

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. 应用气象学报, 2015, 26(5): 578-589.
doi:10.11898/1001-7313.20150507

硬件故障导致雷达回波错误数据质量控制方法

赵瑞金^{1)2)*} 刘黎平¹⁾ 张进²⁾

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⁾(河北省气象信息中心, 石家庄 050021)

摘 要

雷达硬件故障直接影响数据质量,故障数据进入共享系统后不但影响本地预报员对天气系统的分析和判断,对国家级业务系统也会产生严重影响。目前,对雷达资料的数据质量控制主要针对非气象回波,对于雷达硬件故障导致的数据错误还缺乏有效的质量控制方法。该文对河北省石家庄 CINRAD/SA 雷达 2004—2013 年硬件故障时的基数据和回波特征进行分析,研究雷达故障导致的数据错误与故障类别的相关性及对数据和回波的影响。结果表明:雷达硬件故障导致的数据错误对基数据的完整性、数据位置和强度信息产生影响,发射机和接收机系统故障主要影响雷达数据的强度信息;伺服系统故障主要影响数据的位置信息。提出通过对雷达数据完整性和位置信息的检查,根据硬件故障影响雷达回波形态、位置、范围和强度等图像特征,利用基于模糊逻辑自动识别雷达硬件故障导致的错误数据的质量控制方法。利用石家庄雷达站 2004—2013 年雷达故障数据进行了识别效果检验,对故障数据的总体识别率超过 90%,能较好实现对硬件故障导致的数据错误质量控制,是现有雷达运行正常情况下针对非气象回波的雷达数据质量控制方法的补充。

关键词: 雷达硬件故障; 数据质量控制; 模糊逻辑

引 言

多普勒天气雷达是中小尺度灾害性天气的新型监测工具,中国气象局已开展了雷达数据共享、组网拼图、资料同化等业务应用和研究^[1-2],短时临近交互预报系统、灾害天气短时临近预报业务系统、多普勒天气雷达建设业务软件系统等已开始业务运行。雷达资料的数据质量对这些系统的运行有重要影响,只有进行质量控制,才能保障探测数据的可靠性,满足各种业务应用要求,为预报方法的改进提供科学依据。

在多普勒天气雷达数据质量控制方法研究方面,目前主要是在雷达运行正常时对非气象回波进行数据质量控制,如地物污染、海浪、鸟群、电磁干扰

等。文献[3-7]提出基于模糊逻辑的分步式超折射地物回波的识别等方法,能够较好地识别出地物回波。谭学等^[8]利用基于回波分块和模糊逻辑的方法对海浪回波进行识别,有效降低了降水回波被误判为海浪回波的概率。陈忠勇等^[9]对不同类型的电磁干扰产生原因和解决方法进行探讨, Jungbluth 等^[10]对迁移鸟群的回波识别方法进行研究。

然而,当雷达发射机、接收机、伺服系统出现故障时,常常导致雷达探测数据错误。雷达硬件故障直接影响气象回波数据的可靠性,而气象回波数据是预报员分析判断天气系统发生发展的重要依据,也是各种预报模式和业务系统的重要资料来源,与非气象回波相比,异常的气象回波资料对预报准确性的影响更大。随着雷达站点不断增加和雷达资料的广泛应用,故障数据对其他业务系统运行的影响

2014-10-09 收到, 2015-05-15 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-B07), 河北省气象局科研课题(12ky13)

* email: zhaoruijin@sina.com

也愈来愈大,对硬件故障导致的雷达数据质量控制方法的研究愈加紧迫和重要。

关于雷达故障对数据和回波的影响,周红根等^[11]对雷达不同部位故障产生的异常回波进行收集和整理,潘新民等^[12]分析了强度定标故障的回波特征和诊断方法,胡东明等^[13]对伺服系统故障导致的丝状回波进行分析,这些研究主要是对故障原因和排除方法进行分析总结,对故障数据的强度、位置、完整性等特征缺乏深入探讨,未将雷达故障产生的数据质量联系起来,更没有给出雷达故障数据识别和控制方法。

目前多普勒天气雷达基数据中主要是回波强度、速度、谱宽和位置等信息,雷达运行状态和报警信息在其他文件中保存,仅从基数据无法了解雷达的运行状态。在实际业务中,也主要是对雷达基数据和产品文件共享,用户无法获取每个基数据的雷达状态和报警信息,为此,赵瑞金等^[14]提出通过建立实时雷达状态信息库,对基数据进行雷达状态参数检查,实际工作中业务人员可通过调用实时数据库获取数据质量信息,对雷达数据是否准确和可用进行判断。邵楠等^[15]研究了采用基于图像处理技术、模式识别和机器学习的方法,通过提取圆弧、直线、缺角等图像特征,对雷达异常数据进行自动识别。上述对硬件故障数据的质量控制主要采用间接方法,然而并非所有故障数据都会出现报警信息,不同部位和类别的硬件故障对数据的影响又有所不同,特别是对于位置、范围和强度异常数据,也不一定出现直线或圆弧等图像特征,导致对雷达硬件故障数据无法正确识别。

