

# 新一代天气雷达产品故障识别及监测预警系统设计实现

张东明<sup>1</sup> 卢兴来<sup>1\*</sup> 杨豪<sup>2</sup> 王晗<sup>1</sup> 刘壮峰<sup>3</sup>

(1 浙江省大气探测技术保障中心, 杭州 310000; 2 浙江省宁波市气象网络与装备保障中心, 宁波 315000;  
3 浙江省舟山市气象网络与装备保障中心, 舟山 316000)

**摘要** 新一代天气雷达故障直接影响数据质量, 异常产品的产生对短时临近预报预警带来了重大的影响, 实现雷达异常产品实时监测具有一定现实意义。本系统采用 WinForm 3 层架构+ORM 模型架构, 通过统计纹理分析、灰度图像特征值分析等图像处理技术实现自动识别雷达异常产品。新一代天气雷达产品故障监测预警系统可以实时、高效、准确检测出异常雷达产品, 满足强对流天气预警监测、天气雷达故障预警服务预判、天气雷达产品可用性服务等功能要求, 从单部雷达产品数据中识别出异常回波, 避免进一步影响多雷达组网拼图, 对天气雷达组网产品的质量控制具有重要的意义。

**关键词** 雷达产品数据; 图像处理技术; 实时预警系统; 异常回波检测

**中图分类号**: P409 **DOI**: 10.19517/j.1671-6345.20220306 **文献标识码**: A

## 引言

新一代天气雷达资料的数据质量对中小尺度灾害天气监测具有重要的影响, 一旦异常气象回波产品进入模式对预报准确性影响很大且具有业务人员难以识别和无法控制的特点。雷达故障造成极端数据上传, 以异常数据为基础产生服务气象产品, 未能及时监控并采取阻断措施, 将导致严重不良后果。周红根等<sup>[1]</sup>, 针对新一代天气雷达(CINRAD/SA), 在运行过程中出现的雷达回波异常情况, 从新一代天气雷达受到外界电磁波的干扰, 计算机系统, 接收机系统, 天伺系统等方面, 分析了造成雷达回波异常的故障成因。赵瑞金等<sup>[2]</sup>对 CINRAD/SA 不同部位硬件故障的雷达基数据和回波特征进行了分析, 给出不同类型雷达故障的数据特征和判定参数, 指出通过对雷达扫描线位置信息逻辑检查, 并结合回波图像的面积、强度、相似度检测等特征参数检测, 提高硬件故障导致的错误数据识别。邵楠等<sup>[3]</sup>论述基于图像处理技术实现自动识别雷达异常产品, 详细介绍系统实现模型及雷达数据异常自动识别

算法。

基于新一代天气雷达数据识别方法大多只做了个例研究, 且一般针对硬件故障雷达分析或基数据研究, 未开展业务化工作。本系统依托一种处理方法, 该方法基于图像处理技术, 进行雷达产品特征识别方法分析, 包括产品数据识别、噪声特征提取、灰度图像分析<sup>[4]</sup>。开发新一代天气雷达产品故障监测预警业务系统, 系统自动识别异常产品, 能更加高效地检测出异常雷达产品, 及时采取措施阻断, 提高雷达使用效率。无论是电磁环境、地物杂波干扰、超折射等外界原因造成的回波干扰, 还是由设备软、硬件故障造成的产品图像异常, 都会对业务正常开展造成影响<sup>[5]</sup>。本系统已在浙江全省雷达站进行试运行, 试运行期间运行平稳、可靠。

## 1 雷达产品特征分析方法

当雷达出现故障时, 对雷达数据主要产生如下影响: ①数据完整性出现异常或无数据。主要是因为雷达硬件系统出现故障, 常常导致停机, 对探测数据完整性会产生影响<sup>[6]</sup>。②数据位置信息错误。何

