出 4 个点的经纬度信息。

如图 5 所示一个径向所有数据仰角 α 、方位角 θ 相同, 探测距离 L 以距离库为步径递增, 因此可用 α, θ 和距离库表示径向上所有数据的位置, 经数据矢量化处理后径向上每个数据需 4 个经纬度信息表示, 导致产品文件数据量大

幅增大。

(2) 栅格数据坐标转换

栅格产品数据块以矩阵形式存储数据。如图 6 所示, 栅格产品数据每行由多个颜色距离对构成, 连续相同颜色距离对可进行合并处理。根据位于矩阵中心的雷达站经纬度, 矩阵横轴边长 $rowSideLength$ 、矩阵纵轴边长 $columnSideLength$ 计算出矩阵最大最小经纬度; 再根据最大最小经纬度, 矩阵边长, 计算出矩阵 1 个单位长度代表的经度 dx 和纬度 dy 。

$$dx = \frac{Lon_{max} - Lon_{min}}{rowSideLength} \tag{5}$$

$$dy = \frac{Lat_{max} - Lat_{min}}{columnSideLength} \tag{6}$$

根据横轴分辨率 $rowResolution$ 和纵轴分辨率

$columnResolution$, 矩阵列数 m ($1 \leq m \leq rowSideLength / rowResolution$), 矩阵行数 n ($1 \leq n \leq columnSideLength / columnResolution$), 计算出所有栅格点经纬度:

$$Lon = Lon_{min} + dx \times rowResolution \times m \tag{7}$$

$$Lat = Lat_{min} + dy \times columnResolution \times n \tag{8}$$

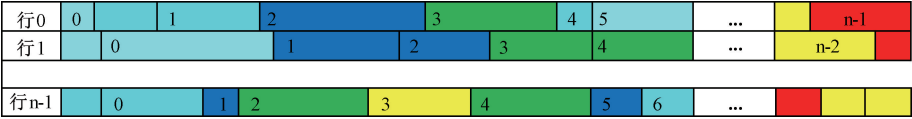


图 6 雷达 PUP 产品栅格数据示意图

栅格数据坐标转换是根据雷达站经纬度信息计算出所有栅格点经纬度坐标信息, 导致文件数据量大幅增大。

2) 优化雷达图像绘制流程

如图 7 所示, 现有的雷达图像绘制流程是对解析后径向产品进行数据矢量化、对解析后栅格产品进行坐标转换等预处理后存储至产品数据库中, 并作为 Web 地图服务对

外发布调用接口, 基于 OpenLayers 的客户端调用接口获取产品数据进行雷达图像绘制。该方法通过预处理方式提高数据渲染效率, 适用于原格式雷达 PUP 产品。由于雷达 PUP 产品标准化后数据量成倍增长, 由 2.3 节中的 1) 小节可知数据矢量化和坐标转换预处理环节会造成数据量进一步增大, 导致产品文件传输效率和渲染效率进一步降低。

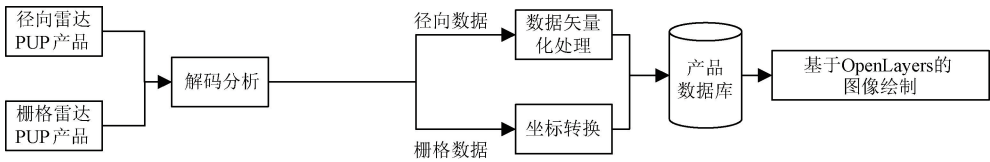


图 7 现有的雷达图像绘制流程

针对以上情况, 优化现有的雷达图像绘制流程使其更适用于标准格式雷达 PUP 产品图像绘制。如图 8 所示为优化后的雷达图像绘制流程, 首先在解码分析环节后增加数据实时压缩处理环节, 缩减产品文件的数据量, 其次将

数据矢量化处理、坐标转换预处理环节优化为实时处理环节, 避免压缩的产品文件经预处理环节后再次膨胀。该方法大幅减小客户端获取的产品数据量, 从而有效提高图像的绘制效率。

