

相控阵天气雷达按需产品系统设计与实现

高磊¹, 王天成¹, 李广¹, 张曦²

(1.南京恩瑞特实业有限公司, 江苏南京 210013; 2.中国民用航空华北地区空中交通管理局, 北京 100621)

摘要:相控阵天气雷达的体扫探测结果仰角多、分辨率高,为满足业务应用中基本产品的快速显示需求,设计研发了按需产品处理显示系统,实现了在产品显示端的按需产品实时处理显示。系统利用 GPU 加速,显著提高了处理和显示效率,进一步提升相控阵天气雷达整机竞争力。文章阐述了按需产品系统在软件系统开发过程中的设计和实现,并结合最终软件界面结果进行了展示,体现了系统的灵活和高效,为未来相控阵天气雷达的数据应用和产品系统的设计开发提供参考。

关键词:相控阵天气雷达产品系统;实时处理显示;按需产品;GPU 加速

中图分类号:TN958.92

文献标识码:A

文章编号:2096-9759(2023)06-0233-05

Design and Implementation of Phased Array Weather Radar On-demand Product System

GAO Lei¹, WANG Tiancheng¹, LI Guang¹, ZHANG Xi²

(1.Nanjing NRIET Industrial Co. Ltd., Nanjing, 210013, China;

2.North China Regional Air Traffic Management Bureau of CAAC, Beijing, 100621, China)

Abstract: The volume scan data of phased array weather radar have multiple elevations and high resolution, a on-demand product processing and display system based on GPU has been designed and developed, in order to solve the applications difficulties in rapid display of on-demand products. The system uses GPU acceleration to significantly improve the processing and display efficiency and further enhance the competitiveness of the phased array weather radar. This paper describes the design and implementation of the on-demand product system, and shows the results with the final software interface, which reflects the flexibility and efficiency of the system, providing further reference of data application and product system design and development for phased array weather radar.

Keywords: phased array weather radar product system, real-time processing and display, on-demand product, GPU acceleration

0 引言

天气雷达能够对强降雨、冰雹、龙卷、台风等突发性中小尺度的灾害性天气进行探测,实现危险天气的监测和预警,减少或避免损失,在农林牧业、航空、军事、防灾减灾方面得到了广泛应用^[1]。我国在 20 世纪 70 年代就开始了天气雷达的研究和应用,并不断建设新一代天气雷达系统业务网^[2],90 年代开始,我国和美国联合研制了新一代全相参多普勒天气雷达,建立了中国新一代天气雷达监测网(CINRAD),使我国对气象灾害的监控、预警水平有了很大提高^[3]。相控阵天气雷达作为近年来发展的新体制天气雷达,其天线波束的快速扫描、波形捷变、空间功率合成和多波束形成能力,使得相控阵天气雷达的时间、空间分辨率都比较高,且探测的实时性强,进一步提高了灾害性天气的监测和预警能力^[4-6]。

雷达后端有一系列的软件系统用于信号处理、雷达控制、产品处理和显示等,其中产品软件系统是数据进行业务应用的重要系统。在国内,各雷达厂家的软件系统用于大致的架构和功能,以使用较多的北京敏视达有限公司气象应用软件 RPG+PUP 为例,其中 RPG 是产品生成软件,PUP 是产品显示软件,原始探测数据由 RPG 处理后,PUP 作为客户端进行显示交互^[7];国外厂家中,以德国 SELEX 公司的 Rainbow 系统和芬兰 Vailasa 的 IRIS 系统最具代表性,二者同样以产品处理和产品展示进行划分,经过不断迭代,Rainbow 已经发展到了第五代和第六代产品,IRIS 系统也在保留原有 Analysis(类似

