

张林, 杨洪平, 邓鑫, 等. 2014. 基于模板匹配法的长乐雷达强超折射回波识别. 气象, 40(3): 364-372.

基于模板匹配法的长乐雷达强超折射回波识别^{*1}

张 林¹ 杨洪平¹ 邓 鑫² 胡学英¹ 都二斌³

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 国家气象信息中心, 北京 100081

3 北京科技大学, 北京 100083

提 要: 我国有许多新一代天气雷达架设在高山上, 由于海拔高度较高, 加上地球曲率的影响, 在使用 VCP11/VCP21 模式探测时, 造成较大的探测盲区, 对低层降水回波的探测能力严重不足。长乐新一代天气雷达经过调整观测模式后, 采用负仰角扫描有利于中小尺度灾害性天气系统的监测和预警, 但同时会带来地物回波增强、海浪回波及超折射等负面效应。基于此, 通过大量个例统计并分析长乐雷达在特定大气条件下的强超折射回波特征, 借助模式识别理论提出了一个新方法“模板匹配法”识别强超折射回波。利用大量强超折射回波数据的检验和分析, 结果表明该方法能够在不影响负仰角扫描模式下有效滤除长乐雷达的强超折射回波。目前该方法正在试运行, 即将应用到中国新一代天气雷达建设业务软件系统开发 ROSE 项目中。

关键词: 高山雷达, 强超折射回波, 模板匹配

中图分类号: P412

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.03.012

One Method Based on Template Matching to Remove Strong Anomalous Propagation Echo at Changle Site

ZHANG Lin¹ YANG Hongping¹ DENG Xin² HU Xueying¹ DU Erbin³

1 Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081

2 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

3 University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

Abstract: In China, there are several weather radars built in high mountains. Due to the high altitude and the curvature of earth, low level observation is limited if the conventional volume scan strategies (VCP12/VCP22) are adopted. At Changle Site, new volume scan strategies which adopt 0° or negative elevation angles bring lots of benefits for monitoring and warning severe weather, but also increase the chance of disadvantages, such as ground clutter, wave clutter, anomalous propagation (AP) and so on. This paper discusses the characteristics of strong AP clutter at Changle Site, introducing a method based on template matching to remove it. The method does not have any impact on new volume scan strategies, but can remove the strong AP effectively. Now the method is running in test, and to be used in the Radar Operational Software Engineering (ROSE).

Key words: mountainous radar, strong anomalous propagation echo, template matching

* 中国气象局气象探测中心青年基金项目“强超折射回波识别方法研究”资助

2012 年 10 月 5 日收稿; 2013 年 5 月 23 日收修定稿

第一作者: 张林, 研究方向: 天气雷达及风廓线雷达资料应用. Email: zhanglin1834@163.com

引言

我国 CINRAD/SA 新一代天气雷达采用的是美国 WSR-88D 天气雷达的观测模式,最低观测仰角为 0.5° (李柏等, 2013), 该观测模式适合于平原地区的雷达, 而我国地形比较复杂, 山区较多、丘陵地区大, 不少新一代天气雷达架设在高山顶上, 当高山顶上雷达采用最低仰角为 0.5° 模式观测时, 在距离雷达 200 km 处, 波束中心海拔高度已经超过了 4 km, 低层降水回波的探测能力远远不足, 进而导致雷达定量估测降水值偏低。

针对高山雷达低空探测能力不足的问题, 有不少学者提出了负仰角观测模式。美国强风暴实验室 Brown 等(2002)和 Vincent 等(2003)根据现在使用的 WSR-88D 天气雷达体扫模式, 对位于蒙大纳州、密苏拉市附近一座高山上的 KMSL 多普勒雷达通过负仰角模拟不同天气的探测效果, 对比 $+0.5^\circ$ 与 -0.8° 仰角的探测情况, 结果表明: 当采用最低 $+0.5^\circ$ 仰角扫描时, 在雷达附近估测雨强约为 80%, 距雷达 220 km 外仅有 1%; 但当采用最低 -0.8° 仰角扫描时, 远距离 220 km 外估测雨强仍可达 80%~95%。负仰角扫描能明显提高低对流层天气系统的探测能力, 如辐合/辐散场、下击暴流、阵风锋等, 提高定量估测降水准确率和台风、暴雨等灾害性天气的远距离监测、预警能力(刘晓阳等, 2010; 王德胜等, 2012; 钟敏等, 2012; 张亚萍等, 2013; 庄薇等, 2013)。张沛源等(2009)指出为了对近地面层进行探测, 进行零度或负仰角扫描是必要的, 但由于地球曲率的影响, 需要考虑遮挡问题。徐八林等(2008)研究认为: 负仰角扫描能明显提高雷达远距离回波探测效果, 可弥补常规业务扫描模式下高山雷达探测低层回波能力不足的问题, 对文山雷达一次冰雹过程探测分析, 认为负仰角扫描对强对流天气能获得较好的低层探测效果。

