



人工影响天气自动预警关键问题

摘要

通过对多普勒雷达 PUP 资料(回波顶高 ET、回波反射率因子 R19、液态水含量 VIL)实时分析,编程实现了 ArcGIS 中 Identify 工具,完成雷达栅格图层(Raster)数组值索引.提出预警半径 r 、预警区域附角 θ 的概念,给出监测点抽样算法、方位角算法、 (θ, α) 点元筛选算法,并运用 C# 对各算法进行了实现.在 Visual Studio2008 开发环境下,实现了基于 .NET 的自动预警系统原型,可实时生成各作业点作业参数,为人工影响天气作业智能化提供必要理论及技术支持.

关键词

自动预警;多普勒雷达;人工影响天气

中图分类号 TP391

文献标志码 A

收稿日期 2012-07-17

资助项目 江苏省人工影响天气作业实时智能指挥系统项目(20100017)

作者简介

尚金龙,男,硕士生,研究领域为气象信息处理和系统分析集成.std_nuist@163.com

杜景林(通信作者),男,博士,副教授,主要研究领域为计算机软件和气象传感网技术.jldu@nuist.edu.cn

0 引言

自动预警是指通过对多普勒雷达资料及探空资料的综合分析,对设定作业点监测半径区域 r 内相关雷达资料数据进行有序、实时跟踪监测,当回波顶高(ET)、回波反射率因子(R19)、液态水含量(VIL)资料对应栅格图层,监测区域格点属性值依次超过历史经验阈值时(各阈值人工可调),系统将自动发出作业预警信息,并根据实际情况,生成相应的作业参数,包括作业点信息、作业方位角、发射仰角、火箭弹用量等.

1 多普勒雷达 PUB 资料介绍

1.1 栅格(Raster)图层

GIS 栅格(Raster)图层,是由雷达资料通过特定算法得到的,它实际上就是按照经纬度地理信息要素有序排列的正方形格点^[1].在 GIS 栅格图形展示过程中,将不同的属性值转换成对应的色带,不同的数值段对应不同的 RGB 色彩,经过标准化色带与数据级的对应关系,可通过色彩观察获取气象信息.不同的雷达产品监测数据级别与色带对应关系不尽相同^[2],但所有雷达产品都是基于雷达基数据,通过相应的算法生成的.雷达基数据最高分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,通过基数据衍生出的各类雷达产品可能具有不同的分辨率,且最大分辨率,即栅格图层各正方形格点面积精度最高为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$.

1.2 自动预警相关雷达产品

自动预警主要阈值包括回波反射率因子(R19)、回波顶高(ET)、液态水含量(VIL)3种雷达产品.下面对以上3种产品作简要介绍.

1) 反射率因子(R19).最高显示分辨率为 1 km ,这是指波束宽度为 1° ,分辨距离为 1 km 大气的体积.对来自4个相接的距离库(分辨率为 250 m)的回波功率取平均,生成相应的数据,然后将平局功率通过 RDA 转换成 dBz^[3].

2) 回波顶(ET).回波顶(ET)是16个数据级别的产品,它是在 $\geq 18 \text{ dBz}$ (可调阈值)的反射率因子被探测到时,显示以最高仰角为基础的回波顶高度(不进行内插和外插),分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ ^[4].

3) 垂直累积液态水(VIL).垂直累积液态水,表示将反射率因子数据转换成等价的液态水值,它用的是假设所有反射率因子返回都是由液态水滴引起的经验导出关系.在雷达的 230 km 半径内,对每一

¹ 南京信息工程大学 电子与信息工程学院,南京,210044

个仰角,在每个 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$ 格点上求液态水混合比的导出值,然后再垂直累加^[5].

2 相关概念提出

2.1 监控半径 r

监控的实质就是对设定作业点对应的各雷达资料进行有序的属性值查询,如相关资料满足历史阈值(人工可控)则发出预警.由于分辨率等问题,在实际监测中,当某作业点地理位置位于图 1 中白色格点(白色格点特指数值缺省)内部接近边沿时,将造成漏警.但实际上,该点周围存在丰富的格点数据资料,有极大的概率出现满足作业条件的情况发生.出现上述问题的原因主要是雷达数据缺省和资料分辨率精度低.通常来讲,精度越差,出现漏警的可能性越高.