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

浙江省重点气象科技项目(项目编号:2020ZD12)资助

作者简介:张东明,男,1990年生,工程师 主要从事气象装备保障与气象系统软件开发工作,Email:329073508@qq.com

收稿日期:2022年7月20日;定稿日期:2023年3月28日

\* 通信作者,Email:596976732@qq.com

服系统故障常常影响探测数据的方位和仰角信息。当雷达探测数据的位置信息错误时,会导致相邻体扫回波的位置、范围突变、出现丝状回波、V形等图形<sup>[7]</sup>。③数据强度出现异常。如连续的异常高的回波强度、无数据、强度无变化或呈规律性变化等,回波上表现为相邻体扫强度、范围差别很大,出现环状、饼状回波等<sup>[8]</sup>。

### 1.1 产品数据完整性信息识别

多普勒天气雷达数据的完整性检查包括仰角层数量、观测参量类型及数量和径向扫描数量等,数据完整性的检查基于解析后的产品数据文件信息进行判断<sup>[9]</sup>。首先,多普勒天气雷达有多种工作模式,各种模式的扫描层数差异较大,根据产品文件中扫描配置块的扫描层数(Cut Number)信息判断仰角层数量是否异常<sup>[10]</sup>;然后,观测参量类型、数量和径向数据的检查通过产品数据文件中的径向数据块信息判断其异常情况,如径向数据头记录了径向数(Radial Number)、方位角(Azimuth)、仰角(Elevation)以及数据类别数量(Moment Number)等信息<sup>[11]</sup>。最后,根据径向数据的连续性以及各仰角层径向数据方位覆盖情况对数据完整性进行综合判定。当仰角层数为  $N_A$ ,每层扫描线数为  $N_B$ ,数据完整性异常值为:

$$N_A \neq 11 \text{ 或 } N_B < 360 \quad (1)$$

### 1.2 产品数据位置信息识别

天气雷达伺服系统有故障发生,会导致扫描线方位角错位或缺失,仰角值会突然增高或降低<sup>[12]</sup>。当相邻两条扫描线径向数据出现序号不连续,方位角之差的绝对值大于  $2^\circ$ 时,说明此时有扫描线的缺失或错位现象,只要出现一次即可判断为出错。相邻扫描线的径向数据序号步长为  $\Delta T$ ,方位角之差的绝对值为  $\Delta A$ <sup>[13]</sup>。判断依据:

$$\Delta T \neq 1, \Delta A > 2^\circ \quad (2)$$

### 1.3 产品数据强度信息识别

雷达故障导致数据错误会引起回波形态、范围和强度的变化,可能会出现饼状、环状等回波图<sup>[14]</sup>。而气象回波在演变过程中、移动速度、高度、强度等均有一定合理限度,在时间和空间上发展具有一定的延续性<sup>[15]</sup>。因此通过相邻体扫的回波特征参数的比较可以识别数据错误。需要与相邻的正常数据进行图像特征相关才能识别出错误数据<sup>[16]</sup>。

### 1.4 产品数据异常信息识别

基于数字图像处理对新一代天气雷达产品进行图像特征提取,形成各类判断指标,判定回波数据质量情况,推出报警或提醒等信息,部分实现雷达回波智能分析功能<sup>[17]</sup>。研究上述极值出现情况,在从数据中提取相对规律,分析图像信息,设定阈值,推出报警信息,触发人工干预,避免这类异常数据连续多次传输,具体通过图像特征值提取对比分析方法实现:①首先将雷达回波图每条径向上的数据解析出来,对一条径向上出现非零同值的现象进行特征值提取分析,并作出错误报警。②针对雷达回波图相邻点位、区块点位进行阈值对比判断,将出现严重跳变的现象进行错误预警。

### 1.5 噪声特征提取

通过使用图像区域增长的方法求取所有区域,通过大量的图片实验总结出一个阈值,判定小于该阈值为噪声点,计算所有噪声点占据的像素数占总像素的比例,再经过典型图片试验对该比例找到一个优质的阈值,如果大于比例阈值则认为是噪声,否则不是噪声<sup>[18]</sup>。

### 1.6 灰度图像分析

统计纹理分析寻找刻划纹理的数字特征,用这些特征或同时结合其他非纹理特征对图像中的区域进行分类<sup>[19]</sup>。对图像灰度空间分布模式提取和分析,为了能更直观地以共生矩阵描述纹理状况,从共生矩阵导出一些反映矩阵状况的参数,能更好地兼顾图像宏观性质与细微结构两个方面。