关于地物回波的识别, 各种研究成果均表明模糊逻辑法具有较好的识别效果。目前逐步将该方法推向实际业务中。该方法原理是从雷达资料中提取用于区分不同雷达回波(如降水、地物)的物理量, 然后根据降水、地物回波的特征设置隶属函数, 对这些物理量模糊化处理, 得到所有物理量对于不同类型回波的 0~1 取值范围的判据, 对这些判据进行加权累加, 当某点地物回波的判据超过事先给定的阈值

时, 该点就被识别为地物回波。刘黎平等(2007)在这方面做了大量的工作, 开展用新一代天气雷达体扫资料基于模糊逻辑的分布式超折射地物回波识别, 江源等(2009)运用 CSI(critical success index)评判标准确定了模糊逻辑超折射地物回波识别的最佳线性梯形隶属函数, 通过识别效果分析表明改进后的方法可以更好地识别地物/超折射回波, 减少对降水回波的误判。

2011年, 经过中国气象局批准, 福建省气象局组织长乐新一代天气雷达开展负仰角观测模式试验, 结果证明了上述问题, 负仰角扫描模式的确提高了中尺度对流性天气系统的探测能力, 有利于监测台湾海峡的台风天气过程(张扬成, 2012)。但是长期的业务运行发现, 负仰角扫描模式同时又带来了一些问题, 诸如在特定大气条件下台湾岛反射回来的超折射回波, 该超折射回波轮廓与台湾地形非常一致, 大量统计结果表明该超折射回波强度值高, 垂直梯度小, 采用模糊逻辑法不能较好地识别。因此需要根据回波特征设计新的方法给予解决, 基于此, 本文借助模式识别理论提出一种新的方法, 即模板匹配法, 根据该超折射回波与台湾地形相一致的特征, 设计模板对负仰角扫描模式下带来超折射回波给予滤除, 以至于不会对负仰角在业务上的使用造成实质性影响。

1 长乐雷达负仰角观测模式

长乐雷达继续保留使用 VCP11、VCP21 两种降水观测模式, 同时增加 VCP12 和 VCP22(分别由 VCP11 和 VCP21 改进而得)两种降水模式, 调整后的降水观测模式增加到 4 种。VCP12 模式共 18 个仰角, VCP22 模式共 9 个仰角(表 1)。对 VCP12 模式, 低层 5 个仰角即 -0.5° 、 0° 、 0.49° 、 0.99° 、 1.48° 采用分离取样方式 CS/CD, 中间的 7 个仰角即 1.97° 、 2.48° 、 3.05° 、 3.70° 、 4.46° 、 5.35° 、 6.41° 采用交替扫描方式 B, 高层的 6 个仰角即 7.63° 、 9.08° 、 10.79° 、 12.75° 、 15.21° 、 18.34° 采用不考虑距离折叠的连续多普勒方式 CDX; 对 VCP22 模式, 低层 4 个仰角即 -0.3° 、 0° 、 0.49° 、 1.45° 采用分离取样方式 CS/CD, 中间的 3 个仰角即 2.40° 、 3.35° 、 4.30° 采用交替扫描方式 B, 高层的 2 个仰角即 6.0° 、 9.9° 采用不考虑距离折叠的连续多普勒方式 CDX。

图 1 为长乐雷达在 VCP21 和 VCP22 模式下雷

达电磁波射线传播路径的模拟仿真,从图中可以看出:在 VCP21 模式下,200 km 以外低空探测能力受到很大的限制,但当采用 VCP22 模式时,0° 和 -0.3° 仰角扫描弥补了远距离处低层降水回波的探

测,有助于提高中尺度天气系统的监测能力,特别是当沿海台风进入雷达探测范围时,采用 VCP22 模式更有利于监测和预警信息的提前发布。

表 1 长乐雷达改进扫描方式对照表

Table 1 Comparison of VCP11 (VCP12) and VCP21 (VCP22) in Changle radar site

VCP11		VCP12		VCP21		VCP22	
仰角	扫描方式	仰角	扫描方式	仰角	扫描方式	仰角	扫描方式
0.5	CS/CD	-0.5		0.5	CS/CD	-0.3	
1.45		0		1.45		0	CS/CD
2.4		0.49	CS/CD	2.4		0.49	
2.4		0.99		3.35	B	1.45	
3.35		1.48		4.3		2.4	
4.3	B	1.97		6		3.35	B
5.25		2.48		9.9		4.3	
6.2		3.05		14.6	CDX	6	CDX
7.5		3.7	B	19.5		9.9	
8.7		4.46					
10		5.35					
12	CDX	6.41					
14		7.63					
16.7		9.08					
19.5		10.79					
		12.75	CDX				
		15.21					
		18.34					