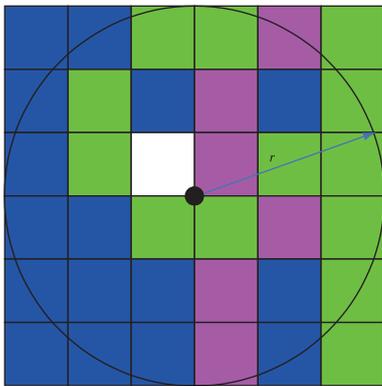


图 1 监测半径 r 示例

Fig. 1 Monitoring area radius r

为解决上述问题,为提高监测结果准确性、科学性,提出监控半径 r 概念.如图 1 所示,假设某作业点位于栅格图层中心,以作业点为圆心,半径为 r 作圆,则可以通过对圆内各格点进行属性值统计,以此来取代单目标点监测^[6].通过 r 值的选定,结合实际作业设备,从理论上将漏警概率降低到 0.通过监测半径的引入,可以实现 r 范围内,雷达产品属性值多重运算手段,如平均属性值、最大属性值、越阈值格点百分比,这大大提高了预警体系的科学性,并且通过数字化处理,业务人员可以从多角度分析实时天气系统现状,并提出准确、科学的人工影响天气作业方案.

2.2 点元素索引抽样方式

Identify 工具提供了栅格点元素索引属性值的方式,故在确定监测半径的情况下,必须对 r 范围内的格点进行点元素抽样,由于最高分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$,所以本文采取的点抽样方式最高精度为 1 km ,如图 2 所示(每个格点分辨率为 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$),每个

格点包含 $4\times(1/2)+4\times(1/4)+1=4$ 个抽样点.

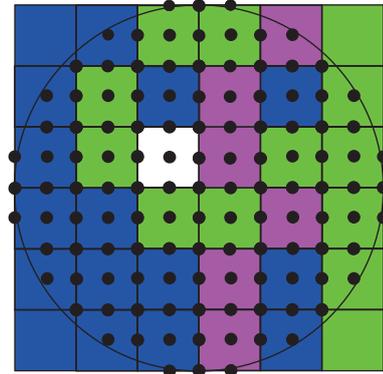


图 2 格点点元素抽样

Fig. 2 Grid points sampling

考虑到不同雷达产品生产的 GIS 栅格图层精度存在差异性,为了综合抽样的合理性以及抽样点元素最佳的原则,通过将每个格点抽样出 4 个采样点元素的方式来提取格点对应的栅格属性值(对于 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的只提取 1 个采样点),即 R19 产品(精度为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$)采取 1 km 点元抽样,ET、VIL 产品(精度为 $4\text{ km}\times 4\text{ km}$)均采用 2 km 点元抽样.

2.3 监测区域附角 θ

为提升人工影响天气作业效果,充分发挥高炮、火箭弹等装备经济效益,在实施作业期间需实时观测卫星云图变化趋势,在人工降雨、人工消雨等常见业务发射火箭弹时,必须尽量满足发射方位角与风向平行,且火箭运行方向在地平面的投影为逆风方向.火箭弹播散碘化银 (AgI) 等催化剂时,借助风的迎面流动,可增加接触面,最大限度发挥催化剂效能.对于已经向作业点远离的云层,根据实际的风速等因素,实施作业的价值较小^[7-8],因此可以减少作业点下行方向区域抽样点的数量.

如上所述,对作业点监测区域 r 内,如图 3 所示,本文提出监测区域附角 θ 概念.图 3 中白色直径方向与实时风向在地平面的投影垂直, θ 角所在的区域相对于作业点处于下行风向.在实际情况下,只要监测如图 3 所示的抽样点格点属性值. $\theta \in [0^\circ, 90^\circ]$,可根据风速以及实时天气系统情况调整角度.通过该方式,不仅可以提升作业效果,还在一定程度上减低了抽样点数目,有效地减少了格点属性值查询次数,使得算法在时间复杂度上有所降低.