因此,在多普勒天气雷达数据质量控制方面,目前主要是对非气象回波进行数据质量控制,对雷达故障导致的数据错误还缺乏有效的控制方法。与非气象回波的数据质量控制相比,由于雷达硬件故障产生的数据错误直接影响气象回波数据的可靠性,对预报准确性的影响更大,对雷达硬件故障导致的数据错误和质量控制方法的研究更加必要。本文对河北省石家庄 CINRAD/SA 雷达 2004—2013 年雷达硬件故障时的回波、基数据特征进行分析,研究雷达不同部位故障时对基数据的影响最佳识别方法,给出一种基于模糊逻辑的雷达故障数据的自动质量

控制方法,通过对石家庄雷达站 2004—2013 年不同类型雷达故障数据的识别效果检验,总体识别率超过 90%,能较好实现对雷达故障数据进行质量控制,是现有雷达运行正常情况下针对非气象回波的数据质量控制方法的补充。

1 雷达故障对探测数据的影响及分类

多普勒天气雷达作为一种长时间连续运行的大型电子设备,很多器件是在高电压和强电流条件下工作,受环境因素和器件质量等因素影响,硬件故障不可避免。仅以河北省石家庄雷达站为例,2004—2013 年出现 40 次雷达硬件故障,特别是在 2004—2007 年雷达运行初期,平均每年出现 5~8 次硬件故障,2008 年以后雷达虽然运行逐步稳定,但每年仍出现 1~3 次硬件故障。从全国范围看,根据杨金红等^[16]统计分析,2006 年 6 月—2011 年 12 月在天气雷达规定开机时段出现 4489 次故障。随着多普勒天气雷达网建设,雷达数量逐步增加,雷达故障对数据和回波的影响愈来愈大。

当雷达出现故障时,对雷达基数据主要产生以下影响:①数据完整性出现异常。这是因为雷达硬件系统出现故障时,常常导致停机,对探测数据完整性会产生影响,根据对石家庄雷达站 2004—2013 年雷达硬件 CINRAD/SA 故障资料统计,伺服系统故障时,有 80%的基数据不完整,发射机系统故障时,有 90%的基数据不完整,接收机系统故障时,有 30%的基数据不完整。②探测数据位置信息错误。伺服系统故障常常影响探测数据的方位和仰角信息,如扫描线方位角错位或缺失,仰角的突然增高或降低,实际位置与预设位置偏差较大等^[17-18]。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 型缺口等,图 1 分别是由于方位和仰角错误导致相邻体扫的回波位置和范围异常(文中时间均为世界时,下同)。③探测数据强度出现异常。故障分析表明发射机和接收机故障主要影响探测数据的强度信息,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^[12,16](如图 1 所示)。或在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