灰度共生矩阵中的元素  $(i, j)$  的值表示了图像中其中一个像素的灰度值为  $i$ ,另一个像素的灰度值为  $j$ 。灰度共生矩阵被定义为从灰度为  $i$  的像素点出发,离开某个固定位置(相隔距离为  $d$ ,方位为  $0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ$ )的点上灰度值为其概率,即,所有估计的值可以表示成一个矩阵的形式,以此被称为灰度共生矩阵<sup>[20]</sup>,如图 1 所示。对于纹理变化缓慢的图像,其灰度共生矩阵对角线上的数值较大;而对于纹理变化较快的图像,其灰度共生矩阵对角线上的数值较小,对角线两侧的值较大。

#### 1.6.1 对比度

反应了图像的清晰和纹理沟纹深浅的程度。纹理的沟纹深,其对比度越大,效果越清晰,反之,对比值小,则沟纹浅,效果模糊<sup>[21]</sup>。灰度差即对比度大的像素对越多,这个值越大。灰度共生矩阵中原理

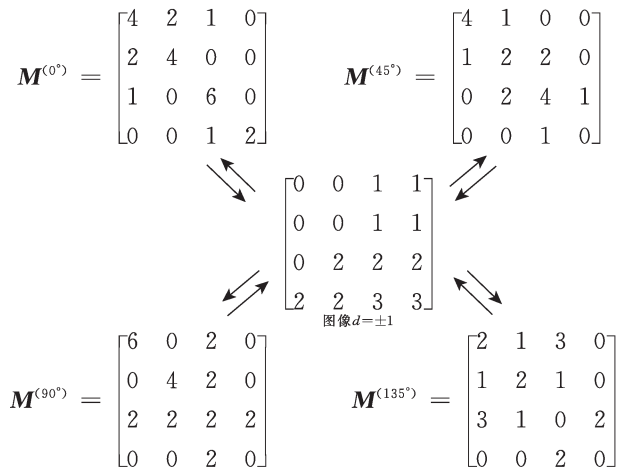


图 1 灰度共生矩阵示意

对角线的元素值越大,对比度越大。

$$C_{ON} = \sum_i \sum_j (i - j)^2 P(i, j) \quad (3)$$

其中,对于整个画面,统计出每一种  $(i, j)$  值出现的次数,然后排列成一个方阵,在用  $(i, j)$  出现的总次数将它们归一化为出现的概率  $P(i, j)$ ,  $P(i, j)$  是指归一化后的灰度共生矩阵。

### 1.6.2 能量

能量变换反映了图像灰度分布均匀程度和纹理粗细度<sup>[22]</sup>。若灰度共生矩阵的元素值相近,则能量较小,表示纹理细致;若其中一些值大,而其他值小,则能量值较大。能量值大表明一种较均一和规则变化的纹理模式。图像越均匀,其值越大。

$$A_{SM} = \sum_i \sum_j P^2(i, j) \quad (4)$$

### 1.6.3 熵

图像包含信息量的随机性度量。当共生矩阵中所有值均相等或者像素值表现出最大的随机性时,熵最大;因此熵值表明了图像灰度分布的复杂程度,熵值越大,图像越复杂<sup>[23]</sup>。

$$E_{NT} = - \sum_i \sum_j p(i, j) \lg p(i, j) \quad (5)$$

### 1.6.4 逆方差

逆方差反映了图像纹理局部变化的大小,若图像纹理的不同区域间较均匀,变化缓慢,逆方差会较大,反之较小<sup>[24]</sup>。

$$H = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \frac{p(i, j | d, \theta)}{1 + (i - j)^2} \quad (6)$$

其中,  $p(i, j | d, \theta)$  表示在给定的空间距离  $d$  和方向  $\theta$  时,灰度以  $i$  为起始点(行),出现灰度级  $j$ (列)的