取正北方向作为参考方向,即方位角 0° ,且方位角随顺时针逐渐增加,取值范围为 $[0^\circ, 360^\circ)$,规定

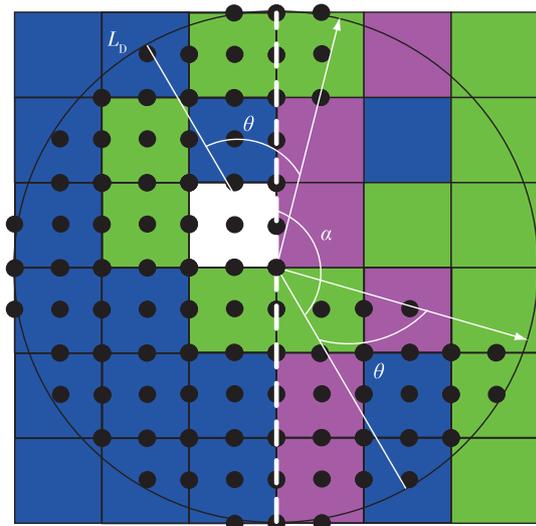


图3 监测附角 θ

Fig. 3 Warning region attached angle θ

α 为直线 L_0 右半部分与垂直方向的夹角,且 $\alpha \in [0^\circ, 180^\circ)$. 通过方位角 α 与 θ , 即 (α, θ) 唯一, 就可以确定作业点 r 区域监测抽样点情况.

3 关键环节系统实现

3.1 抽样点值索引算法及实现

本节主要分析自动预警理论在计算机相关技术上的可行性, 以及在关键环节上的系统解决方案. 由前文可知, 解决预警的首要问题就是索引相关栅格格点属性值, 对这些值的索引问题, 最终转换为抽样点的提取问题, 如图 4 所示. 下面, 具体分析图 4 中的转化过程.

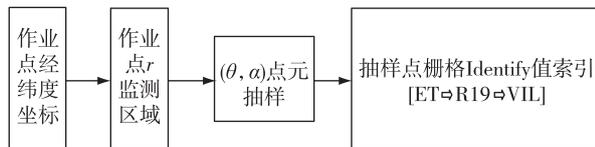


图4 栅格格点属性值索引步骤

Fig. 4 Steps of raster point attribute value indexing

1) 作业点坐标 \rightarrow 监测区域 r

$(X-2\Delta x, Y+2\Delta y)$	$(X-\Delta x, Y+2\Delta y)$	$(X, Y+2\Delta y)$	$(X+\Delta x, Y+2\Delta y)$	$(X+2\Delta x, Y+2\Delta y)$
$(X-2\Delta x, Y+\Delta y)$	$(X-\Delta x, Y+\Delta y)$	$(X, Y+\Delta y)$	$(X+\Delta x, Y+\Delta y)$	$(X+2\Delta x, Y+\Delta y)$
$(X-2\Delta x, Y)$	$(X-\Delta x, Y)$	(X, Y)	$(X+\Delta x, Y)$	$(X+2\Delta x, Y)$
$(X-2\Delta x, Y-\Delta y)$	$(X-\Delta x, Y-\Delta y)$	$(X, Y-\Delta y)$	$(X+\Delta x, Y-\Delta y)$	$(X+2\Delta x, Y-\Delta y)$
$(X-2\Delta x, Y-2\Delta y)$	$(X-\Delta x, Y-2\Delta y)$	$(X, Y-2\Delta y)$	$(X+\Delta x, Y-2\Delta y)$	$(X+2\Delta x, Y-2\Delta y)$

图5 北半球经纬度变化规律

Fig. 5 Variation of northern hemisphere latitude and longitude

① r 的取值范围

r 值为 unsigned int 型整数, 在实际的作业中, 人工影响天气装备 (包括高炮、各类火箭弹等) 发射射程有限, 大多数在 5 km 左右, 故在一般情况下, 取 $r \in [5, 10]$. r 值太小, 导致抽样点元素太少, 往往会降低生成的相关预警作业参数准确性, 反之, 由于抽样点元素数量 $N \propto r^2$, 抽样点元素太多, 会大大降低预警系统的执行效率, 带来不必要的系统开销, 并且以降低效率及增加资源开销等代价, 无法带来预警效果优化的结果.