RPG)系统的基础上,新研发 Focus 产品显示系统替代了原有的产品显示系统,二者在国际上都具备一定的影响力。

由于国内主流的产品软件系统是由美国 WSR88D 雷达后端系统衍生而来,在很长一段时间内,我们都处于学习和应用的阶段,在系统的本地化应用和改善方面做了很多工作^[8-11]。近年来,在中国气象局牵头下,我国天气雷达技术得到不断发展,随着双偏振天气雷达改造和补短板等工程的开展,老旧系统开始展现疲态。如今,相控阵技术的发展使得相控阵天气雷达逐渐登上舞台,其高时空分辨率的探测数据,对配套的产品软件系统提出了更高效和更灵活的要求,迫切需要对现有系统进行更多的思考、设计和尝试,以满足日益增长的业务应用需求。

1 需求分析

天气雷达前端设备探测到的体扫数据一般存储为基数据,基数据一般由产品生成系统完成预处理、质量控制、各类产品加工处理后,再通过产品显示系统进行显示和分析。随着双偏振技术和相控阵技术的发展,探测数据的参量数目增多,而相控阵天气雷达因其电扫、多波束合成特性,探测数据的仰角增多(可达 40 层以上),单个体扫时间大幅缩短,时空分辨率进一步提升,数据体量大大提高,产品软件系统需要更加高效地完成各类产品处理和产品展示^[12]。

天气雷达的产品类型在国内外不同的软件系统中各自分类和命名不同,但大体都可划分为基本产品(基本参量产品和

收稿日期:2023-03-14

作者简介:高磊(1987-),男,安徽六安人,南京航空航天大学测试计量技术与仪器专业,硕士,主要从事天气雷达应用软件的研发工作。

其等高面产品)、物理量产品(反射率强度反演)、风场类产品(多普勒速度反演)、降雨估测类产品、危险天气识别类产品以及各类分析型产品。不同产品在不同业务应用中需求各不相同,基本产品作为最基础的产品,却是需求最多、使用频次最高的产品,气象分析工作者的很多决策和判断都需要依赖基本产品,而相控阵天气雷达基本产品的高效处理和正确显示,是提高相控阵高时空分辨率数据应用水平必须夯实的基础。

常规天气雷达通常将所有基本产品全部进行产品处理,再由产品显示系统进行显示,而相控阵天气雷达因其海量的数据体量,全部处理会使得基本产品的条目非常多,对比如下表所示。在显示选择以及数据管理时,冗余复杂,不友好,更关键的是,不同业务应用场景中所需要的基本产品侧重点是不同的,如公共气象服务更多关注强对流、过程性降雨整体的降雨估测、识别等,而民航航路监测更多关注低空的风切变和下击暴流等。简单粗暴的全部处理增加了数据处理开销,在有限的计算资源下,导致系统整体效率不高。

表 1 相控阵天气雷达与常规天气雷达基本产品条目数对比

要素	相控阵双偏振天气雷达	常规单偏振天气雷达
参量类型	Z、V、W、T、Zdr(LDR)、Phidp、Kdp、Rohv、SNR(共 9 个)	Z、V、W、T
仰角数	常规 40 层	一般 14 层(VCP11)
等高面产品层数	20 千米高度等间隔(至少 1 千米一层)划分,共 20 层	
所有基本产品条目数	540(个)	136(个)

因此,在相控阵天气雷达产品软件系统中,为了满足不同业务应用场景中基本产品的应用需求,对其处理流程进行了重新设计,在原有产品软件系统的基础上,设计开发了基于 GPU 加速的按需产品处理显示系统镶嵌其中,合理利用硬件资源,提高处理效率的同时,可根据需求灵活实现所需产品的加工处理和显示。

2 软件系统设计

2.1 开发环境

相控阵天气雷达按需产品系统基于高性能显卡平台进行设计开发,利用 GPU 加速来提高整体的数据处理效率,采用基于 C++语言且支持跨平台的 Qt 作为编码开发框架,对原有基本产品的处理流程进行优化,增加了新的按需产品处理和显示流程,以满足灵活高效的业务应用需求,具体软件环境为 CUDA 11.1、编码环境为 qt 5.9+gcc 5.0、操作系统为 Ubuntu 20.04。