(如图 2 所示)。

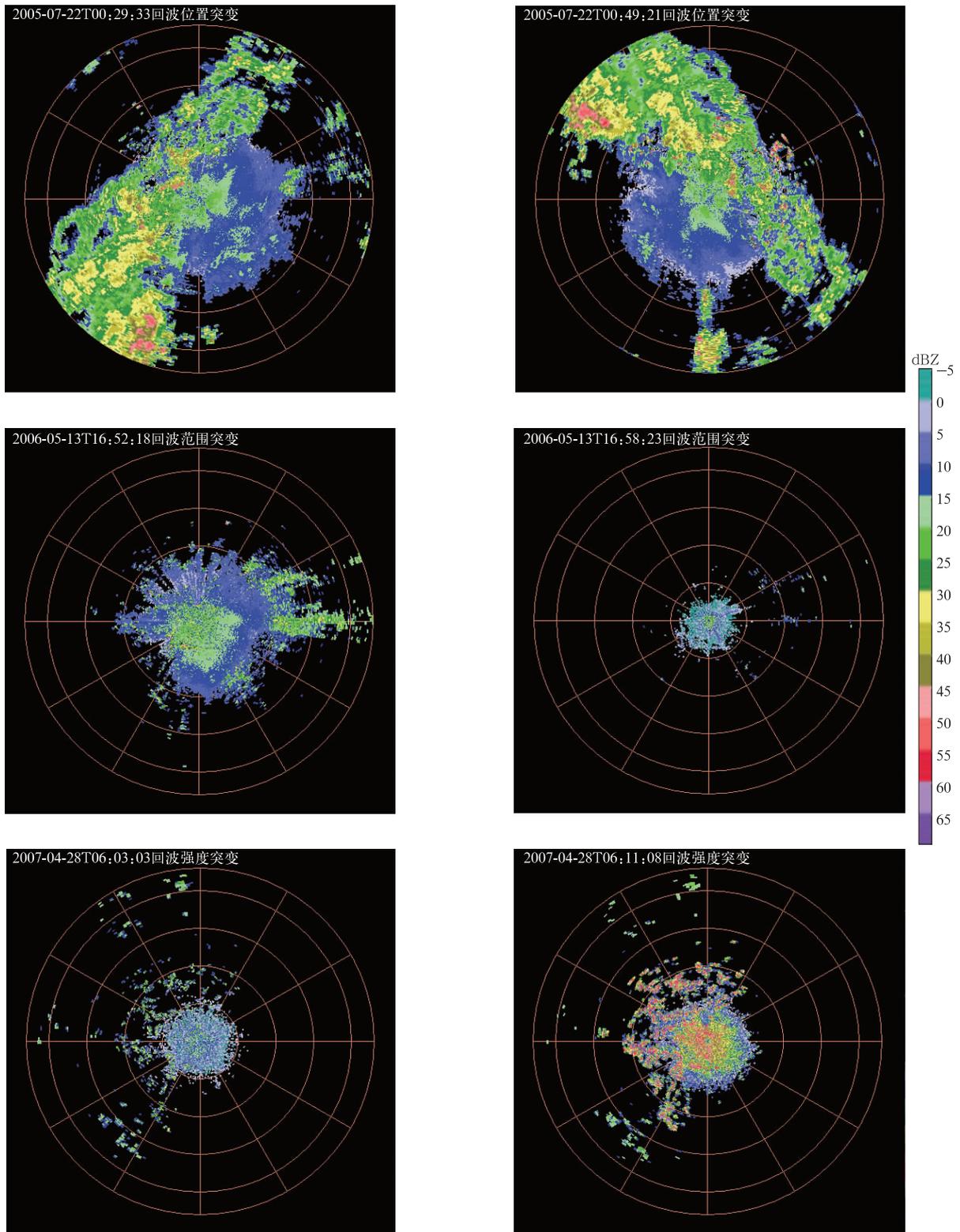


图 1 雷达回波位置、范围、强度突变实例

Fig. 1 Cases of radar echoes position, range and intensity change

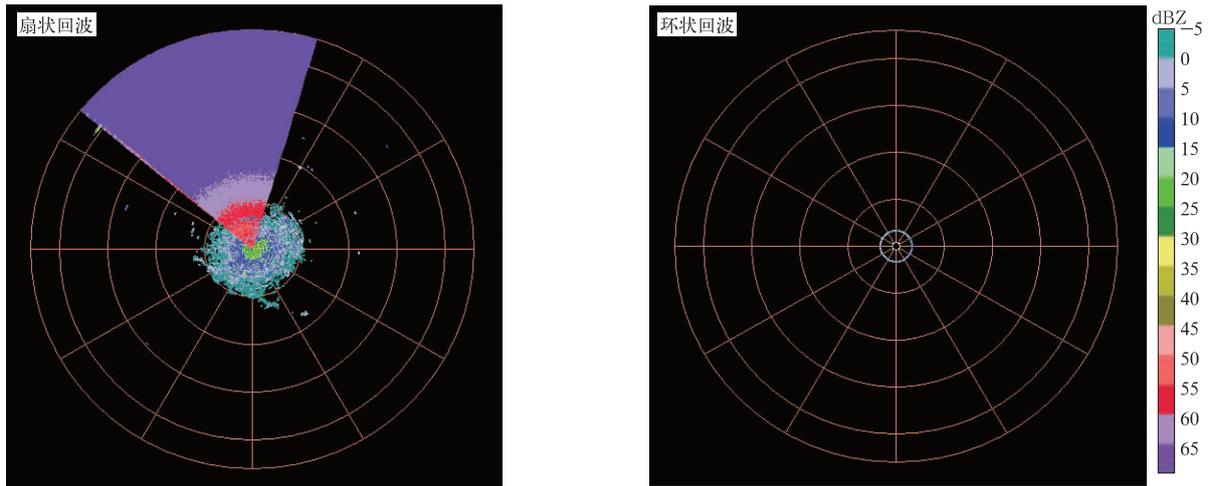


图 2 回波形态改变
Fig. 2 Echo shape change

2 基于模糊逻辑的分步式异常数据自动识别方法

从上面的分析可以看出,雷达故障主要对数据完整性、位置信息和强度信息产生影响,造成回波的异常,但上述 3 种数据错误的特征并非同时出现,有时数据完整性虽然正常,但可能位置或强度信息错误,因此,需要对雷达基数据的完整性、位置信息和雷达回波特征综合检测,进行分步式的故障识别才能全面剔除雷达错误数据。