② 点元抽样方式

在地理信息图层中, 以地球经纬度唯一标定物体的实际位置, 在 ArcGIS 地理图层坐标系中, 一个实点可用 (X, Y) 二维序列唯一表达, 其中 X 为经度, Y 为纬度. 我国处于北半球, 经纬度变化规律如图 5 所示. 图 5 中每一个坐标点代表其对应的实际物理地址, 按照地理方位规定, 中心点 (X, Y) 可描述为作业点, $\Delta x, \Delta y$ 为经纬度正偏移量, 当对 $\Delta x, \Delta y$ 选取适当的值时, 就可以使 (X, Y) 与 $(X, Y + \Delta y)$ 及 $(X - \Delta x, Y)$ 之间的距离为特定值, 保证了点抽样间隔, 点元素与点元素满足特定精度, 这是对栅格格点进行抽样的理论基础.

通过对经纬度变化规律的描述, 将地球近似看作正圆球体 (本文一律采用该假设), 通过 ArgGIS 提供的 IPoint 类接口, 运用 .NET 泛型数组 List<> 机制, 封装出生成特定抽样模式的点元素集合. 描述如下:

```
private List<IPoint> pointCollection ( IPoint point, int r, int accuracy );
```

// point 为需要抽样作业点的经纬度, point.X 记录经度, point.Y 记录纬度

// r 为 point 作业点监测半径

// accuracy 为抽样精确度, 最高为 1 km \times 1 km.

具体实现算法如下:

第 1 步, 经纬度角度偏移量与长度单位转换

采取 1 km 精度对应的经纬度偏移量 $\Delta x, \Delta y$ 角度方案. 经线与纬线存在差异性, 主要表现在 1° 经线上, 对应的距离为 $2\pi R_{\text{地球}} \times (1/360)$, 因此 1 km 对应

的角度为 $1/[2\pi R_{\text{地球}} \times (1/360)]$; 对于纬度而言, 1° 的纬线偏移量对应的距离与纬度 θ 值本身有关, 对应的距离为 $2\pi R_{\text{地球}} \times (1/360) \times \cos \theta$, 即在 θ 纬度线上, 1 km 对应的纬度角度为 $1/[2\pi R_{\text{地球}} \times (1/360) \cos \theta]$.

第 2 步, 抽样点 IPoint 泛型数组生成

以经纬度角度偏移量与长度单位转换关系为基础, 将经度与纬度二维组合后, 运用 ArcGIS 中的 IPoint 及泛型数组 List<IPoint>, 对作业点进行监测点元抽样.

2) 监测区域 $r \rightarrow (\theta, \alpha)$ 点元筛选

① 方位角坐标系

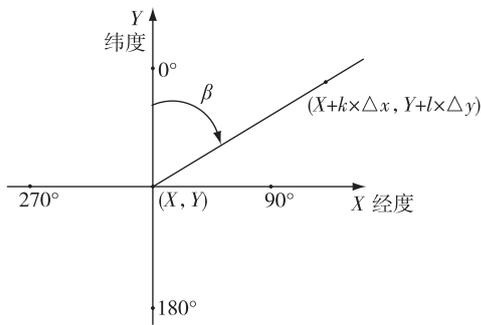


图 6 方位角坐标系

Fig. 6 Azimuth coordinate system

如图 6 所示, 以参考点 (X, Y) 为原点, 作直角坐标系, 存在目标点 $(X+k \times \Delta x, Y+l \times \Delta y)$, 其中 $k, l \in \mathbf{N}$, 则定义目标点相对于参考点的方位角为 β , 且 $\beta \in [0^\circ, 360^\circ)$, 并随顺时针方向逐渐增加. β 与 k, l 的数量关系如式(1)所示.