Qt 是由 Qt Company 发布的一种跨平台 C++图形用户界面(Graphical User Interface,简称 GUI)应用程序开发框架,它既可以开发 GUI 程序,也可以开发非 GUI 程序。该框架应用特定的程序来生成扩展和部分宏,用户能够快速入门,从而相对容易开发。经过这些年的不断发展,已能提供给应用程序开发者建立艺术级的图形用户界面所需的所有功能,与经常使用的 Windows 平台上的 MFC、OWL、VCL 类似。

CUDA 架构由 NVIDIA 公司设计发布,它提供了 GPU 编程的简易接口,基于 CUDA 编程可以构建基于 GPU 计算的应用程序,利用 GPU 的并行计算引擎来更加高效地解决比较复

杂的计算难题,随着 CUDA 处理架构的不断完善,CUDA 程序的编写可支持 C、C++和 Fortran 等编译器,这使得程序开发人员可以相对容易掌握,但开发出优秀的 CUDA 程序还是相当不容易的。常用的 CUDA 编程模式是 CPU 与 GPU 协同处理的模式,CPU 控制整个项目的流程,并控制 GPU 的执行,通过 CUDA 的核函数设计,线程网格、线程块的设计,来利用 GPU 加速实现数据的高效处理。

2.2 总体设计

公司研发的相控阵天气雷达的后端产品系统主要分为产品处理系统(Radar Product Generation, RPG)和产品显示分析系统(Products Display and Analysis, PDA),按需产品系统是镶嵌在其中的子系统。由于基本产品的应用需求不同,为了满足高效和灵活的设计需求,在原有产品软件系统的基础上,增加了按需产品处理流程和显示流程,形成按需产品系统。将固定需要的产品交由常规处理流程实现,而结合具体天气或具按分析需求的按需产品,交由按需产品系统实现。

每次来新基数据后,通过 RPG 界面进行产品的各类参数配置,常规处理流程(下称 RPG 流程)会先进行数据标准化处理,将数据形成标准数据格式分类存储到内存中,再根据配置的产品类型和各产品的参数,一次性批处理完成所有产品的处理,PDA 叠加高精度 GIS 信息进行显示,同时并将标准数据再次存储。按需产品流程,则通过用户界面的控件进行产品选择和参数选择,根据当前的基数据信息,遍历获取 RPG 处理后的标准数据后,立即处理生成所需产品并叠加高精度 GIS 信息显示,可随时切换产品类型和参数并多次进行。处理流程中的数据处理和显示映射计算交由 GPU 高效计算平台完成,灵活实现基本产品的高效处理和显示,处理流程如图 1 所示。

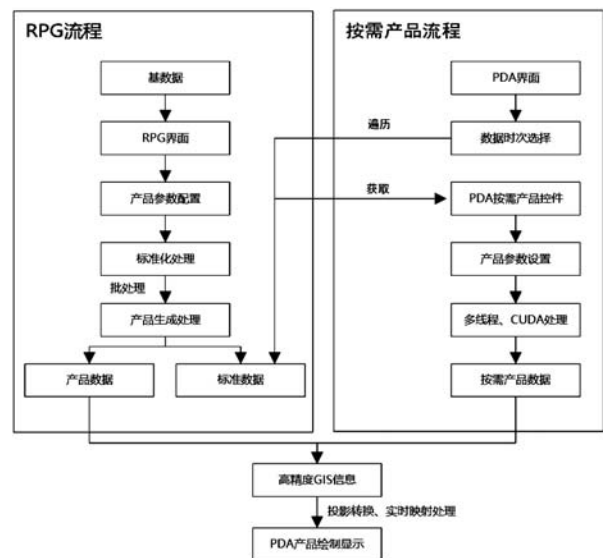


图 1 产品处理流程

按需产品系统基于 Qt UI 界面和组件管理搭建系统架构,结 GPU 高效计算平台下的数据处理动态库,以场景图 Scene Graph 作为底层渲染,具备低耦合、高效率、高可用的特点。系统主要包括产品显示、产品交互、产品处理、用户管理设置、日志管理和其他辅助功能等模块,系统结构如下图所示,其中产品处理、产品交互、产品显示是核心模块,下面就核心模块中的功能进行详细介绍。