概率。

### 1.6.5 相关性

用来度量图像的灰度级在行或列方向上的相似程度,当矩阵元素值均匀相等时,相关值就大;相反,如果矩阵像素值相差很大则相关值小<sup>[25]</sup>。

$$R = \frac{[\sum_i \sum_j P(i, j) - \mu_x \mu_y]}{\sigma_x \sigma_y} \quad (7)$$

其中  $u_x$ 、 $u_y$  是均值  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  是标准差。

## 2 系统设计实现

### 2.1 设计思路分析

本系统总体采用基于 WinForm 3 层架构 + ORM 模型的快速开发框架,使用图形、表格、声音、微信推送等方式实现系统展示、分析以及报警的功能,满足雷达站业务需求<sup>[26]</sup>。系统主要包括系统设置,产品分析、图像特征计算、报警推送等。系统整体可以分为 5 个子模块,分别为系统后设置、产品及时性监控、雷达图像特征值分析、产品异常监控、历史数据再分析。系统整体流程图如图 2 所示。

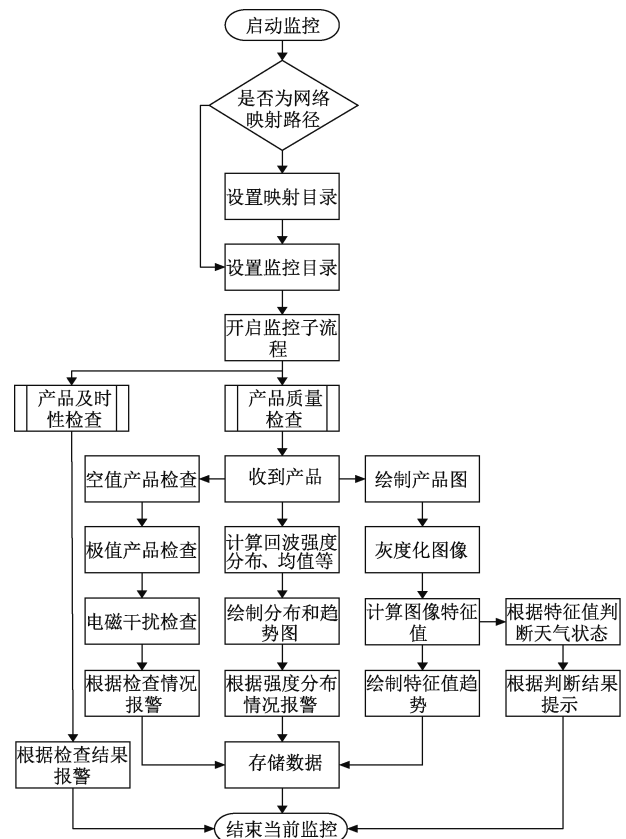


图 2 雷达产品预警系统工作流程

### 2.2 系统创新点

产品质量检查丰富:雷达产品质量检查流程,主要包含空值产品检查、极值产品检查、单层仰角上电磁干扰情况检查、多层仰角组合电磁干扰情况检查、绘制产品图像特征、计算产品图像特质值、雷达回波情况检查。本系统基于雷达产品数据绘制成图像,并对产品图像进行灰度二值化,计算灰度共生矩阵的能量、熵、对比度、均匀性、相关性、方差、和平均、和方差、和熵、差方差、差平均、差熵、相关信息测度以及最大相关系数,最后根据特征值判断天气状态

以及雷达运行状态。

### 2.3 功能模块设计

采用分解的方法,将系统设计成由相对独立、功能单一的模块组成的结构,它是以系统的逻辑功能和数据流关系为基础,根据数据流程图,借助于一套标准的设计准则和图表工具,通过“自上而下”和“自下而上”的反复,把系统逐层划分为多个大小适当、功能明确、具有一定独立性且容易实现的模块。雷达产品分析报警系统功能结构图如图 3 所示。