② (θ, α) 点元筛选方式

由方位角的定义, 对任意作业点监测半径 r 内抽样点进行 (θ, α) 筛选, 只需要给出监测时刻的风向, 则以过作业点 (X, Y) 且垂直于风向的直线(即为 α 及 $\pi+\alpha$)与监测附角 θ 组合, 即可对 r 范围内所有的抽样点进行二次筛选.

$$\beta = \begin{cases} 0, & k = 0, l \geq 0, \\ 0.5\pi, & k > 0, l = 0, \\ \pi, & k = 0, l < 0, \\ 1.5\pi, & k < 0, l = 0, \\ \arctan(l/k), & k > 0, l > 0, \\ \pi + \arctan(l/k), & l < 0, \\ 2\pi + \arctan(l/k), & k < 0, l > 0. \end{cases} \quad (1)$$

3) (θ, α) 点元筛选 \rightarrow 栅格格点 Identify 值索引

GIS 栅格图层中各格点的属性值, 可通过 Arc-Map9.x 系列或更高版本提供的 Identify 工具实现. 图

7 为栅格图层在 ArcGIS 中通过 Identify 工具操作界面, 通过左击 Identify 便可出现 Identify 表单, 实现相关参量值的索引.

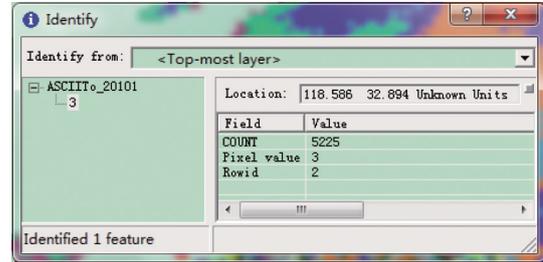


图 7 Identify 工具操作界面

Fig. 7 Operation interface of Identify tool

从图 7 中可以看到, Identify 工具提供一个数据集, 如表 1 所示. COUNT 指指定栅格图层中包含 Pixel value = 3 的栅格点的个数; Pixel 指 Location 为 (118.586, 32.894) 处栅格点的值, 该值与实际地理位置处的某气候指标相关, 比如回波反射率、液态水含量等, Pixel value 的值通过统一色带对照表, 转换成对应产品的实际值^[9].

表 1 栅格索引数据集

Table 1 Dataset of grid index

参数	数值
COUNT	5 225
Pixel	3
Rowid	2

运用 ArcEngine9.x 提供的 GIS 二次开发接口, 在 .Net 环境下实现栅格数据点索引. 在实际预警过程中, 本文只关注 Pixel value 值, 该值与图 8 中 ASCIITo_20101 树形结构分支中的数值相等, 因此在实际的编码中, 考虑到内存的开销以及工作效率, 可以通过读取 ASCIITo_20101 树形结构分支中的数值手段代替读取数据表集合, 以此来实现编码高效、便捷的目的.

按照以上需求, 来确定算法细节. 该算法的输入为: AxMapControl(栅格图层所在的地图元素), MapLayer(栅格图层在 AxMapControl 中所处的层数, 为 unsigned int 类型值), 索引坐标点结, 考虑到与上层代码的融合以及效率因素, 点结选用 List 泛型数组, 即 List<IPoint> RasterPointCollection, 其中 IPoint 类型为 ESRI.ArcGIS.Geometry.IPoint. 算法的输出为 unsigned int 型值.

函数原型为: private int RasteData(AxMapControl axMapcontrol, int MapLayer, List < IPoint > RastePoint-Collection).

3.2 多重阈值预警分析

自动预警主要包括3个环节:探空资料分析、综合阈值分析以及预警结果输出。

1) 探空资料分析

在预警过程中,本文只关注探空资料0~-10℃层数据.在0~-10℃高空中,空气中云层水滴与冰晶含量较高,催化剂可以最大限度地发挥其效能,在该层实施人工影响天气作业可以达到最佳作业效果.该部分数据和回波顶高有关.