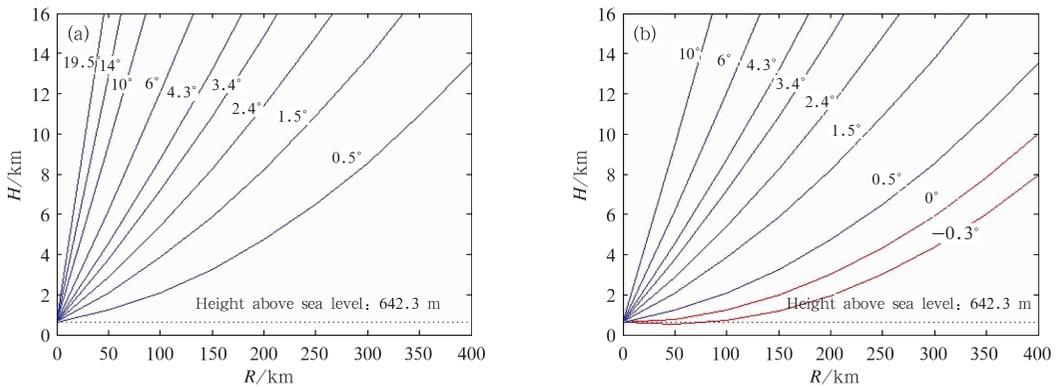


图 1 长乐雷达 VCP21/VCP22 模式下电磁波射线传播路径

(a) VCP21, (b) VCP22

Fig. 1 The ray paths for VCP21/VCP22 in Changle radar site

(a) VCP21, (b) VCP22

2 雷达电磁波传播特征

如图 2 所示, A 点处的曲率 k 计算公式:

$$k = -\frac{\cos\alpha}{n} \frac{dn}{dz} \quad (1)$$

式中, α 为波束与地面的夹角, n 为大气折射指数。从中可以看出,如果大气为均有介质, $dn/dz=0$, 不管仰角如何变化,雷达射线都是直线;当雷达垂直发射时(即 $\alpha=90^\circ$),不管折射指数如何变化, $k=0$, 雷达射线总保持为垂直向上直线传播;除这两种情况之外,雷达射线的曲率均不为零,射线都会发生弯

曲,曲率大小与射线的仰角和折射指数梯度的大小有关。

图 3 给出了雷达射线传播路径示意图,分为三种情况:(1) 如果实际大气折射处于零折射和临界折射之间, $dn/dz > -1/R_e$, 仰角将随探测距离的增加而变大,高度随传播距离的增加而变高;(2) 如果实际大气折射为临界折射状态, $dn/dz = -1/R_e$, 仰角始终不变, $\alpha_0 > 0$ 时,高度随探测距离的增加而变高; $\alpha_0 = 0$ 时雷达射线与地表平行,高度不变;(3) 如

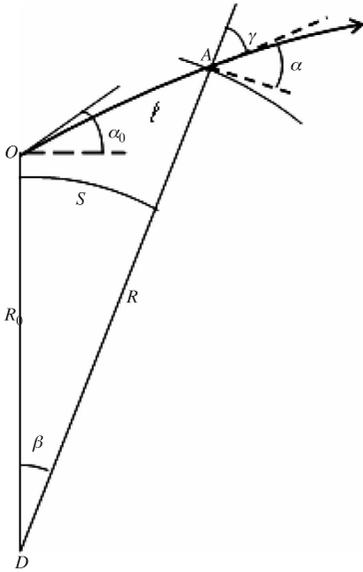


图 2 球面分层大气中雷达射线示意图
Fig. 2 Ray path in spherical layered atmosphere

果实际大气中出现超折射, $dn/dz < -1/R_e$, 仰角将随探测距离增加而变小,并在等于零之后继续下降至负值。在仰角变为零之前,射线高度随探测距离的增加而变高,仰角变为负值后,射线高度随探测距离的增加而变低。 dn/dz 绝对值越大,曲率 k 越大,超折射越严重,雷达射线触及地表,导致异常传播(俞小鼎等,2006;张培昌等,2005)。

大气折射指数与气压、温度、湿度的变化关系式如式(2)所示,大气折射指数随高度的变化公式如式(3)所示:

$$n = \left[\frac{77.6}{T} P_d + \frac{77.6}{T} \left(1 + \frac{4810}{T} \right) e \right] \times 10^{-6} + 1$$
$$N = (n - 1) \times 10^6 \tag{2}$$

$$\frac{dN}{dZ} = \frac{\partial N}{\partial T} \frac{dT}{dZ} + \frac{\partial N}{\partial p_d} \frac{dp_d}{dZ} + \frac{\partial N}{\partial e} \frac{de}{dZ} \tag{3}$$