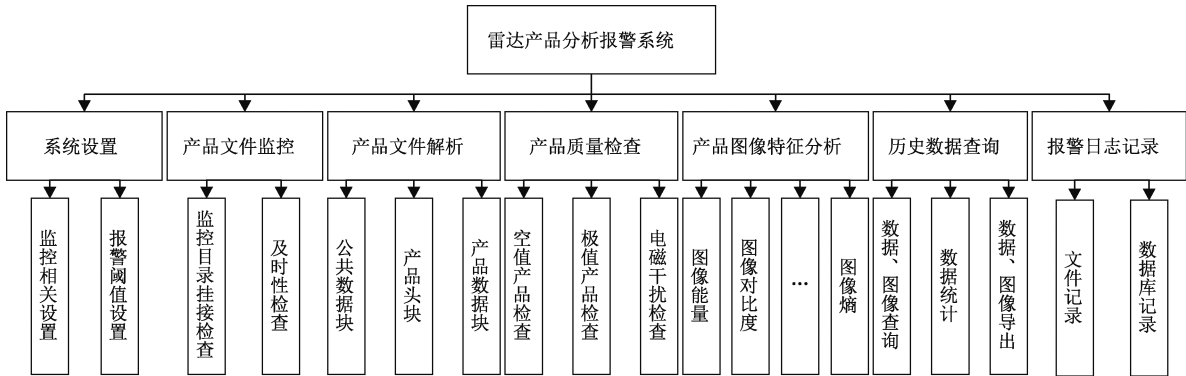


图 3 雷达产品分析报警系统功能结构

(1)产品文件监控:雷达产品主要通过 3 种方式进行存储:①直接存储在本地计算机上;②雷达产品通过 ftp 方式存储在指定存储中,在指定计算机上对映射目录进行监控;③雷达产品直接存储到存储系统的共享目录中,在指定计算机中设置映射目录,对映射目录进行监控。

(2)产品文件解析:按照天气雷达产品数据标准格式对新生成的产品文件进行解析,产品文件是按照二进制进行存储的。产品数据可分为公共数据块、产品头块和产品数据块 3 个部分,其中:公共数据块用于提供数据的站点信息、任务配置等公共信息。产品头块用于提供产品最基本的信息。数据格式中定义了数据类型和每个部分固定长度,因此通过多线程方式批量读取数据,达到快速解析一个产品数据。

(3)及时性检查:定时检查与最后一次获得产品文件时间或是系统刚启动的时间对比,判断是否有超过指定时间未生成产品文件。

(4)电磁干扰情况检查:对单个仰角反射率产品的电磁干扰情况进行分析判断,当某一时刻多个仰

角的反射率产品均获得后,对多层的反射率产品进行综合分析判断。

(5)无回波或异常回波判断:对照 PUP 中的 PPI 产品,对于数据区编码值小于 5 代表无回波区域。对有回波的情况通过  $(\text{编码值} - 66) / 2$  的计算方式,对超过所有数据或某方位角内的所有数据均超过 55 dB,则判断为异常回波。

(6)绘制产品图像:根据产品文件中的数据块绘制极坐标方式的产品图像和笛卡尔坐标方式的热力图。

(7)图像特征计算:对真彩图的产品图像进行灰度二值化,接着对图像的灰度共生矩阵进行统计分析<sup>[27]</sup>,得到 14 种图像特征的统计量。图像特征值判断:根据图像特征值和系统的阈值参数设置,进行分析判断。

(8)检查报警模块:针对产品数据质量和图像特征值结果采用声光报警,研究标准输出控制器手机短信接口,将监控软件接入,推送告警信息,如若标准输出控制器不正常则将告警信息推送给云 mas 平台。雷达产品分析报警系统报警模块流程如图 4 所示。



图 4 雷达产品分析报警系统报警模块流程

### 2.4 系统功能实现

系统主要模块由产品的基本信息、反射率产品图和反射率热力图、图像特征识别信息报警提示信息、多层反射率干扰综合判别报警信息、波强度分布柱状图、回波强度均值趋势柱状图和图像特征值趋势图、操作控制功能区等综合模块组成。系统实时监控如图 5 所示。