2) 综合阈值分析

阈值参数设置界面如图8所示.初始预设值均为0,人工影响天气专员可以根据历史经验值,或者其他一些规则对预警参数进行设置.各相关阈值,用于与对应的雷达资料对比,判断作业潜势,并在满足条件时,发出预警信息^[10].系统预警流程如图9所示.

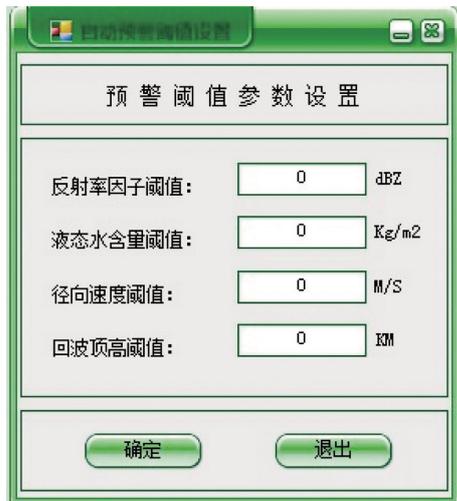


图8 阈值设置系统界面

Fig. 8 Threshold setting system interface

3) 预警结果展现方式

当出现满足阈值条件的情况时,预警结果必须直观地展现给业务人员,以便后续作业安排.如表2所示,当系统发现有满足作业条件的情况时,通过对

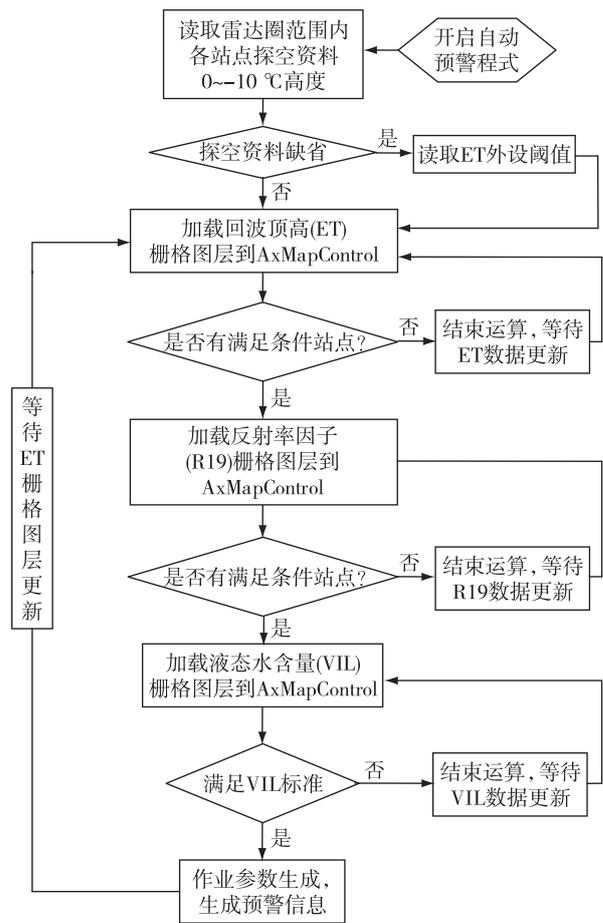


图9 自动预警处理流程

Fig. 9 Automatic warning process flow

作业点半径 r 内区域的监控结果,可以计算出 r 内最大回波值、火箭弹发射方位角、发射仰角、火箭弹枚数以及参数生成时间等基本预警信息。

4 结论

本文重点阐述了人工影响天气自动预警体系预警流程、预警方式、预警结果展现形式等相关问题.对监测作业点区域点元素抽样及筛选策略等关键问题进行了剖析,并从理论上将漏警概率降低到0.运用.Net 在 Visual Studio 2008 开发环境中,结合 ArcGIS 二次开发技术、多普勒雷达资料处理、探空资料处理、栅格(Raster)图层处理等关键技术点,对提

表2 预警结果作业参数列表

Table 2 Operation result of warning system

作业点编号	作业点名	半径内最大回波/dBZ	越回波阈值百分比/%	发射方位角/(°)	发射仰角/(°)	火箭弹/枚	参数生成时间
32010002	南京	45	87.7	50	46	3~4	2012/6/30 21:53:59

出的各解决方案进行了系统实现,并通过真实雷达资料对系统原型进行了预警效果试验,运行结果验证了各相关理论与计算机技术结合的可行性.系统表现出的实时性完全满足人工影响天气业务需求,提升了人工影响天气业务服务水平.