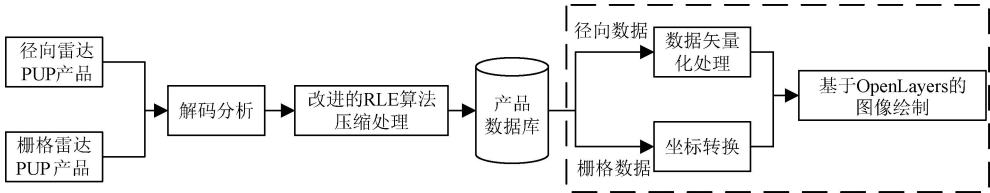


图 8 优化后雷达图像绘制流程

3) 实验结果及分析

系统运行环境如图 9 所示, 服务端由 2 台配置相同服务器组成, Web 应用服务器主要提供系统的页面展示, 主要对产品进行渲染展示和用户交互等。系统实验测试的服务器软硬件环境如表 3~4 所示。

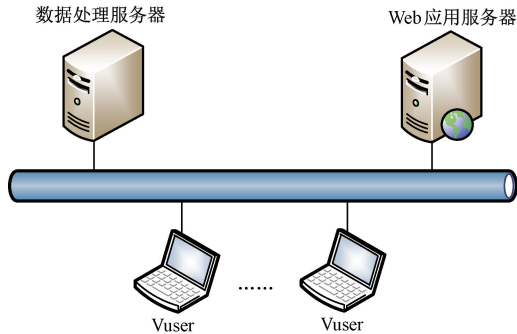


图 9 系统运行环境

表 3 服务端服务器

项目	设置
CPU	Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T7700@2.40 GHz 2.10 GHz
内存	32 GB
硬盘	2 TB
带宽	1 Gbps
操作系统	Microsoft windows Server 2012 R2 Enterprise
JDK	1.7.0_79
Tomcat	Apache Tomcat/7.0.57

表 4 客户端测试环境

项目	设置
CPU	Intel(R) Xeon(R) CPU E3-1225 v5@
	3.30 GHz 3.30 GHz
内存	16 GB
硬盘	1 TB
带宽	1 Gbps
操作系统	Microsoft windows 7 专业版
	Service Pack 1 64 位操作系统
负载压力工具	HP LoadRunner 11.0
浏览器	Google Chrome 98 及以上版本

优化雷达图像绘制流程目的是为了提高雷达图像显示效率,缩减产品展示的最终响应时长。为验证其效果,

选取 2023 年 7 月 25 日,2023 年 8 月 29 日降水过程中成都雷达站的 PUP 产品进行整体性能测试。

采用单点测试和并发测试方式获取优化前后产品展示响应时长,以判断优化后的雷达图像绘制流程的性能效果。采用单一用户迭代访问 100 次的方式进行单点测试,获取优化前产品展示最小响应时长,优化后产品展示最大响应时长作为衡量标准,如表 5 所示,优化前产品展示最小响应时长在 2.8 s 以上,最高可达 4 s 以上,优化后产品展示最大响应时长均在 1 s 以内,最小缩短时长达 2.5 s 以上。采用 100 个在线用户进行并发测试,获取优化前后产品展示平均响应时长作为衡量指标,如表 5 所示,优化前产品展示平均响应时长均在 3 s 以上,优化后产品展示平均响应时长缩减至 1 s 以内,平均缩减时长 2.5 s 以上。

表 5 优化的雷达图像绘制方法测试结果

产品时间/ yyyy/mm/dd hh:mm	产品类型	100 次单点测试			100 个用户并发测试		
		优化前产品 展示最小 响应时长/s	优化后产品 展示最大 响应时长/s	最小 缩短 时长/s	优化前产品 展示平均 响应时长/s	优化后产品 展示平均 响应时长/s	平均 缩减 时长/s
2023/7/25 20:01	基本反射率 0.5°230 km	3.43	0.713	2.717	3.73	0.681	3.049
2023/7/25 20:13	基本反射率 3.4°230 km	3.27	0.653	2.617	3.38	0.607	2.773
2023/7/25 20:01	基本速度 0.5°115 km	2.98	0.468	2.512	3.01	0.437	2.573
2023/8/29 11:14	基本反射率 0.5°460 km	3.32	0.602	2.718	3.52	0.531	2.989
2024/8/29 11:37	基本反射率 1.5°460 km	3.37	0.647	2.723	3.68	0.624	3.056
2023/8/29 12:17	基本速度 6.0°230 km	2.86	0.384	2.476	3.09	0.357	2.733
2023/7/25 20:24	垂直液态水含量	3.94	0.815	3.125	4.15	0.703	3.447
2023/7/25 20:36	回波顶高	3.87	0.609	3.261	4.02	0.552	3.468
2023/8/29 11:25	组合反射率 230	4.01	0.898	3.112	4.23	0.806	3.424
2023/8/29 11:48	组合反射率 460	3.23	0.503	2.727	3.45	0.425	3.025

