

# 新一代天气雷达三维数字组网 软件系统设计与实现

王红艳<sup>1,2</sup> 刘黎平<sup>1</sup> 肖艳娇<sup>3</sup> 庄 薇<sup>1</sup> 王改利<sup>1</sup>

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081;  
2. 南京信息工程大学; 3. 武汉暴雨研究所)

**提 要:** 天气雷达三维格点组网基数据具有多方面的应用价值, 而且, 新一代天气雷达观测资料目前基本上都可以实时传输到区域中心, 为充分发挥雷达网的作用, 基于近期相关具有实用性的研究成果, 在国内首次研制了新一代天气雷达三维数字组网软件系统。系统以后台数据处理为核心, 辅以简便的控制界面, 多线程编程技术提高了系统数据处理的效率, 模块化的多线程管理便于扩展新算法模块, 混合语言编程技术缩短了科研成果业务化应用的周期。系统可在微机上运行, 进行高时空分辨率的区域雷达三维数字组网以及二次产品生成。

**关键词:** 新一代天气雷达 三维数字组网 软件系统

## Design and Implementation of the CINRAD 3D Digital Mosaic System

Wang Hongyan<sup>1,2</sup> Liu Liping<sup>1</sup> Xiao Yanjiao<sup>3</sup> Zhuang Wei<sup>1</sup> Wang Gaili<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;  
2. Nanjing University of Information Science & Technology; 3. Wuhan Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration)

**Abstract:** The weather radar 3D mosaic data are useful in many ways. And today, the CINRAD observational data are able to mainly real time transfer to the regional centre. To make full use of the radar observation network, the CINRAD 3D digital mosaic system is developed based on recent related research results. The system focuses on data processing in the background, with simple and convenient controlling interface. Multi-threaded programming techniques improve the efficiency of data processing, modularized management of multi-threads is easy to expand new algorithm modules, and mixed-language programming technology shortened the period of applying results of scientific research in operation. The system works efficiently on PC, generating regional

three-dimensional mosaic reflectivity and some derived products with high spatial and time resolution.

**Key Words:** CINRAD 3D digital mosaic software system

## 引 言

多普勒天气雷达是目前探测中小尺度对流天气系统的重要观测工具。美国自 20 世纪 80 年代开始起建立多普勒雷达观测网,为监测对流天气发挥了重要作用,大大提高了灾害天气预警预报的准确率。我国也从 1990 年代末开始建设新一代天气雷达观测网,为我国气象业务发挥了重要作用。利用雷达联网观测的优势,进行多部雷达观测数据的组网,得到具有高分辨率、覆盖范围广的三维数字产品,在灾害天气预警和临近预报研究与应用方面有重大意义<sup>[1-2]</sup>,组网结果不仅能有效地反映多种尺度天气系统的移动和演变<sup>[3]</sup>,还可以为对流尺度数值天气模式中雷达数据同化等提供数据基础。但是,目前国内的雷达都是单站观测,产品也是基于单站的,预警范围和临近预报外推时间都受到比较大的限制。虽已有全网雷达的业务产品拼图<sup>[4]</sup>,但它是基于图像的,不能用于二次开发,也不能体现天气系统的三维结构。美国国家强风暴实验室已经开发了全国范围内高分辨率的雷达数据三维组网系统<sup>[5-6]</sup>,并于 2006 年投入业务应用,为强天气数值模式数据同化和降水估算等发挥了重要的作用,美国的人工影响天气工程中也纳入了雷达三维组网结果,为人工影响天气提供支持。中国气象科学研究院近年来在雷达资料质量控制和雷达三维组网等多方面都开展了深入研究,取得了有应用价值的科研成果<sup>[7-8]</sup>。因此,笔者以这些科研成果为支撑,在国内首次研制了新一代天气雷达三维数字组网软件系统,促使了相关科研成果投入实际应用,为天