图2 系统功能结构

2.3 功能设计

2.3.1 数据标准化

按需产品系统所需的输入数据为标准数据,而标准数据来自于RPG的处理生成,数据标准化指的是常规探测数据到标准数据的过程,主要完成数据格式转换和数据整理的工作。一方面由于不同天气雷达前端直接存储的数据格式各不相同,为了保证系统的稳定性和便捷性,需要将不同数据格式转换成内部流通过式,以最小的改动实现最高的性价比;另一方面,由于雷达扫描是一个持续的过程,数据在存储时,一般采用边扫边存的方式进行,每次扫描存储的数据开始的空间位置是不同的,并且不同参量数据的存储是不连续的,降低了后端系统对数据进行内存I/O的效率。数据标准化以模块化形式构建,可在RPG和按需产品系统上分别加载使用,可对不同类型的雷达进行适配,灵活性强,通过对基数据的转换和整理后,提高内存I/O效率并保证数据准确性。

2.3.2 按需产品配置

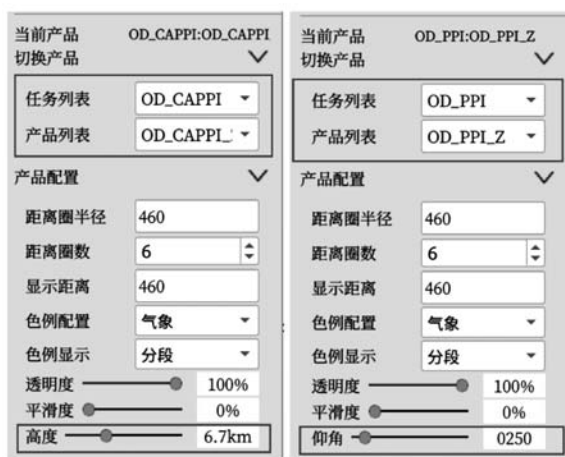


图3 按需产品控件展示

产品展示分析系统具备对常规RPG生成的各类产品进行显示分析的功能,按需产品配置作为一个功能模块嵌入在产品显示分析系统中,采用隐藏式设计,即只有在需要进行按需产品时,通过功能模块激活后,才进行相应组件的显示和使用。功能激活后,在界面右侧边界栏的任务列表和产品列表中,将会出现按需PPI产品(平面位置显示,Plan Position Indicator,

PPI)和按需CAPPI产品(等高平面位置显示,Constant Altitude Plan Position Indicator,CAPPI)界面,通过选中某一类型的按需产品,下方将出现对应的参数配置。以按需PPI产品(On-Demand PPI,OD_PPI)为例,由于相控阵天气雷达的仰角数目非常多,因此采用滑块控件作为仰角选择,提高使用友好性,通过推拽滑块即可立即处理绘制并显示对应仰角的PPI按需产品,配置界面如图3所示。

2.3.3 高精度GIS

地理信息系统(Geographic Information System,GIS)是软件系统中一种特定的空间信息系统,它对整个或部分地球表层空间中的有关地理分析数据进行了采集、存储、管理、运算、显示等,在天气雷达的产品软件系统中,探测数据叠加GIS信息进行展示是数据高精度可视化的重要技术手段。相控阵天气雷达的探测数据具备非常高的空间分辨率(百米以下),按需产品系统采用高精度瓦片地图作为GIS系统进行叠加显示,以提高相控阵天气雷达高分辨率数据的应用水平。