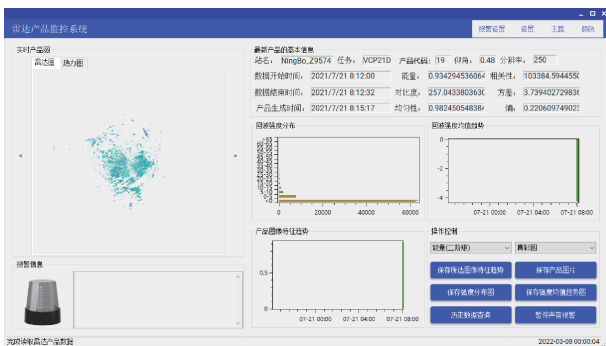


图 5 2021 年 7 月 21 日雷达产品监控系统界面

实时产品图是最新时刻反射率产品图和反射率热力图,支持查看 6 h 左右的回波图和热力图;报警信息图包括提高图像特征识别信息阈值报警提示信息、单层反射率电磁波干扰或多层反射率干扰综合判别报警信息,以及空值回波或极值回波报警信息;操作控制功能区包括选择图像特征值趋势的类型,保存产品图像、强度分布图、均值趋势图、图像特征趋势图,以及历史数据查询分析、暂停声音报警功能。

## 3 应用案例分析

### 3.1 一次台风期间系统应用分析

2021 年 9 月 9—23 日,9 月 13 日从浙江沿海地区北上,通过纹理数据热力图可以看出,此时图像能量为范围内做小,图像对比度、图像相关性、图像方差、图像熵较大。“灿都”台风期间图像分析的纹理数据热力图分析如图 6 所示。

2021 年 7 月“烟花”台风期间,雷达回波超过 45 dBz,产品图像热力图分析如图 7 所示。



图 6 2021 年 9 月 9 日“灿都”台风期间产品图像特征值趋势

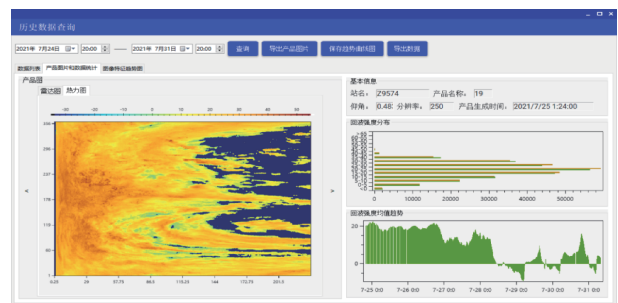


图 7 “烟花”台风期间产品图像热力图分析 (纵坐标:方位角,横坐标:距离)

### 3.2 一次无产品案例分析

2021 年 9 月 24 日雷达停机维护为例,通过图形特征趋势图准确反应产品数据未到。通过 3 个月的试运行考核,系统探测到雷达未获取产品的准确率为 100%,雷达产品缺失情况如图 8 所示。

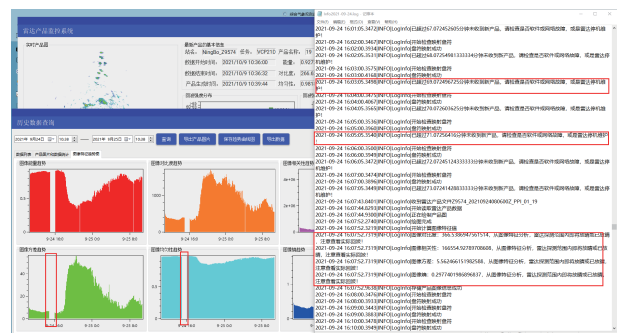


图 8 2021 年 9 月 24 日雷达产品缺失情况分析

### 3.3 一次异常回波分析

2020 年 3 月 10 日的金华雷达回波强度大于 65 dBz 的占比超过 97.8%,方差变大,能量变小,相关性数值特大,系统提示产品文件回波异常,经核实是雷达故障所致。金华站一次运行故障分析如图 9 所示。