气分析提供分辨率高、覆盖范围广,且能体现天气系统三维结构的雷达回波资料以及部分二次产品,为临近预报等研究和开发工作提供数据支持。

## 1 软件系统设计

### 1.1 开发方法

采用的主要编程语言是 C++,其中部分算法是由 FORTRAN 语言编写的,且研制过程中在不断地优化,为了既能快速实现科研成果的业务化,又方便算法升级,在试用版本的研制阶段,使用了 C++与 FORTRAN 混合语言编程技术,在 Visual C++ 6.0 和 Compaq Visual Fortran 6.5 集成平台上开发。

组网系统需要处理大量的雷达观测资料,每个站每 6 分钟一个体扫资料,每个体扫资料大约 10MB,要在 6~10 分钟内完成对大约 20 部雷达体扫数据的预处理、三维格点化组网以及二次产品生成,不仅数据处理量大,且实时性强,需要充分利用计算机的多 CPU 资源,提高数据处理速度,为此,采用了多线程编程技术,不同的线程分别完成不同的功能或算法处理。编程时已为所有数据处理线程的创建、线程间通讯及同步控制等制定了统一的模版及封装的类,并提前预留了一些空闲任务线程,无论是利用预留的空闲任务,还是添加新线程,都可以很方便地扩展新的算法模块。

### 1.2 软件结构

图 1 是软件系统结构,分系统监控和数据处理两大部分。其中系统监控部分负责系统控制和系统状态监视,系统控制通过简单

的主界面窗口和系统托盘实现,系统状态监视负责软件系统运行期间的状态、错误报告,并完成日志记录和日志管理;数据处理部分

包括后台运行的一些有序的数据处理模块及数据存储模块。

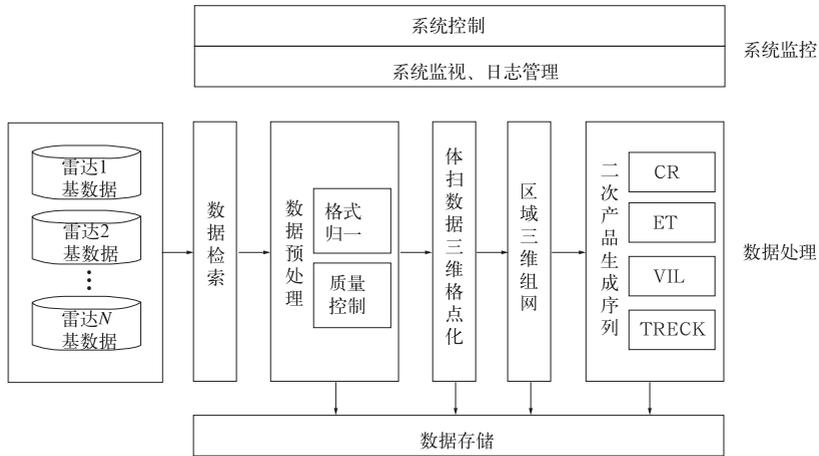


图 1 系统结构

系统的主要任务是对大量的雷达数据进行检索,经过一系列算法处理,生成三维格点基数据及二次产品,不需要频繁的用户操作,因此,简化了交互界面,重点考虑的是数据处理能力。一般情况下,用户界面隐藏,数据处理在后台运行,自动完成每个时次的数据处理,输出处理三维组网结果及二次产品。操作系统任务栏上的组网软件系统图标有两方面的作用:一是通过其状态指示可组网系统的状态,动画状态表示系统在运转中,静止状态表明系统没有运转;二是通过其上的右键弹出菜单,可以实现最常用的操作。需要进行参数设置等更多操作的时候,可以显示隐藏的用户界面,在用户界面上操作。

### 2 主要的功能模块

新一代天气雷达三维数字组网系统主要包括下列功能模块:系统控制模块、雷达基数据检索模块、基数据预处理模块、体扫数据三维格点化模块、多雷达数据组网模块、多种二次产品生

成模块以及系统状态监视模块(图 1),这些功能模块分别由不同的线程来实现。

#### 2.1 系统控制模块

系统控制模块是程序主线程,体现为用户界面和托盘图标组成的控制平台。通过控制平台,可控制系统运转、停止和退出,设置组网区域内的雷达站信息、结果存储路径,选择数据处理过程和需要生成的产品等(图 2)。