从式(3)推导可得,当大气处于逆温或逆湿状态时 ($dT/dZ > 0, de/dZ > 0$),由于 $\partial N/\partial T < 0$ 和 $\partial N/\partial e < 0$,则 dN/dZ 为负值且绝对值较大,容易出现超折射现象。

逆温越明显, dN/dZ 为越小 (dN/dZ 为负值,绝对值越大),曲率 k 越大,超折射越严重;高层湿度增加但没有形成降水,对射线影响不如温度明显。

3 长乐雷达强超折射回波特征

图 4 为 2011 年 4 月 16 日北京时 07:31:56 长乐雷达采用 VCP22 体扫模式下 4 个低仰角反射率因子回波图,由图可知,在雷达东北方向 100~300 km 范围内,探测到对流性降水回波,与 0.5°和 1.5°的仰角探测对比,-0.3°和 0°仰角所探测到降水回波的范围明显增大,强度明显增强,表明 VCP22 模式提高了中远距离回波的探测能力。

对比图 1 长乐雷达 VCP22 模式下射线传播路径与图 3 超折射条件下雷达低仰角射线传播路径示意图,若大气处于逆温或逆湿状态下,电磁波射线容易弯向地面传播造成超折射,由于长乐雷达采用负仰角扫描,则电磁波射线更容易弯向地面传播,形成的超折射更为严重。如图 4 所示,在距雷达东南方向 150~300 km 处为超折射回波,是由台湾岛地形反射而形成的,其形状轮廓与台湾岛地形非常一致,在 -0.3°、0°,有时也会在 0.5°仰角出现。

目前,业务上使用模糊逻辑法识别超折射回波,模糊逻辑法是指运用统计方法分析各种雷达回波特

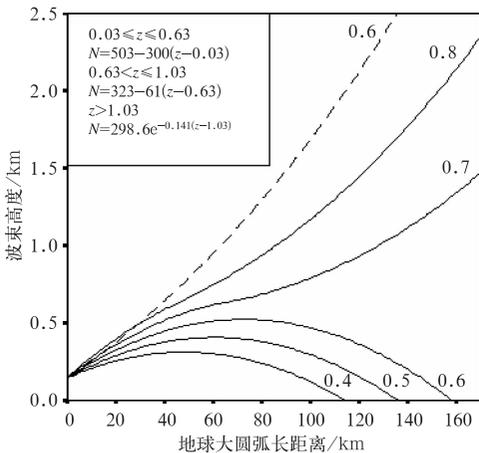


图 3 超折射条件下雷达低仰角射线传播路径示意图
(虚线代表负折射)

Fig. 3 Ray paths for low elevation angle under anomalous propagation
(Dotted line represents negative refraction)

征,找出地物回波不同于降水回波的特点,对这些特征给以相同的权重,得到一个表明每个距离库中受地物回波影响可能性的量化数值,最终识别出那些超过某一阈值的地物回波信息。Kessinger 等(2003),江源等(2009),刘黎平等(2007)方法中使用的反映地物和降水回波差异的 7 个物理量,包括从回波强度中提取的 4 个特征量:反射率水平纹理(TDBZ)、反射率垂直梯度(GDBZ)、沿径向方向的变号(SIGN)、沿径向的库间变化程度(SPIN);从径向速度和速度谱宽中提取的 3 个特征量:径向速度的区域平均值(MDVE)、方差(SDVE)、速度谱宽的区域平均值(MDSW)。

经过统计可知,长乐雷达的超折射回波在回波水平纹理、回波库间变化程度、径向速度及谱宽等特征量与“一般超折射回波”的变化几乎一致。不同的是“一般超折射回波”多数都只出现在最低仰角 0.5° 层上,在 1.5° 仰角层以上几乎不会出现,而长乐雷达的超折射回波是在负仰角扫描模式下造成的,在

低两层仰角 -0.3° 和 0° 仰角层上都特别明显,有时候也会在第三层 0.5° 仰角上出现,其回波强度值高,垂直梯度小。为了区分它与一般超折射回波,称之为高山雷达的“强超折射回波”。

模糊逻辑法中反射率垂直梯度特征量定义为 $GDBZ = \omega(R)(Z_{up} - Z_{low})$, $\omega(R) = 1$ 时, $GDBZ = (Z_{up} - Z_{low})$ 。 $\omega(R) = 1/(H_{up} - H_{low})$ 时,为 Zhang 等(2004)和 Steiner 等(2002)提出的给定距离库在当前仰角和上层仰角的反射率因子差与对应高度差的比值计算垂直变化 $VDBZ = (Z_{up} - Z_{low})/(H_{UP} - H_{LOW})$,江源等(2009)分析了降水回波和地物回波的特征差异,参加分析的真实地物回波点有 43251 个,对流性降水回波点有 11119 个,层状云降水有 107558 个,对所有真实回波点计算的特征量进行统计分析,结果表明,权值 $\omega(R) = 1$ 时, $GDBZ < -20$ 为地物或超折射回波的概率很大;当 $\omega(R) = 1/(H_{up} - H_{low})$ 时, $VDBZ < -15$ 为地物或超折射回波的概率很大。统计图 4 所示的长乐雷达强超折射回