从两种测试方法结果数据可知,现有的雷达图像绘制流程效率低下,不适用大数据量的标准格式雷达 PUP 产品实时展示,对现有雷达图像绘制流程进行优化后,无论最大响应时长还是平均响应时长均在 1 s 以内,极大的提高了雷达产品图像展示效率,满足气象业务对标准格式雷达 PUP 产品图像高实时性应用需求。

3 业务应用

新一代天气雷达标准格式 PUP 产品可视化应用系统已于 2023 年在四川省、市、县三级气象部门投入业务运行,经过一年多的业务运行和不断升级完善,功能齐全,稳定

可靠,系统界面如图 10 所示。

系统支持基本反射率、组合反射率等 36 种标准格式雷达 PUP 产品图像实时展示,支持单站和多站展示模式,同时支持对历史数据查询和显示;支持雷达站信息、产品信息、色标图例等基础信息显示。支持雷达图像缩放、平移、自动更新、手动更新、加速/减速播放、动画播放和制作,可直观展示回波演变的过程;支持一键跳转下一时刻(或上一时刻);支持市、县、乡镇三级地理信息和卫星地图切换;同时提供地面观测数据、闪电数据同雷达 PUP 产品的叠加展示,支持设置雷达图像透明度。

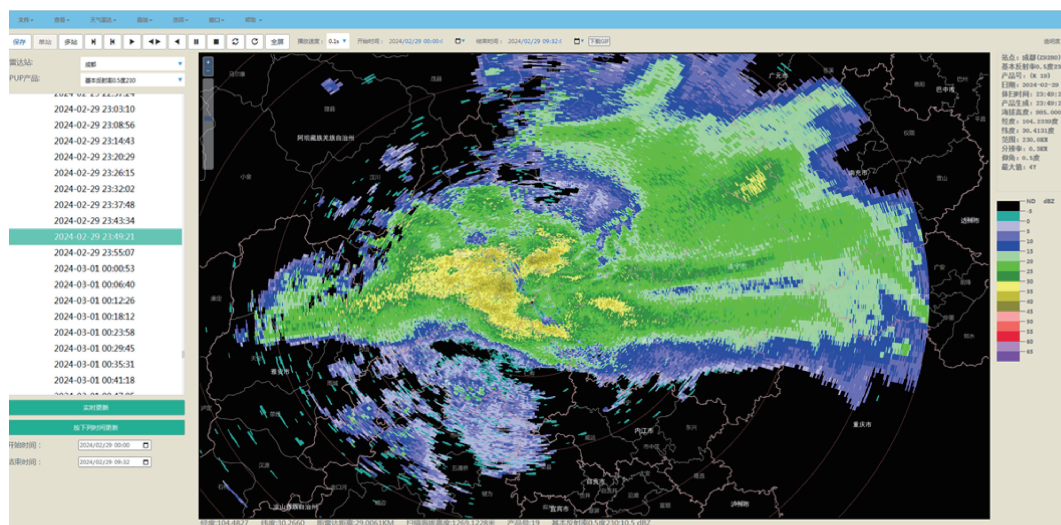


图 10 系统界面

4 结 论

新一代天气雷达标准格式 PUP 产品可视化应用系统以四川省气象大数据云平台为数据源,完成标准格式雷达 PUP 产品的实时收集、解码分析、加工处理、共享展示,在全国范围内较早实现天气雷达标准格式 PUP 产品在省、市、县、三级气象部门的业务应用。由于标准格式雷达 PUP 产品具有数据量大、结构复杂等特点,现有的雷达产品展示方案的响应时长在 3 s 左右,最高可达 4 s 以上,无法满足气象业务对雷达图像高时效性需求。针对该情况,对现有方案进行了优化,首先在产品解码分析后新增数据压缩处理,设计一种改进的 RLE 压缩算法对数据进行实时压缩,同时将数据矢量化处理、坐标转换预处理环节优化为实时处理环节,大幅减小标准格式产品数据量,根据大量实验结果表明,最终产品展示响应时长缩减至毫秒级,显著提升雷达产品共享应用效率,增强了对强对流天气临近预报和精细化预警能力,投入使用后得到全省气象业务用户的好评。目前全国天气雷达 PUP 产品格式已统一为标准格式,各省对雷达 PUP 产品的共享应用业务需求基本相同,即本系统适用于全国各省的气象预报预警业务,因此,本系统可在全国各省、市、县气象部门进行推广应用。