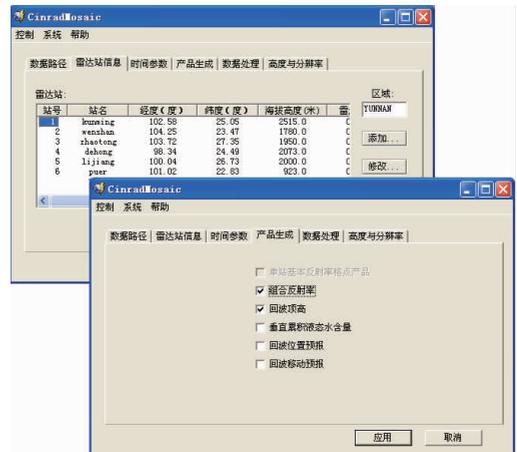


图 2 控制平台示例

## 2.2 雷达资料检索模块

系统对雷达资料的处理有实时和事后分析两种模式。在实时运行模式下,系统监视指定路径下的实时观测数据,检查数据的观测时间,判断其是否参与当前时次的组网,将需要处理的数据文件传递给下一个模块处理;在事后分析模式下,系统从指定路径下预先装载一定数量的各站观测资料,依据预先设置的组网时间间隔,对资料进行时次排序和分组,然后逐时次处理这些数据。

## 2.3 资料预处理模块

资料预处理包括两方面:一是数据格式统一,二是质量控制。

新一代天气雷达网的雷达型号有 SA、SB、CB、CD、SC、CC 和 CCJ,共有 5 种不同的数据格式,为方便算法处理,首先将这些数据转换成系统内部预定的统一格式。采用统一格式后,任何型号雷达的数据都可以采用同样的算法模块进行处理。

雷达观测资料的数据质量非常重要,最常见的质量问题是固定地物或超折射引起的地物杂波,此外还有海浪回波、鸟杂波、系统噪声以及电磁干扰等。这些非气象回波有的独立于气象回波存在,有的混杂在气象回波中。为保证数字组网的质量,在进一步处理之前,所有的雷达资料都首先要通过特定算法<sup>[7]</sup>进行质量控制,去掉地物杂波、噪声和干扰回波等。同时,还可以按照原始数据格式输出部分型号雷达质量控制后的观测资料。

## 2.4 体扫资料三维格点化模块

组网前,先要把以距离、方位、仰角为坐标的单站体扫数据经过插值处理,转换成以经度、纬度和海拔高度为坐标的三维格点数

据。这样插值后,每个雷达站的资料都转换到同样高度层次的网格点上,便于组网。

三维格点化处理有多种,选择不同的插值方案,得到的格点化资料的效果有较大差异。根据此前分析和探讨的结果<sup>[8]</sup>,这里采用了 NVI 方法(径向、方位上的最邻近法结合垂直线性内插法)。

## 2.5 多雷达站格点数据组网模块

区域内每个站的雷达资料完成三维格点化后,启动组网模块,将各单站的格点数据拼到一个大范围的网格区域中。组网范围内某些区域只在单部雷达的覆盖范围内,也有一些区域可能在多部雷达的共同覆盖范围内。对于单部雷达覆盖区域,直接取该雷达在对应格点上的值;对于多部雷达的共同覆盖区,则要综合考虑各雷达资料对该处的贡献。根据此前分析和探讨的结果<sup>[8]</sup>,系统采用了指数权重插值方法进行多站组网,最终生成三维组网反射率因子。

## 2.6 二次产品系列模块

为方便强天气分析,系统还提供了一些二次产品,包括组合反射率、回波顶高、垂直累积液态水含量、回波 TRECK 跟踪及预报。它们由不同的模块,以组网模块输出的三维组网反射率因子为基础,经过相应的算法处理生成。