瓦片地图指的是栅格地图图片,通过将一定范围内的地图按照一定的尺寸和格式,按缩放级别或者比例尺,切成若干行和列的正方形栅格图片,切片后得到的众多正方形栅格图片被形象的称为瓦片。瓦片地图是一种多分辨率金字塔层次模型,从瓦片金字塔的底层到顶层,分辨率越来越低,但表示的地理范围不变,在图4所示level1到level3表示了金字塔模型从顶端往下的地图层级,越往下瓦片数目越多,精度越高。

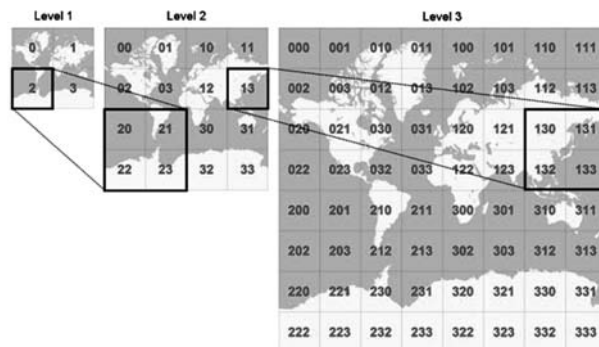


图4 瓦片地图金字塔结构

2.3.4 GPU处理

按需产品处理是实时性要求非常高的处理过程,相控阵天气雷达的数据体量大,本身的数据I/O就需耗费一定的时间,在产品处理、绘制和显示过程中采用常规方法,势必导致系统卡顿等待。因此,对按需产品从生成处理到显示绘制的过程,采用CUDA重新设计编码,利用高性能显卡的计算能力对系统进行加速,提高系统流畅度,GPU高效处理的流程如图5所示。

按需产品系统在用户打开分析模式并进行按需产品配置后,根据当前界面选中的数据时次,自动访问RPG服务器并获取对应的标准数据,将数据读入到CPU内存后,通过CPU逻辑调度,将内存和系统设置的各类参数复制到GPU显存,在使用CUDA编码设计完成的GPU程序中,完成线程网格设计,并进行多个核函数的计算,包括产品算法处理计算、极坐标与笛卡尔坐标的坐标转换计算、投影转换计算(系统采用Web-Mercator投影)以及着色处理(根据配置色例),处理完成后,将着色后GPU显存传递给CPU内存,形成位图对象,最后根据当前操作的缩放级别,叠加高精度瓦片GIS地理信息系统进行产品显示。

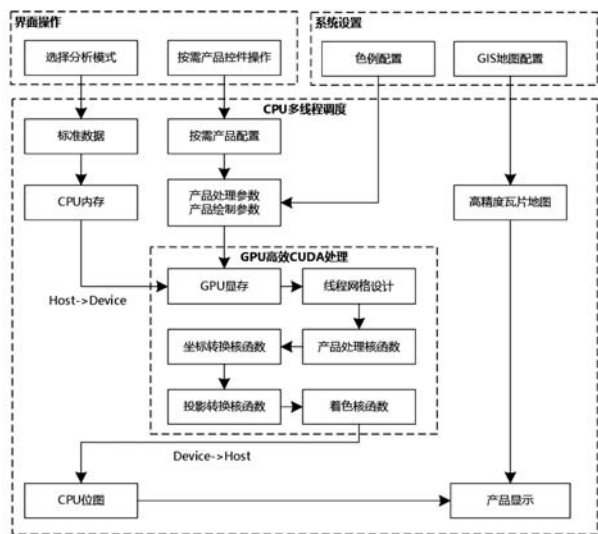


图5 按需产品调度流程

3 应用实例

按需产品系统作为产品显示分析系统的一部分,已经应用于实际双偏振相控阵雷达项目,该雷达为相控阵体制,采用垂直电扫水平机械扫描的方式进行体扫探测,探测数据的方位分辨率为 1° ,径向数约为370根,径向库分辨率为62.5米,库数约为3000?5000个。软件部署的机器配置如下,为常规台式机。