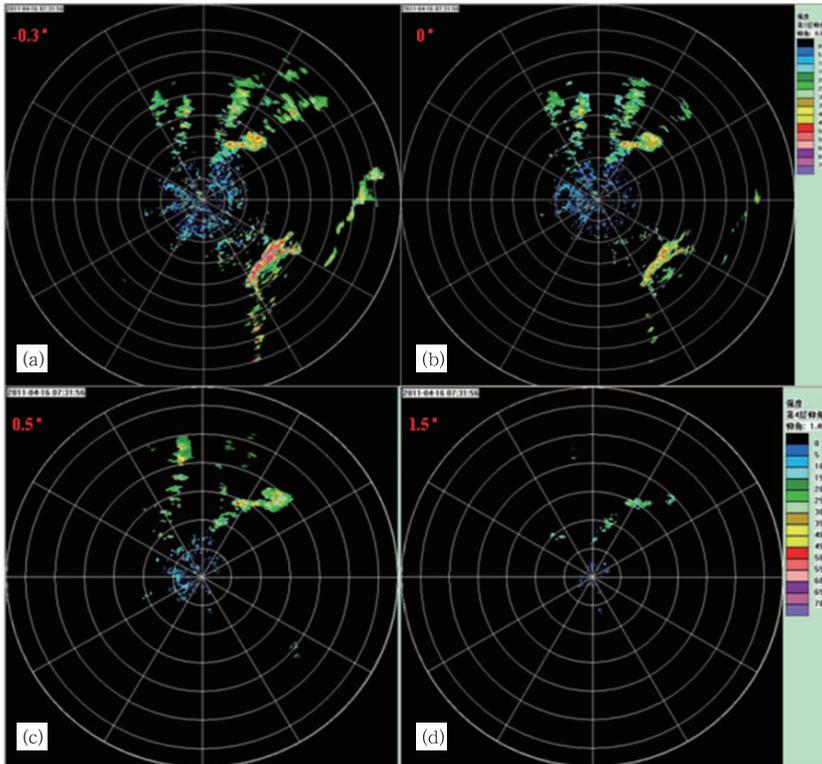


图 4 长乐雷达 VCP22 模式下四个低仰角反射率因子图像

(a) -0.3° , (b) 0° , (c) 0.5° , (d) 1.5°

(距离圈中每圈代表 50 km)

Fig. 4 Reflectivity for 4 low elevation angles using VCP22 in Changle radar site

(a) -0.3° , (b) 0° , (c) 0.5° , (d) 1.5°

(Every circle represents 50 km)

波在 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 径向、 $200\sim 210$ km 范围内的反射率垂直梯度 $GDBZ$ 、 $VDBZ$, 结果如表 2 和表 3 所示, 在参与统计的 100 个强超折射回波点中, 有 67

个回波点的 $GDBZ > -20$, 有 50 个回波点的 $VDBZ > -15$, 不符合地物、超折射回波特征统计结论, 因此模糊逻辑法不适合滤除长乐雷达的强超折射回波。

表 2 长乐雷达在 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 径向、 $200\sim 210$ km 范围内超折射回波垂直梯度 $GDBZ$ 特征统计

Table 2 The statistic of $GDBZ$ for $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$ radial and $200\sim 210$ km range in Changle radar site

距离库	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139
200	-29	-10	-20	-27	-27	-17	-16	-15	-26	-22
201	-18	-23	-21	-18	-18	-16	-20	-13	-17	4
202	-15	-14	-9	-10	-10	-14	-12	-12	-5	-16
203	0	-1	-11	-14	-4	-9	-10	-25	-1	-19
204	-22	-23	-20	-17	-15	-9	-13	-14	-35	-27
205	-15	-18	-9	-7	-19	-20	-28	-23	-14	-16
206	-2	-20	-14	-24	-27	-26	-11	-21	-22	-18
207	-17	-8	-20	-13	-13	-14	-4	-20	-25	-33
208	-16	-15	-10	-14	-16	-24	-27	-21	-19	-15
209	-17	-25	-20	-17	-14	-9	-19	-19	-14	-6

注: 斜体表示模糊逻辑法不能识别的点

Italic represents the data that cannot be detected by fuzzy logic method

表 3 长乐雷达在 $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 径向、 $200\sim 210$ km 范围内超折射回波垂直梯度 $VDBZ$ 特征统计

Table 3 The statistic of $VDBZ$ for $130^{\circ}\sim 140^{\circ}$ radial and $200\sim 210$ km range in Changle radar site