## 2.7 系统状态监视模块

在系统启动和运行期间,为方便用户了解系统运行情况、进行系统维护提供线索,数据处理过程中的一些重要的状态信息被记录到状态日志文件中,一些错误信息被记录到错误日志文件中。系统状态监视模块负责检查这些状态信息和错误信息,以及信息记录,

并定期删除过期的日志文件。

### 3 系统性能

软件系统在 Windows 2000/XP 下运行, 计算机性能: 双核处理器, 主频 2.13GHz, 内存 2G; 三维组网系统在该机器上模拟业务运行, 区域内有 12 部雷达参与组网, 平均 5 分钟完成一次组网处理及二次产品生成, CPU 占有率平均不超过 50%, 最大内存占用量 102MB。在北京市气象局业务试运行, 同步观测的 4 部雷达参与组网, 3 部 SA 雷达, 1 部 CB 雷达, 根据体扫周期, 组网频率为每 6 分钟一次, 1 分钟左右可完成组网的全部处理, 同时输出质量控制后的基数据给一些临近预报系统, 跟踪系统 1 个月的运行情况, 没有发生退出、中断等有关稳定性的问题。

模拟测试和业务试运行结果表明: 对于包含 20 部雷达以内的区域组网, 只需 1 台性能合适(内存至少 2GB, 主频 1.8GHz 以上的双 CPU。)的微机, 就可以实现周期为 5~6 分钟(新一代天气雷达的体扫周期为 5~6 分钟)的三维数字组网。

### 4 三维组网结果应用实例

目前的业务应用中, 针对台风及更大尺度的天气系统, 还没有更精细的产品用于体现其结构。组网系统提供的主要结果是高分辨率的反射率因子三维数据, 通过这个数据, 不仅可以得到多个高度层上水平分辨率 1km 左右的雷达回波、组合反射率等, 还可以体现系统的垂直分布、三维结构。2007 年 8 月 18 日圣帕台风在福建登陆, 组网系统对福州、厦门、建阳、龙岩、梅州、汕头和赣州 7 部雷达进行组网, 图 3(见彩页)是利用雷达三维组网显示软件<sup>[9]</sup>显示的世界时间 10 时 40 分的三维组网结果, 右边是 5km 高度上

的反射率因子, 左上的小窗口中是红色直线位置的垂直剖面, 左下的小窗口中是红色矩形位置的三维切面, 从三个不同的切面来体现小区域内回波的分布情况。这表明, 通过雷达三维数字组网结果可以了解天气系统的三维结构。

### 5 软件系统推广应用

组网系统作为“973”我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和方法研究”的重要成果推广项目, 自 2007 年 6 月开始在华南、华东、华中和江淮 4 个“973”外场试验基地准业务运行, 其三维组网结果及二次产品输出到统一的数据存储服务器, 形成我国长江流域以南描述强对流天气的 5 种不同的产品, 作为中尺度灾害天气分析与预报平台(RAFS)的重要产品数据源。2008 年参与北京市气象局奥运会气象保障服务, 其输出的组网结果作为短时临近天气分析平台(VIPS)的重要产品, 供预报员使用, 在奥运赛场气象服务中发挥了重要的作用。此外, 浙江省气象局、河北省气象局、福建省气象局等也在试用该系统, 为科研或业务工作提供数据支持。

### 6 结束语

(1) 新一代天气雷达三维数字组网系统应用了中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室近年来在天气雷达应用方面的最新科研成果, 在国内首次开发并业务试用, 已在试用单位的业务工作中发挥了重要的作用, 是科研成果及时向业务转化的一次成功尝试。

(2) 系统对计算机的要求不高, 在任何能获取雷达资料的区域中心, 只需有一台性能合适的微机, 都可以运行本系统, 实现与雷达观测周期同步的区域三维数字组网。

(3) 系统很方便添加新的数据处理模块或者二次产品模块,具有很好的扩展性。

(4) 模拟试运行和业务试运行期间,系统运行稳定,基本满足了业务化的稳定性要求。

(5) 试用版本为加快研制速度和方便算法升级,采用了混合语言编程的方法。目前,算法的完善基本完成,不会再有很大的改动,因此已经开始着手将 FORTRAN 语言编写的算法转化成 C/C++ 语言,准备统一组网系统的编程语言,以便维护。