表2 按需产品系统硬件配置主要参数

参数	配置内容
CPU	1 颗 i7(六核 3.2GHz 以上)
内存	16G
硬盘	1 块 1T 固态硬盘
网卡	1 个千兆网卡+1 个 Intel 单口万兆网卡
显卡	NVIDIA GeForce RTX 2060 独立显卡
显示器	27 寸 2K 分辨率显示器

在按需产品系统实际应用中,实现按需产品的流程分为如下几个步骤:

(1)通过界面下方的时间轴控件来进行数据时次的选择,当选中某一时刻的数据后,打开分析模式并加载标准数据,平均耗时约2秒;

(2)通过操作右侧边栏的按需产品控件,进行按需产品的配置,在下拉菜单中具体任务列表选择OD_PPI或OD_CAPPI,再通过产品列表选择具体的参量类型,如OD_PPI_Z表示选择了水平反射率强度的按需PPI产品;

(3)通过拖拽下方滑条,进行仰角(CAPPI为高度)的选择,系统将自动执行CUDA处理和绘制,并最终将结果展现在主界面上,切换不同任务、产品、仰角或高度,整个流程耗时小于200毫秒,操作流畅。

图6为按需CAPPI和按需PPI产品在界面上的展示。

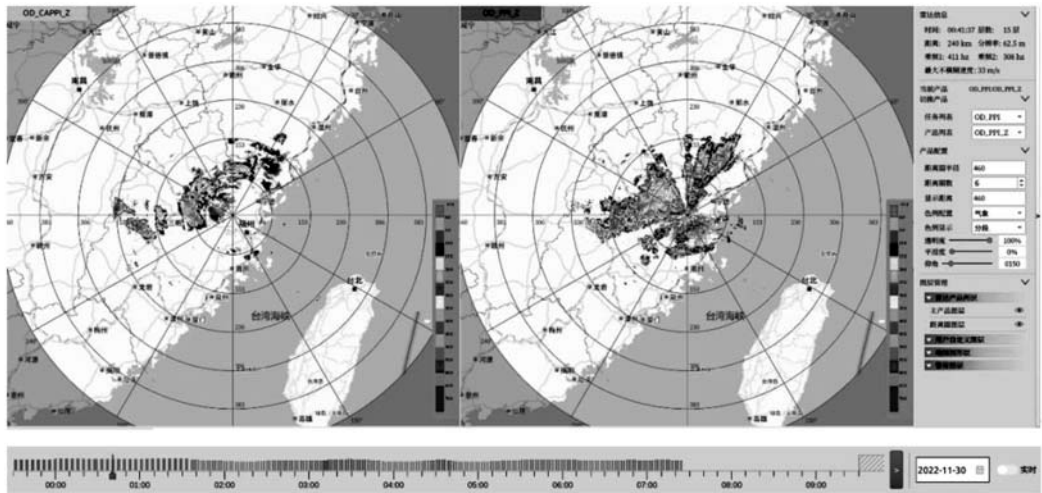


图6 按需产品配置、处理、绘制和显示结果

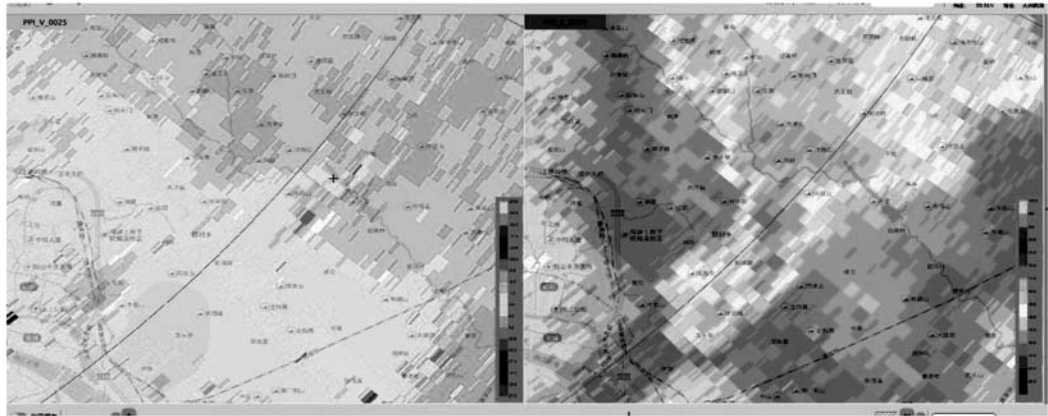


图7 高分辨率数据实时映射叠加高精度GIS

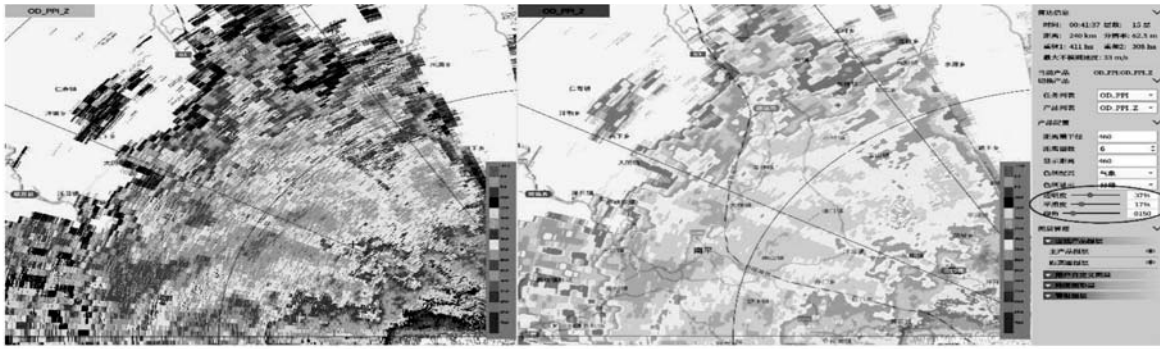