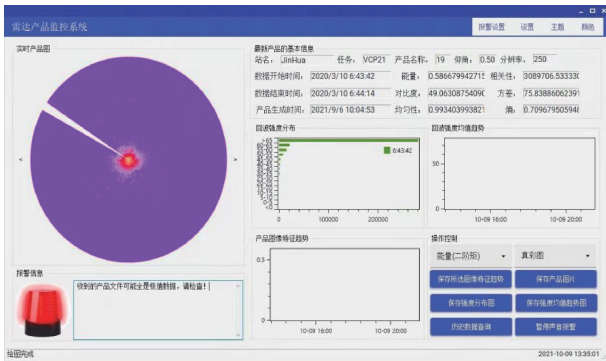


图9 金华雷达站一次故障运行分析

### 3.4 一次局地强对流分析

2020年3月10日,系统回波强度均值逐步上升,从整个实况产品比重来看回波面积小而分散,产品特征趋势缓慢下降,此次为宁波雷达站出现局地强对流。宁波雷达站一次局地强对流图像灰度特征如图10所示。

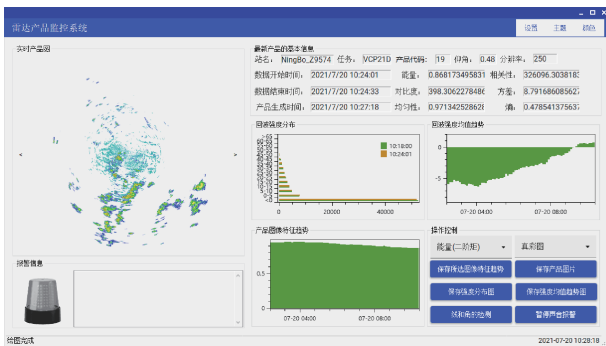


图10 宁波雷达站一次局地强对流灰度特征

## 4 结论

本文通过分析雷达实时产品数据,提出雷达产品特征分析方法,实现了基于图像处理技术对于雷达产品中异常回波的自动识别和监控预警系统。新一代天气雷达产品故障监测预警系统通过解析PUP产品,提取、分析、显示雷达回波特征信息,能够扩展PUP产品综合应用的广度和深度。系统实现了基于雷达产品数据对雷达产品异常回波的自动识别和监控预警功能。目前该系统已在浙江省气象局相关雷达站进行不间断运行,实现新一代天气雷达及实时高效地运行监控。由于试运行期间时间短且雷达运行稳定,更为准确的阈值指标需要大量的机器学习才能完成。

## 参考文献

- [1] 周红根,柴秀梅,胡帆,等. 新一代天气雷达回波异常情况分析[J]. 气象, 2008, 34(6): 112-115.
- [2] 赵瑞金,刘黎平,张进. 硬件故障导致雷达回波错误数据质量控制方法[J]. 应用气象学报, 2015, (5): 578-589.
- [3] 邵楠,裴翀,刘传才,等. 基于图像处理技术自动判别雷达异常产品[J]. 气象科技, 2013, 41(6): 993-997.
- [4] 赵瑞金,张进. 硬件故障导致的雷达异常回波数据特征分析[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(7): 77-82.
- [5] 安克武,贾木辛,陶雁州. CINRAD/CC型新一代天气雷达激励源故障分析[J]. 气象科技, 2012, 40(5): 713-718.
- [6] 刘昉,李奇临,蒋涌,等. 基于CNN的天气雷达异常回波图像识别算法研究[J]. 电子设计工程, 2021, 29(6): 74-78.
- [7] 吴少峰,敖振浪,肖柳斯,等. CINRAD雷达产品"缺角"现象分析及处理[J]. 气象科技, 2014, 42(5): 782-782.
- [8] 李翠翠,杨震,冯和平,等. CINRAD/CD雷达伺服系统频发故障判断与处理总结[J]. 贵州气象, 2019, 43(5): 75-77.
- [9] 巫乔,董根铭,朱永兵,等. 一次CINRAD/SAD雷达伺服系统故障的处理方法和原因分析[J]. 广东气象, 2019, 41(2): 63-65.
- [10] 赵瑞金,董保华,聂恩旺,等. 根据异常回波特征和报警信息判断雷达故障部位[J]. 气象, 2013, 39(5): 645-652.
- [11] 李明元,赵大清,张沪生,等. CINRAD/CD雷达方位伺服系统驱动电源故障分析及处理[J]. 气象科技, 2011, 39(1): 66-69.
- [12] 韩亚静,谷山青,张婷婷. CINRAD/SA雷达天线空间定位故障分析及处理方法[J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35(1): 71-75.
- [13] 梁海河,高玉春,刘黎平,等. 分布式开放型多普勒天气雷达产品系统设计[J]. 应用气象学报, 2006, 17(1): 113-118.
- [14] 潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等. CINRAD/SB雷达回波强度定标调校方法[J]. 应用气象学报, 2010, 21(6): 739-746.
- [15] 赵瑞金,董保华,聂恩旺,等. 根据异常回波特征和报警信息判断雷达故障部位[J]. 气象, 2013, 39(5): 645-652.
- [16] 谭学,刘黎平,范思睿. 新一代天气雷达海浪回波特征分析和识别方法研究[J]. 气象学报, 2013, 71(5): 962-975.
- [17] 李丰,刘黎平,王红艳,等. S波段多普勒天气雷达非降水气象回波识别[J]. 应用气象学报, 2012, 23(2): 147-158.
- [18] 许妙忠,余志惠. 高分辨率卫星影像中阴影的自动提取与处理[J]. 测绘信息与工程, 2003, 28(1): 20-22.
- [19] 余建华,杨林增,陈秋萍. 多普勒雷达定量测量武夷山降水软件设计[J]. 气象, 2006, 32(9): 95-98.
- [20] 毛飞,李建国,金龙,等. 新一代天气雷达远程视频监控保障系统设计及实现[J]. 气象科技, 2017, 45(1): 64-67.
- [21] 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.
- [22] 江源,刘黎平,王红艳,等. S波段多普勒天气雷达回波特征及其识别方法改进[J]. 应用气象学报, 2009, 20(2): 203-213.