参考文献

References

- [1] 袁渊,李沁.信息栅格技术浅析[J].科技创新与应用, 2012(15):55
YUAN Yuan, LI Qin. The research of information grid technology[J]. Technology Innovation and Application, 2012(15):55
- [2] 冯连好,单湛波,陈振宇.地形图栅格化批量处理的实现与应用[J].测绘与空间地理信息, 2012, 35(3): 215-216
FENG Lianhao, SHAN Zhanbo, CHEN Zhenyu. Implementation and application of batch processing in topographic map raster[J]. Geometrics & Spatial Information Technology, 2012, 35(3): 215-216
- [3] 安英玉,任丽,赵广娜,等.雷达产品算法及其在预报中的应用[J].黑龙江气象, 2007(3):42-44
AN Yingyu, REN Li, ZHAO Guangna, et al. The application of Radar and Radar's product algorithm in weather forecasting[J]. Heilongjiang Meteorology, 2007(3):42-44
- [4] 宋斌.山东省西部夏季冰雹云宏观结构的数值模拟[D].南京:南京信息工程大学大气科学学院, 2007
SONG Bin. Numerical simulation of macroscopical features of hail-cloud in west Shandong province in summer[D]. Nanjing: School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, 2007
- [5] 俞小鼎,姚秀萍,熊延南,等.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社, 2006:182-183
YU Xiaoding, YAO Xiuping, XIONG Yannan, et al. Theory of Doppler weather radar and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006:182-183
- [6] 杨维军,张东风.火箭、高炮作业指挥盘的研制及应用[J].应用气象学报, 2010, 12(增刊1):206-207
YANG Weijun, ZHANG Dongfeng. Development and application of rockets, anti-aircraft artillery operation command disk[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2010, 12(sup1):206-207
- [7] 张中波,仇财兴,唐林.多普勒天气雷达产品在人工增雨效果检验中的应用[J].气象科技, 2011, 39(6): 703-708
ZHANG Zhongbo, QIU Caixing, TANG Lin. Application of Doppler weather Radar to effectiveness evaluation of precipitation enhancement[J]. Meteorological Science and Technology, 2011, 39(6):703-708
- [8] 陈连友,曹建新,居丽玲.人工增雨作业技术[J].现代农业科学, 2010(3):304-306
CHEN Lianyou, CAO Jianxin, JU Liling. Artificial precipitation operation technology[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010(3):304-306
- [9] 谭振.台风雷达三维组网产品显示技术研究[D].南京:南京信息工程大学大气科学学院, 2011
TANG Zhen. Research of the typhoon and CINRAD 3D mosaic products display technology[D]. Nanjing: School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, 2011
- [10] 肖艳姣,刘黎平.三维雷达反射率资料用于层状云和对流云的识别研究[J].大气科学, 2007, 31(4): 645-654
XIAO Yanjiao, LIU Liping. Identification of stratiform and convective cloud using 3D Radar reflectivity data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(4): 645-654

Research on key issues in weather modification automatic warning system

SHANG Jinlong¹ DU Jinglin¹

¹ School of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Through the real-time analysis of Doppler radar PUP data, including Echo Tops (ET), Radar Reflectivity (R19), and Vertically Integrated Liquid (VIL) water content, ArcGIS Identify tool is programmed, which will get data collection from raster feature generated by radar data. We propose the concepts of warning radius and warning region attached angle θ , design monitoring point sampling algorithm, azimuth algorithm, (θ, α) point selection algorithm and identify algorithm, furthermore, complete the simulations of each algorithm based on C#. Finally, the automatic warning system prototype was accomplished in Visual Studio 2008, which can generate real-time operating parameters of each operating point. The research provides necessary theoretical and technical support for intelligent operation of weather modification.

Key words automatic warning; Doppler radar; weather modification