首先,将待检查的基数据进行雷达数据完整性检测,对于数据完整性检测异常的作为错误数据,正常地进行数据位置信息的检测。然后,根据雷达标校参数和技术指标对雷达数据方位和仰角等信息进行检查,不符合要求的作为异常数据。最后,对数据完整性和位置信息均正常的的数据,进行回波的图像特征检测,对数据强度的突变信息进行识别。

2.1 数据完整性信息的识别

多普勒天气雷达的数据完整性取决于仰角层数和扫描线数的完整,而不同工作模式的仰角层数又存在差异,以 CINRAD/SA 的 VCP21 工作模式为例,完整的体积扫描应包含 9 个仰角 11 层的扫描数据,其中在 0.5° 和 1.5° 扫描 2 次,两条扫描线之间的方位角改变量一般小于水平波束宽度(小于 1°),因此,每个仰角层次的扫描线数要大于 360 条才能闭合,且每个层次扫描线数略有不同,由于每条扫描线的字节长度为 2432 字节,因此,正常文件大小一般为

9.6 MB 左右,而故障数据往往低于或高于该数值。

对于 CINRAD/SA 雷达,每条径向数据的 41~42 字节给出了扫描线状态信息,用数值 0,1,2 分别代表该仰角的第 1 条、中间和最后 1 条径向数据;用 3 和 4 代表该体扫的第 1 条径向数据和体扫结束的最后 1 条径向数据。

以 VCP21 模式为例,当仰角层数为 N_A ,每层扫描线数为 N_B 时,数据完整性异常的识别指标为

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

因此,结合雷达工作模式和体扫结束标志可对数据的仰角层数检查,利用仰角扫描开始和结束标志可进行每个仰角的扫描线数检查,通过上述两个步骤可实现对数据的完整性进行识别。如果数据的层数小于规定的层,或每层扫描线数低于 360 条,则判定为数据不完整。由于不完整数据往往伴随雷达故障,数据错误的可能性较大,可直接剔除,或进一步对各仰角层数据进行位置和强度信息检查,给出每个仰角层数据的可用性。

2.2 数据位置信息的识别

扫描线的方位角和仰角决定了数据的位置信息是否准确,为了完整记录回波强度、速度和谱宽信息,对不同雷达工作模式的预设仰角进行定义,一般从 0.5° 开始,在低仰角每次增加 1 个小于雷达垂直波束宽度,且在方位上两条扫描线之间的方位角改变量为 1° 左右,根据雷达定标要求,方位和仰角的定标精度为 $\pm 0.1^\circ$ ^[19]。此外,在 CINRAD/SA 雷达基数据格式中,每条径向数据的 39~40 字节给出当前仰角内径向数据的序号,数据正常时,该序号应连

续,步长为1。当伺服系统出现故障时,会出现与上述要求不一致的现象,如扫描线方位角错位或缺失,仰角的突然增高或降低,实际位置与预设位置偏差较大等。

因此,用相邻扫描线的径向数据的序号和方位角之差,以及实际仰角与预设仰角之差等位置信息可识别是否有扫描线错位,仰角偏离预设位等现象。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° 时,说明此时有扫描线的缺失、错位现象,只要出现1次即可判定出错。考虑到在高仰角进行扫描层次改变时,由于惯性会导致天线瞬时抖动,因此,选取同一仰角所有扫描线仰角实际位置与预设位置的平均绝对值来判定雷达是否偏离预设位。当相邻扫描线的径向数据序号步长为 ΔT ,方位角之差的绝对值为 $\Delta\theta_A$,仰角的实际位置与预设位置之差的绝对值为 $\Delta\theta_E$,同一仰角所有扫描线仰角的实际位置与预设位置之差的平均绝对值用 $\overline{\Delta\theta_E}$ 代表。此时,数据位置信息错误的判据为

$$\Delta T \neq 1, \Delta\theta_A > 2^\circ, \overline{\Delta\theta_E} > 0.1^\circ. \quad (2)$$

在任何仰角层次,如果扫描线的方位和仰角变化满足上述任意一项指标,则可判断为这个体扫数据为错误数据。

2.3 数据强度信息的识别参数和隶属函数

硬件故障导致的雷达数据强度错误会引起回波形态、范围和强度的突变,与正常的气象回波相比较,硬件故障导致的雷达数据错误具有突发性,常常导致相邻体扫的回波发生较大的改变,出现饼状、环状、大范围噪点等,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,在时间和空间上的发展均有一定的延续性。因此,通过相邻体扫的回波特征参数的比较,可以较好识别出数据

$$r = \frac{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Z_A(i,j) - \bar{Z}_A)(Z_B(i,j) - \bar{Z}_B)}{\sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Z_A(i,j) - \bar{Z}_A)^2} \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Z_B(i,j) - \bar{Z}_B)^2}}, \quad (6)$$

$$\bar{Z}_A = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Z_A(i,j), \bar{Z}_B = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Z_B(i,j).$$