- [23] 周枫,倪雷,刘朝林,等. CINRAD/CD型雷达伺服系统故障分析及处理[J]. 气象科技, 2009, 37(4):508-510.
- [24] 孟昭林,季承荔,郭志梅. 中国雷达强天气预警信息质量控制与集成应用[J]. 气象科技, 2017, 45(6):955-961.
- [25] 柴秀梅,潘新民,汤志亚,等. 新一代天气雷达回波强度异常分析与处理方法[J]. 气象, 2011, 37(3):379-384.
- [26] 赵瑞金,张进. 雷达故障和标校错误导致的异常回波分析[J]. 气象科技, 2014, 42(6):957-963.
- [27] 纪奎秀,郑伟,彭涛,等. 新一代天气雷达回波数据质量异常的故障分析和排除[J]. 气象水文海洋仪器, 2014, 31(4):117-119.

## Design and Implementation of Fault Identification and Monitoring and Early Warning System for New Generation Weather Radar Product

ZHANG Dongming<sup>1</sup> LU Xinglai<sup>1</sup> YANG Hao<sup>2</sup> Wang Han<sup>1</sup> LIU Zhuangfeng<sup>3</sup>

(1 Zhejiang Atmospheric Sounding Technology Support Center, Hangzhou 310000; 2 Ningbo Meteorological Network and Equipment Support Center, Zhejiang, Ningbo 315000; 3 Zhoushan Meteorological Network and Equipment Support Center, Zhejiang, Zhoushan 316000)

**Abstract:** The fault of the new generation of weather radar directly affects the data quality. The generation of abnormal products has a great impact on the short-time approaching forecast and early warning. It is of certain practical significance to realize the real-time monitoring of radar abnormal products. This system uses the WinForm three-layer architecture and ORM model architecture through statistical texture analysis, grey image feature value analysis and other image processing technology to realize automatic recognition of radar abnormal products. The new generation of weather radar product fault monitoring and warning system can detect abnormal radar products in real-time, efficiently and accurately, and meet the functional requirements of severe convection weather warning and monitoring, weather radar fault warning service prediction, weather radar product availability service, and identify abnormal echoes from the data of a single radar product. It is of great significance for the quality control of weather radar networking products to avoid further influencing the multi-radar networking puzzle.

**Keywords:** radar product data; image processing technology; real-time early warning system; abnormal echo detection