距离库	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139
200	-26	-9	-18	-24	-24	-15	-14	-13	-24	-20
201	-16	-20	-19	-16	-16	-15	-18	-11	-15	3
202	-14	-12	-8	-9	-9	-12	-10	-11	-4	-14
203	0	-1	-10	-13	-4	-8	-9	-22	0	-17
204	-20	-21	-18	-15	-13	-8	-12	-13	-32	-25
205	-14	-16	-8	-6	-17	-18	-25	-21	-13	-14
206	-1	-18	-13	-22	-25	-23	-10	-19	-20	-16
207	-15	-7	-18	-11	-11	-3	-4	-18	-23	-30
208	-14	-13	-9	-13	-14	-21	-25	-19	-17	-13
209	-15	-22	-18	-15	-12	-8	-17	-17	-12	-5

注: 斜体表示模糊逻辑法不能识别的点

Italic represents the data that cannot be detected by fuzzy logic method

4 长乐雷达强超折射回波识别

4.1 模板匹配法原理

由于长乐雷达负仰角观测模式下的强超折射回波是由台湾岛反射回来的, 其回波形状轮廓与台湾岛地形极其相似, 因此可结合地形特征设计长乐雷达的强超折射特征模板, 与实际回波图相匹配, 当相似匹配度达到一定的比例, 则认为是强超折射回波, 予以剔除。

模板匹配法为模式识别上的一种算法, 多用在计算机图像处理和特征识别等学科(谷秋颀等,

2011; 李忠海等, 2011), 本文首次将该理论用于超折射回波特征识别上, 滤除长乐雷达负仰角扫描造成的强超折射回波。其实质是以标准数据为模板, 以模板特点为依据实现强超折射特征匹配, 标准数据做成的模板与实际回波识别所用到的模板尺寸相一致。模板匹配需要参数衡量, 主要有: (1) 求重合度和差别函数; (2) 求相似度; (3) 相关度量标准; (4) 相似度指标等。

4.2 特征模板识别

具体识别步骤为:

(1) 建立模板, 由于该超折射回波是固定发生在台湾岛所在的区域, 因此需要对该区域内强超折

射回波的分布情况进行统计,该区域内的强超折射回波分布在范围(方位 $110^{\circ} \sim 165^{\circ}$, 距离库 $185 \sim 400$)内,通过选取 20 个长乐雷达的强超折射回波个例样本,观测时间在 2011 年 4 月 7—16 日之间,其中每两个数据的观测时间间隔大于 1 h,对该区域内的反射率因子数据做统计,求 20 个样本在强超折射回波区域内每个点的均值,将均值做成标准数据模板存储在计算机中;

(2) 将待识别的回波数据与模板数据相匹配,特征模板匹配的数学描述(付先平等,2011;严萍等,2011):

$$D = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A(k) \times [I(k) - T(k)]^2,$$

式中, $A(k)$ 为第 k 个特征的权值,本文中权值都取 1, $I(k)$ 为待匹配数据的第 k 个特征, $T(k)$ 为模板数据中第 k 个特征, D 为匹配值,表示匹配的特征与模板数据特征的差异程度,匹配值越小,两个回波特征越一致;

(3) 统计降水回波、强超折射回波数据与模板数据的匹配值,根据两类回波匹配值的差异制定相似度指标,达到最优匹配。

4.3 识别结果分析

由于在强超折射发生时,发生降水的概率非常小,目前在个例分析中尚未遇到过在模板区同时存在降水和地物这种情况。本文分两种情况对地物进行识别,(1)在模板区只有地物回波;(2)在模板区只有降水回波。

选取了长乐雷达 50 个地物回波样本和 50 个降水回波样本,降水回波样本是指在模板区只有降水回波,将这些样本数据与模板相匹配,计算匹配值,结果如图 5 所示,匹配值越小,则相似度越高,在模板区发生强超折射的可能性越大,本文将匹配值 $D = 200$ 设为相似度指标(阈值),即待识别的回波数据经过与模板匹配后,当匹配值 $D < 200$ 时,则认为是强超折射回波,给予剔除。另外抽取 50 个地物回波样本和 50 个降水回波样本,统计当匹配值 $D < 200$ 时地物回波识别率和降水回波误判率,结果如表 4 所示,地物回波识别准确率在 90% 以上,降水回波误判为地物回波的概率为 0%,充分表明采用模板匹配法可以有效识别长乐雷达在特定大气条件下的强超折射回波,且当模板区域只有降水回波时不会被误判为地物回波。



图 5 长乐雷达超折射和降水样本的匹配值

Fig. 5 The matching value for anomalous propagation and precipitation samples at Changle radar site