阈值。本文中采用的 $M=360, N=460$,从扫描线起点开始,进行整幅雷达图比较。 $\overline{\Delta S}, \overline{Z}_{MAD}, \overline{S}_{PIN}$ 平均值按邻近正常10个体扫数据计算。

错误。

同时,硬件故障导致的数据错误往往也具有连续性,在硬件故障排除前,这种数据错误持续存在。因此,还需要与临近的正常数据进行图像特征相关才能识别出错误数据。

因此,采用 $\frac{\Delta S}{\overline{\Delta S}}, \frac{Z_{MAD}}{\overline{Z}_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{\overline{S}_{PIN}}, r$ 共4个物理量定义分析雷达数据。其中, $\Delta S, Z_{MAD}, S_{PIN}, r$ 分别代表相邻两幅雷达图的回波面积变化、强度变化平均绝对差、强度变化程度和相关性, $\overline{\Delta S}, \overline{Z}_{MAD}, \overline{S}_{PIN}$ 为连续正常体扫数据上述参数的平均值。

通过与邻近数据和与连续正常体扫数据的平均值比较,对数据质量进行判断。

S 为大于某一强度阈值的雷达回波面积,

$$S = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N S(i,j), S(i,j) = 1, \quad Z(i,j) > Z_{\text{threshold}}. \quad (3)$$

Z_{MAD} 为强度变化平均绝对差,即两幅雷达数据强度的变化情况,

$$Z_{MAD} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |Z_A(i,j) - Z_B(i,j)|. \quad (4)$$

S_{PIN} 为强度变化程度,即变化大于某一阈值的数据占整图比例^[3],

$$S_{PIN} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M_{S_{PIN}}}{M \times N},$$

$$M_{S_{PIN}} = \begin{cases} 1, & |Z_A(i,j) - Z_B(i,j)| > Z_{\text{threshold}}; \\ 0, & |Z_A(i,j) - Z_B(i,j)| \leq Z_{\text{threshold}}. \end{cases} \quad (5)$$

r 为相邻两幅雷达图之间的相关系数,即回波图像的相似度^[20]。

式(3)~式(6)中 A 和 B 分别代表两幅图, M 和 N 分别代表径向扫描线个数和距离库个数, $Z_{\text{threshold}}$ 为

$\frac{\Delta S}{\overline{\Delta S}}, \frac{Z_{MAD}}{\overline{Z}_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{\overline{S}_{PIN}}, r$ 这4个物理量从不同方面反映了雷达数据的变化情况, $\frac{\Delta S}{\overline{\Delta S}}$ 反映了当相邻两幅

图的回波面积变化程度, $\frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}$ 反映了相邻两幅图的强度变化程度, 而 r 反映了相邻两幅雷达图的回波形态相似度。

图 3 是石家庄 CINRAD/SA 雷达在强对流、大面积降水、晴空、超折射等不同天气条件和回波类型的 2600 个雷达正常数据在 0.5° 仰角、面积和变化程度的阈值为 5 dBZ 时, $\frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}, r$ 概率分布统计。可以看出 $\frac{\Delta S}{\Delta S}$ 主要分布在 0~5 倍以内,

$\frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}$ 和 $\frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}$ 的峰值在 1 附近呈正态分布, r 的峰值为 0.9 左右。

图 4 是在同样条件下对 526 个包含饼图、拉丝等强度和位置信息异常的雷达故障数据的 4 个参数的统计。可以看出, $\frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}$ 的数值增大, $\frac{\Delta S}{\Delta S}$ 在 2 倍以上数据明显增大, $\frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}$ 的峰值中心为 1.5 左右, r 的数值减小并呈随机分布。

因此,故障数据与正常数据各参量的概率分布存在较大差异,根据这些参量的概率分布,可以确定用梯形折线表示的各个参量的隶属函数。用 $P_s,$

P_{MAD}, P_{SPIN}, P_r 分别代表 $\frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}, r$ 的隶属函数。

$$P_s = \begin{cases} \frac{1}{5} \frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{\Delta S}{\Delta S} < 5; \\ 1, \frac{\Delta S}{\Delta S} \geq 5. \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{MAD} = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}} < 2; \\ 1, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}} \geq 2. \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{SPIN} = \begin{cases} \frac{1}{2} \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}} < 2; \\ 1, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}} \geq 2. \end{cases} \quad (9)$$