(6) 该系统定位于区域组网,区域内最合适的雷达数量在 20 部以内。对于全国范围的三维组网,一方面微机的内存等性能有限,另一方面,系统对数据进行处理也需要相当长的时间,实时性会差一些。因此,对于全国组网,计划对系统运行效率进行尽可能的优化,并以高性能计算机为平台来实现。

## 参考文献

- [1] 阮征,邵爱梅. 雷达站网资料在长江流域暴雨试验中的应用[J]. 气象科技, 2004, 32(4):237-242.
- [2] 梁海河,阮征,葛润生. 华南暴雨试验天气雷达数据处理及暴雨中尺度结构个例分析[J]. 应用气象学报, 2005, 15(3):281-290.
- [3] 王建国,高玉春,朱君鉴,等. 山东省新一代天气雷达网业务应用[J]. 气象, 2006, 32(10):102-106.
- [4] 刘雪涛,沃伟峰,赵思亮. FOSE 系统中的新一代天气雷达拼图及单站产品制作[J]. 气象科学, 2007, 27(4):441-444.
- [5] Zhang J, Howard K, and Gourley J J. Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes[J]. J Atmos Oceanic Tech, 2005, 22:30-42.
- [6] Carrie L, Zhang J, Howard K. Four-Dimensional Dynamic Radar Mosaic[C]. The 11th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer Meteor Soc, CD-ROM, 2004.
- [7] 刘黎平,吴林林,杨引明. 基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析[J]. 气象学报, 2007, 65(2):251-260.
- [8] 肖艳娇,刘黎平. 新一代天气雷达组网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报, 2006, 64(5):647-656.
- [9] 张志强,刘黎平,谢明元,等. CINRAD 三维拼图显示系统[J]. 气象, 2007, 33(9):19-24.

# 王红艳等：新一代天气雷达三维数字组网软件系统设计与实现

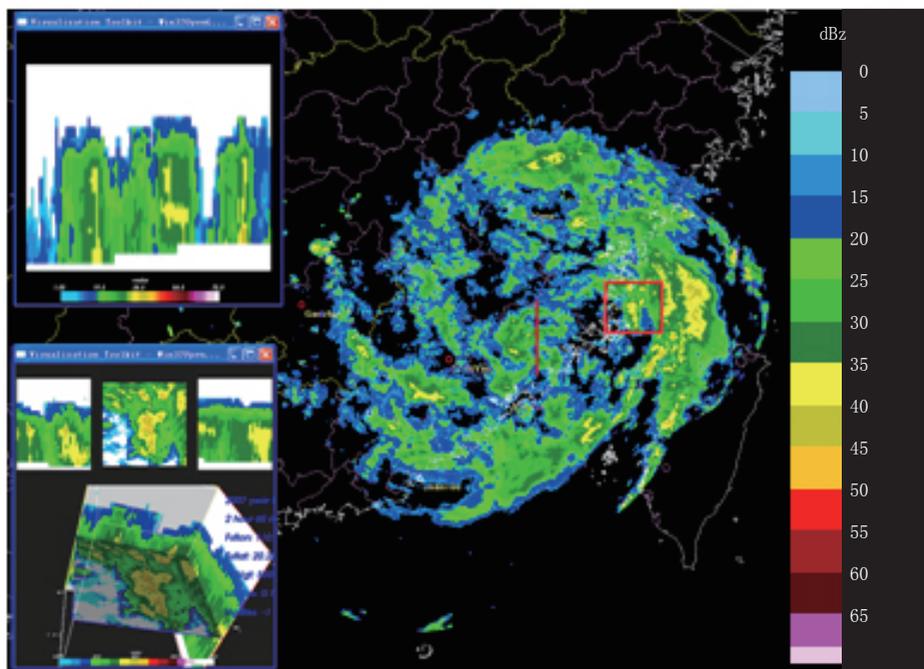


图 3 雷达三维组网结果示例