表 4 匹配值 $D = 200$ 时识别结果

Table 4 The recognition result if matching value $D = 200$

识别率	强超折射回波识别准确率	降水回波误判率
百分比	94%	0%

图 6 为模板匹配法对长乐雷达在模板区只有地物和模板区只有降水时的识别结果。

5 结论和讨论

受地球曲率影响,高山雷达在现有的 VCP11/21 模式下探测盲区较大,对低层降水回波的探测能力严重不足,在引进负仰角扫描模式 VCP12/22 后,有效提高了对低层降水回波的观测能力,尤其是在对台风等灾害性天气的远距离监测和预警中显得尤为重要。

但是负仰角扫描也带来了负面效应,如长乐雷达的强超折射回波,本文分析了该强超折射回波的特征,得出以下结论:

(1) 长乐雷达的强超折射回波不符合一般地物、超折射回波的特征统计结论,因此不宜采用模糊逻辑法滤除。

(2) 由于该强超折射回波形状轮廓与台湾岛地形极其相似,提出采用模板匹配法识别,选择合适的模板,将待识别的回波数据与模板数据相匹配,计算匹配值,匹配值越小,则相似度越高,发生强超折射的概率越高。

(3) 抽取长乐地物和降水回波样本,针对本文所用的模板做统计,当匹配值 $D < 200$ 时,地物回波

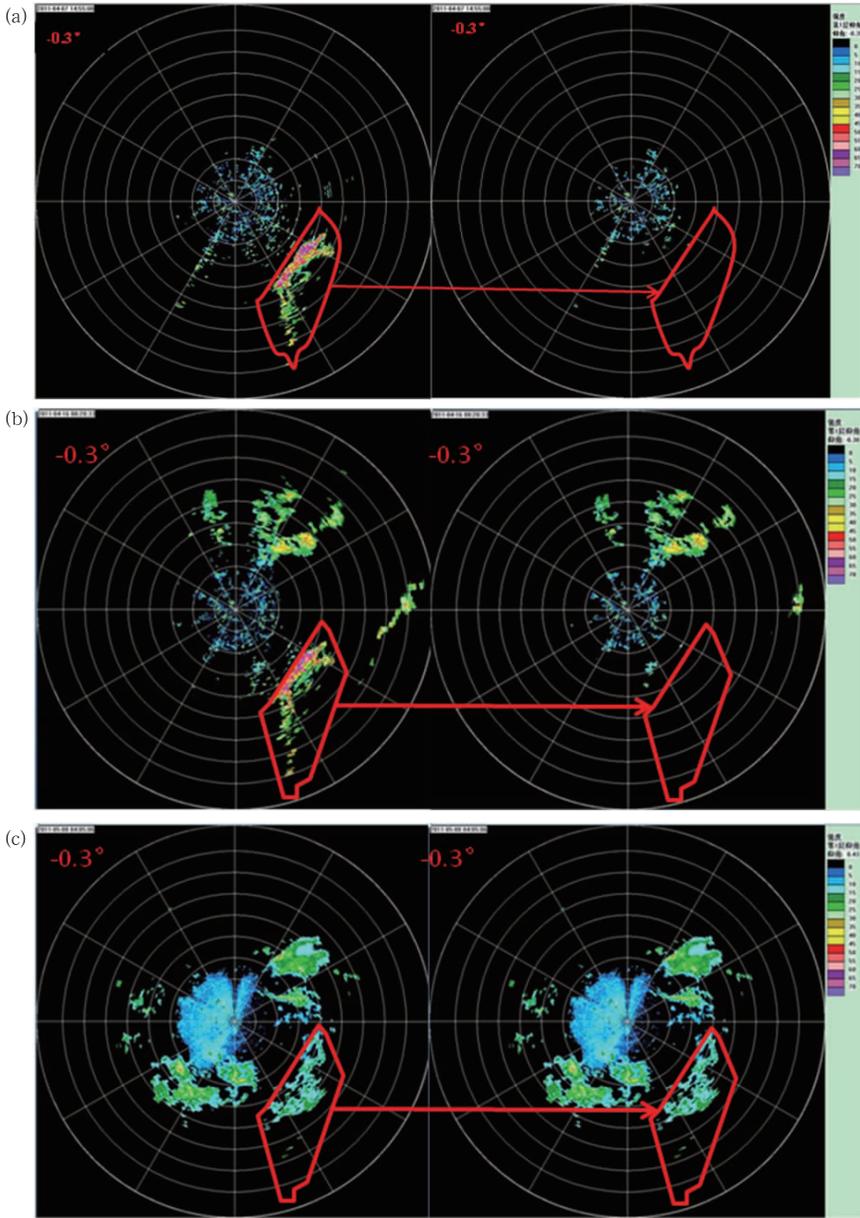


图 6 模板匹配法识别效果

- (a) 2011 年 4 月 7 日 14:55:00(北京时间), 匹配值 $D=100$,
 - (b) 2011 年 4 月 16 日 08:20:33(北京时间), 匹配值 $D=92$,
 - (c) 2011 年 5 月 8 日 04:05:06(北京时间), 匹配值 $D=352$
- (距离圈中每圈代表 50 km)