$$P_r = \begin{cases} 1 - r, r \geq 0; \\ 1, r < 0. \end{cases} \quad (10)$$

分别给予 $P_s, P_{MAD}, P_{SPIN}, P_r$ 相同的权重系数,建立如式(11)所示综合识别方程,数据的异常概率用 P 表示,当 P 大于给定阈值,如 0.6 时,即当错误数据的概率大于阈值时,该数据为错误数据。

$$P = 0.25P_s + 0.25P_{MAD} + 0.25P_{SPIN} + 0.25P_r. \quad (11)$$

综上所述,通过上述 3 个步骤的检查,可实现对基数据的完整性检查和质量控制。当待检查雷达数

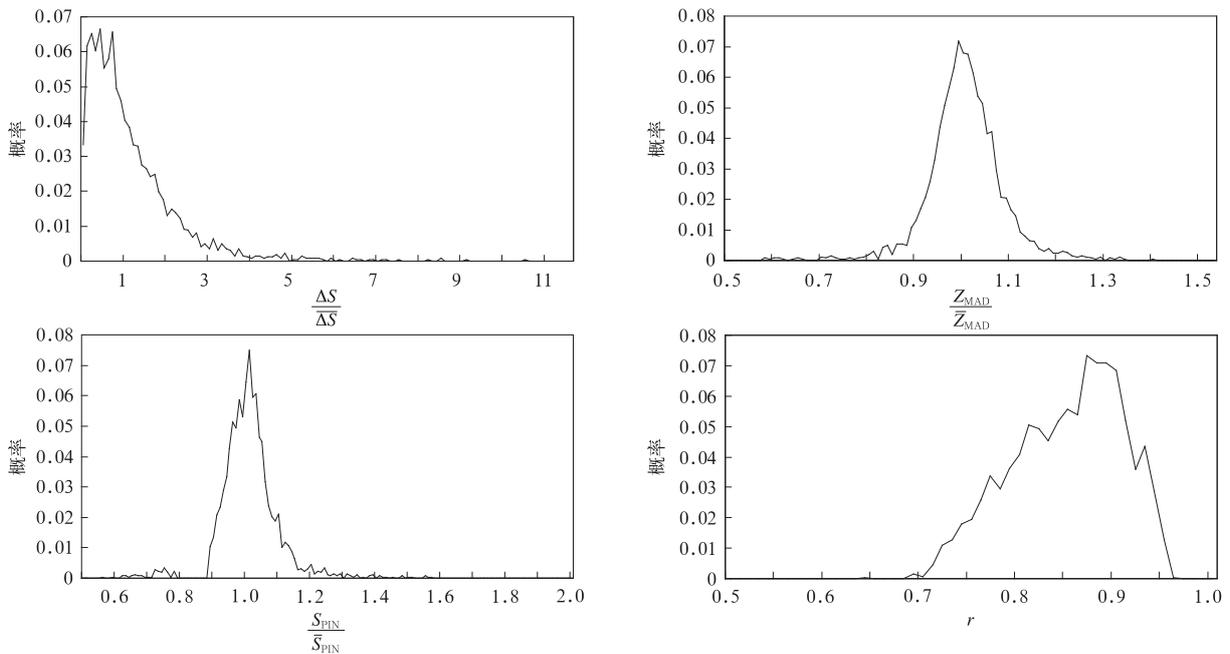


图 3 正常雷达数据的 $\frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}, r$ 概率分布

Fig. 3 Probability distribution of $\frac{\Delta S}{\Delta S}, \frac{Z_{MAD}}{Z_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{S_{PIN}}, r$ for normal radar data