图8 图像渲染效果

系统在不同缩放级别下的绘制采用实时映射重绘的方式进行,展现精细到具体库的数据可视化结果,数据叠加高精度GIS信息时,完成标准折射大气下的曲率订正以及投影转换,保证数据真实性、可靠性,在产品端充分展现相控阵天气雷达的高分辨率探测效果。

得益于GPU高效数据处理,按需产品在常规着色渲染的基础上,可以进行任意色例的切换、透明度的调整以及平滑度的调整,都为毫秒级响应。具体在业务使用中,不同色例的切换,有利于不同系统或部门间方便进行结果比对;透明度的调节可叠加高精度GIS信息,精准获取天气发生的具体位置,满足在预警预报业务中的精细化要求;平滑度的调节切换,可满足不同应用场景下的多变需求,如在数据分析中,展现真实可靠的原始数据,而在气象服务产品发布中,展示更美观的数据结果。

4 结语

本文基于相控阵天气雷达对后端产品处理和显示的需求,阐述了按需产品系统的软件总体设计和主要功能模块的设计,通过实际在业务中使用的情况,可见按需产品系统可以更加高效的满足用户对相控阵天气雷达基本产品的灵活使用需求,可以更加友好便捷实现相控阵天气雷达多仰角大体量观测数据可视化,充分发挥了相控阵天气雷达高精度探测能力。按需产品系统主要针对的是基本产品,在产品系统后续其他产品的处理、绘制显示过程中,还需结合实际需求和产品特性,不断探索。希望本系统的设计开发可以为相控阵天气雷达后端数据应用提供更多思路,为未来相控阵天气雷达的数据应