Fig. 6 The recognition result of template matching method
 (a) at 14:55:00 BT 7 April in 2011, matching value $D = 100$,
 (b) at 08:20:33 BT 16 April in 2011, matching value $D = 92$,
 (c) at 04:05:06 BT 8 May in 2011, matching value $D = 352$
 (Every circle represents 50 km)

识别准确率在 90% 以上, 且当模板区只有降水回波时, 不会被误判为地物回波。

长乐雷达在采用负仰角模式下提高了对低层降

水回波的观测能力, 模板匹配法既不影响对低层降水回波的探测, 而且能解决其带来的强超折射回波负面效应, 目前该方法正在试运行, 即将应用到中国

新一代天气雷达建设业务软件系统开发 ROSE 项目中。

参考文献

- 付先平, 廖圣龙, 袁国良. 2011. 一种基于小波系数投影的快速模板匹配算法, 大连海事大学学报, 37(2):114-116.
- 谷秋颀, 白艳萍. 2011. 基于模板匹配的车牌汉字识别方法及判别函数. 电子科技, 24(12):4-6.
- 江源, 刘黎平, 庄薇. 2009. 多普勒天气雷达地物回波特征及其识别方法改进. 应用气象学报, 20(2):204-208.
- 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等. 2013. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及其未来发展, 气象, 39(3):266-280.
- 李忠海, 李申, 崔建国, 等. 2011. 基于快速 SIFT 特征提取的模板匹配算法. 计算机工程, 37(24):222-224.
- 刘黎平, 吴林林, 杨引明. 2007. 基于模糊逻辑的分布式超折射地物回波识别方法的建立和效果分析. 气象学报, 65(2):252-260.
- 刘晓阳, 杨洪平, 李建通, 等. 2010. 新一代天气雷达定量降水估测集成系统. 气象, 36(4):90-95.
- 王德旺, 刘黎平, 仲凌志, 等. 2012. 毫米波雷达资料融化层亮带特征的分析及识别. 气象, 38(6):712-721.
- 徐八林, 刘黎平, 徐文君, 等. 2008. 利用低仰角扫描改进高山雷达低层回波探测能力浅析. 气象, 34(9):28-33.
- 严萍, 曾金明. 2011. 一种有效的车牌字符识别法—模板匹配和特征点匹配相结合的车牌字符识别法. 西昌学院学报·自然科学版, 25(1):43-44.
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京:气象出版社, 63-64.
- 张培昌, 杜秉玉, 戴铁丕. 2005. 雷达气象学. 北京:气象出版社, 105-106.
- 张沛源, 胡绍萍. 2009. 天气雷达零仰角及负仰角探测存在的问题及其解决办法/第 26 届中国气象学会年会第三届气象综合探测技术研讨会分会论文集. 浙江杭州.
- 张亚萍, 张勇, 廖峻, 等. 2013. 天气雷达定量降水估测不同校准方法的比较与应用. 气象, 39(7):923-929.
- 张扬成. 2012. 新一代天气雷达负仰角探测能力浅析. 第二届全国气象观测技术经验交流会论文集. 北京.
- 庄薇, 刘黎平, 胡志群. 2013. 青藏高原零度层亮带的识别订正方法及在雷达估测降水中的应用. 气象, 39(8):1004-1013.
- 钟敏, 吴翠红, 王珊珊, 等. 2012. CINRAD/SA 雷达两种识别跟踪产品的评估分析. 气象, 38(6):722-727.
- Brown R A, Wood V T, Barker T W. 2002. Improved detection using negative elevation angles for mountaintop SAR-88Ds; Simulation of KMSX near Missoula, Montana. Wea Forecasting, 17:223-237.
- Kessinger C, Ellis S, Vanandel J, etc. 2003. The AP Cutter Mitigation Scheme for The WSR-88D. //Preprints, 31st Conference on Radar Meteorology, Amer Meteor Soc, 526-528.
- Steiner M, Smith J. 2002. Use of three-dimensional reflectivity structure for automated detection and removal of nonprecipitating echoes in radar data. J Atmos Ocean Tech, 19:673-680.
- Vincent T Wood, Rodger A Brown and Steven V Vasiloff. 2003. Improved Detection Using Negative Elevation Angles for Mountaintop WSR-88Ds; Simulations of the Three Radars Covering Utah. Wea Forecasting, 18(3):393-403.
- Zhang J, Wang S, Clarke B. 2004. WSR-88D Reflectivity Quality Control Using Horizontal and Vertical Reflectivity Structure. //Preprints, the 11th Conference on Aviation, AMS, P5. 41.