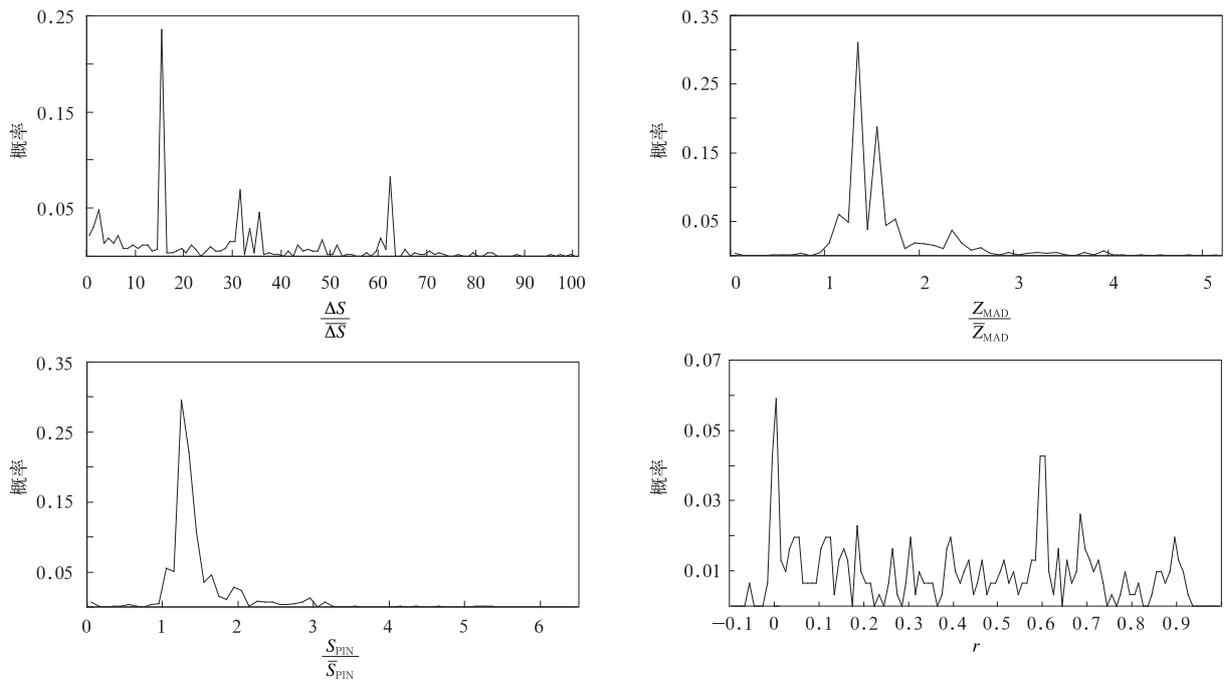


图4 雷达故障数据的 $\frac{\Delta S}{\Delta \bar{S}}, \frac{Z_{MAD}}{\bar{Z}_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{\bar{S}_{PIN}}, r$ 概率分布

Fig. 4 Probability distribution of $\frac{\Delta S}{\Delta \bar{S}}, \frac{Z_{MAD}}{\bar{Z}_{MAD}}, \frac{S_{PIN}}{\bar{S}_{PIN}}, r$ for erroneous radar data