参考文献

- [1] 甄延忠,江龙,康道俊,等.基于自研 GIS 的标准格式雷达基数据应用和预警系统的设计与实现[J].计算机应用与软件,2020,37(10):14-19.
- [2] 牛淑贞,潘新民,杨洪平,等.《新一代天气雷达灾害性天气警报和临近预报系统》应用[J].气象,2009,35(5):105-111.
- [3] BURGESS D W B, DONALDSON R J,

DESROCHERS P R. Tornado detection and warning by radar[J]. American Geophysical Union (AGU), 2013. DOI:10.1029/GM079p0203.

- [4] 李红玉,李晓勇,刘鹏.跨省区新一代多普勒天气雷达 PUP 产品调用与拼图实现[J]. 西华大学学报:自然科学版,2009,28(5):78-82.
- [5] 宋建军,薛兰.基于 DirectX 的气象雷达实时显示技术研究[J]. 现代雷达,2010,32(3):62-65.
- [6] 张杰,张思豆,代华.多普勒天气雷达 PUP 产品强天气监测预警系统设计[J]. 暴雨灾害,2018,37(5):486-492.
- [7] 黄锦灿,梁建辉,梁挺拔,等.新一代天气雷达产品综合显示系统的设计与实现[J]. 广东气象,2019,41(3):67-71.
- [8] 甄延忠,江龙,段燕楠,等.基于昆明市精细化 GIS 的天气雷达标准格式基数据应用[J]. 气象科技,2020,48(1):59-67.
- [9] 甄延忠,陈关清,唐学军,等. CINRAD/CC 天气雷达标准格式基数据与现行业务格式基数据的对比分析[J]. 中低纬山地气象,2019,43(5):69-74.
- [10] 杨雪,徐晓莉,宋智,等.气象要素空间插值图像处理系统的研究与实现[J]. 计算机技术与发展,2019,29(8):179-184.
- [11] 王伟,李俊徽,张锋,等.基于 WebGIS 的水库气象服务平台的实现[J]. 计算机与网络,2020,46(3):61-64.
- [12] 杨雪,徐晓莉,向筱铭,等.气象综合观测业务规范查阅平台的研究与实现[J]. 电子测量技术,2018,41(8):84-90.

- [13] 刘晶,刘刚,张九龙. 基于 RLE 编码定位的数字水印算法[J]. 计算机工程与应用,2008,44(24):98-99.
- [14] 蓝波,林小竹,籍俊伟. 一种改进的 RLE 算法在图像数据编码中的应用[J]. 微电子学与计算机,2004,21(5):101-103.
- [15] 周桂宇,马宪民,李卫斌. 改进的混合压缩算法在 GPS 数据压缩中的应用[J]. 计算机应用与软件,2013,30(12):167-169.
- [16] KARTHICK K, KUMAR R V. An energy-saving routing algorithm for wireless body sensor network using data compression technique [J]. International Journal of Computer Applications, 2015, 114(15):26-29.
- [17] NISHITSUJI T, SHIMOBABA T, KAKUE T, et al. Fast calculation of computer-generated hologram using run-length encoding based recurrence relation [J]. Optics Express, 2015, 23(8):9852-9857.
- [18] 史礼婷,张骞,程科文,等. 卫星遥测数据实时压缩算法设计与实现[J]. 遥测遥控,2023,44(5):22-27.
- [19] 杨鹏,邹时林. 基于 OpenLayers 的 WebGIS 客户端的研发[J]. 测绘与空间地理信息,2012,35(3):131-133.
- [20] 李新庆,王凡. OpenLayers 在宁夏县级气象综合服务平台的应用与研究[J]. 江西科学,2015,33(3):415-418.
- [21] 叶凯,蒲智,林思成. 基于 OpenLayers 的流域基础信息数据库[J]. 计算机技术与发展,2018,28(6):102-105.

作者简介

邱玲, 硕士, 工程师, 主要研究方向为气象信息系统研发等。

E-mail: onlyqqll@qq.com

吕爽(通信作者), 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为气象信息系统研发等。

E-mail: 765016978@qq.com

杨雪, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为气象信息系统研发等。

E-mail: 525890850@qq.com

谢晓林, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新一代天气雷达数据处理与算法研究等。

E-mail: 502527693@qq.com

向筱铭, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为气象信息系统研发等。

E-mail: 40094899@qq.com