用和产品系统的设计开发提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 刘思思.某相控阵天气雷达信号处理系统的研究[D].西安电子科技大学.
- [2] 李柏,古庆同,李瑞义,等.新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J].气象,2013,39(3):16.
- [3] 俞小鼎.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].气象出版社,2006.
- [4] 张光义.相控阵雷达的技术特点及关键技术[J].电子科技导报,1996(7):2-4.
- [5] 张光义.相控阵雷达原理[M].国防工业出版社,2009.
- [6] 张越.相控阵技术在天气雷达中的应用[J].现代雷达,2003,25(12):3.
- [7] 惠良,孙金华,陈晓东.新一代天气雷达产品软件RPG,PUP介绍[C].江苏省气象学会第七届学术交流会.2011.3-10.
- [8] 田程,雷登林,彭茜,等.双偏振天气雷达PUP地图细化的设计和实现[J].中低纬山地气象,2022(001):046.
- [9] 刘一谦.多普勒天气雷达PUP产品共享系统设计与实现[D].电子科技大学.2015.2-3.
- [10] 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):7.
- [11] 田程,马传成,倪雷,等.CINRAD/CD雷达PUP和RPG的安装方法和技巧[J].贵州气象,2016,40(4):4.
- [12] 张曦,黄兴友,刘新安,等.北京大兴国际机场相控阵雷达强对流天气监测[J].应用气象学报,2022,33(2):192-204.

$$(上接第232页) \quad I_C = I_D = \sqrt{\frac{10000}{50}} = 14.14A \quad (12)$$

$$I_{Cmax} = I_{Dmax} = 1.23 \times 14.14 = 17.39A \quad (13)$$

$$U_{C2max} = 2.83U_{C2} = 2.83 \times I_C \times |X_C| = 2.83 \times 14.14 \times \sqrt{50^2 + 247.7^2} = 10084V \quad (14)$$

(根据C₂处电压、电流及虚功率选取合适电容)

$$U_D = U_E = I_D \times |Z_D| = 14.14 \times 50 = 707V \quad (15)$$

$$U_{Dmax} = U_{Emax} = 2.83 \times 707 = 2001V \quad (16)$$

$$\varnothing_{L2} = \frac{17.39}{3} = 6mm \text{ (实际可选取线径为10mm的电感线圈)}$$

$$I_{L3} = I_{L4} = \frac{U_{Ex}}{|X_{1359}|} = \frac{707}{31.1} = 22.73A \quad (17)$$

$$I_{L3max} = I_{L4max} = 1.23 \times 22.73 = 28A \quad (18)$$

$$\varnothing_{L3} = \varnothing_{L4} = \frac{28}{3} = 9.3mm \text{ (实际可选取线径为20mm的电感线圈)}$$

$$U_{C3max} = 2.83U_{C3} = 2.83 \times I \times |X_{C3}| = 2.83 \times \frac{707}{31.1} \times 367.9 = 2946V \quad (19)$$

$$U_{C4max} = 2.83U_{C4} = 2.83 \times I \times |X_{C4}| = 2.83 \times \frac{707}{31.1} \times 1467.67 = 11784V \quad (20)$$

(根据C₃、C₄处电压、电流及虚功率选取合适电容)

5 结语

总之,要做好中波广播的安全播出,天调匹配网络是不可忽视的一个系统,只有进行参数精算后选用合适的元器件,天调网络才能最高效率的将能量辐射到覆盖范围内,完成安全高效的播出工作。另外在新天调网络投入工作前应进行一段时间的试运行,期间观察各元器件状态,确保各器件工作状态正常,日常维护时也应按期对天调网络进行巡查,及时排查隐患,保证信息安全高效传送。

参考文献:

- [1] 苏玉.浅谈中波广播发射机的运行环境[J].才智,2012,(14),2012-05-15,330.
- [2] 颜大健.中波天线调配网络的设计要求及元器件选取[J].西部广播电视,2004,(11),2004-11-28,39-41.