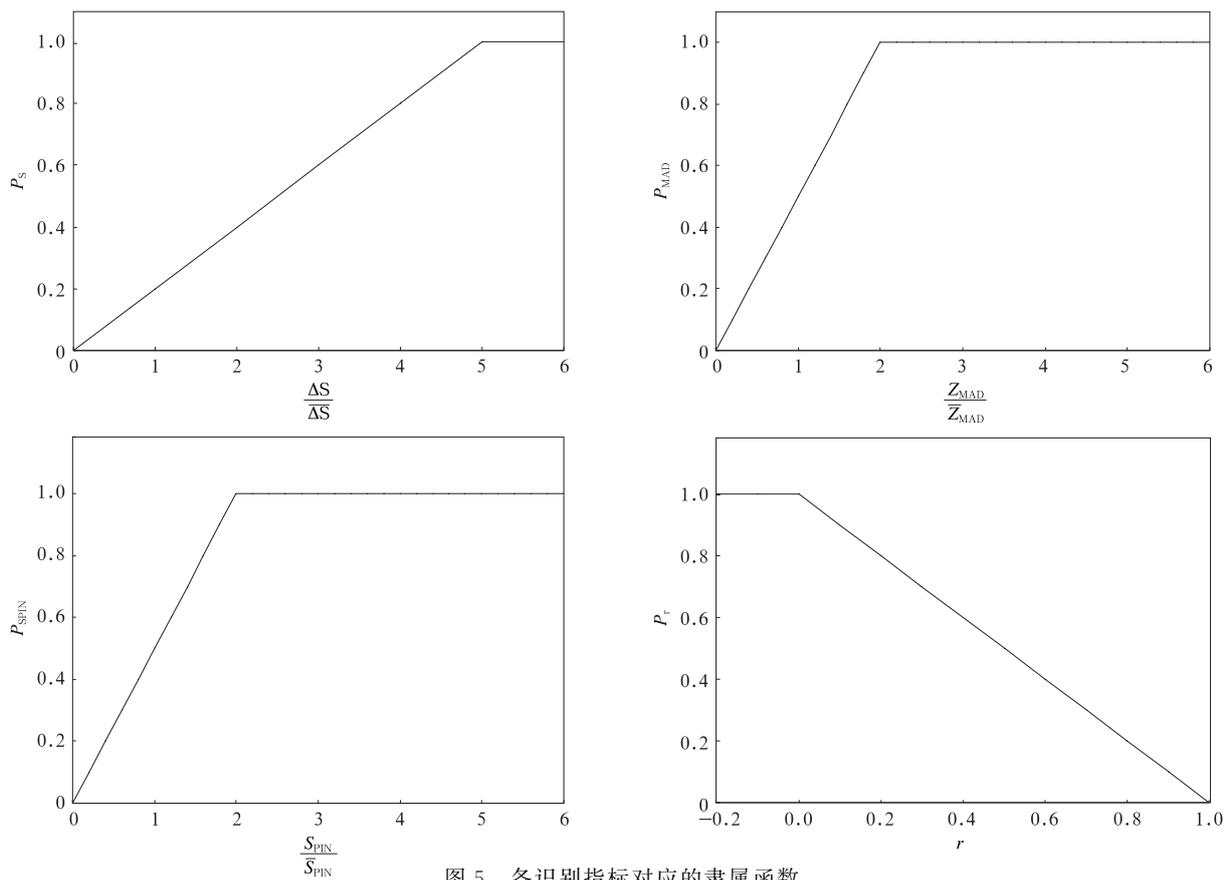


图5 各识别指标对应的隶属函数

Fig. 5 Membership functions of each identification index

据出现位置信息异常时,该数据的错误概率 $P=1$; 强度信息的检查通过式(11)和设定的阈值来判定。

3 效果检验

3.1 数据位置信息错误检验实例

回波位置的异常包括扫描线方位角或仰角错误,以及回波整体位置出错等情况。

2013年4月3日04:42石家庄雷达在东北方向出现明显的拉丝(如图6所示)。表1是该时刻相邻4条扫描线的位置信息,其中秒后时间为毫秒,可以看出,此时扫描线方位角出现错位,相邻扫描线方位角最大偏差达到了 348.22° ,根据式(2),该数据为错误数据。

当雷达回波整体位置出现异常时,很难从单张雷达图上识别。此时只有通过和邻近雷达回波的比较才能发现数据错误。如2005年7月22日00:29:33,雷达突然停机,00:49:22重新开机后,两个体扫回波整体位置相差 90° (如图1所示)。表2给出了相

邻体扫的 $\Delta S, Z_{MAD}, S_{PIN}, r$,可以看出在00:49发生了很大变化,利用式(11)可以计算出该数据错误概率约为70%。

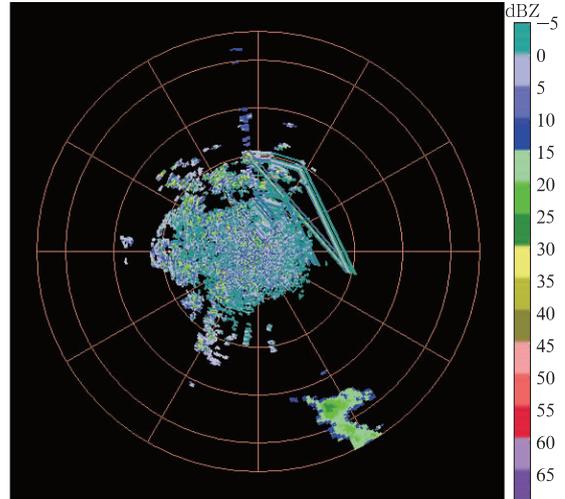


图6 2013年4月3日04:42:00石家庄雷达回波强度
Fig. 6 Reflectivity of Shijiazhuang radar site at 044200 UTC 6 Apr 2013

表1 2013年4月3日04:42:00丝状回波位置数据
Table 1 Silk shape echo position data at 044200 UTC 6 Apr 2013

时间	方位/ $^\circ$	仰角/ $^\circ$
04:42:03.360	24.74	0.53
04:42:03.883	6.37	0.53
04:42:03.969	354.59	0.53
04:42:04.405	25.97	0.53

表2 2005年7月21—22日回波位置异常变化相关参数
Table 2 Correlation parameters of echo position change on 22 Jul 2005

时间	$\Delta S(\geq 5 \text{ dBZ})$	Z_{MAD}/dBZ	$S_{PIN}(\geq 5 \text{ dBZ})$	r
21T23:27—23:33	654	3.042349	0.149239	0.882581
21T23:33—23:39	1208	3.158146	0.153502	0.873645
21T23:39—22T00:45	752	3.307222	0.158321	0.858955
21T23:45—23:51	421	3.088678	0.146292	0.865209
21T23:51—23:58	918	3.061588	0.146884	0.865149
21T23:58—22T00:05	381	2.985229	0.143617	0.869761
22T00:05—00:11	704	2.828364	0.132409	0.873409
22T00:11—00:17	800	2.843678	0.132210	0.869391
22T00:17—00:23	551	2.541492	0.116812	0.886527
22T00:23—00:29	862	2.662729	0.120996	0.876078
22T00:29—00:49	543	9.305441	0.353400	0.344445
22T00:49—00:55	434	2.558339	0.117548	0.886113

3.2 数据强度信息错误检验实例

图7和表3分别是2011年4月20日石家庄雷达出现饼图时,0.5 $^\circ$ 仰角回波强度和相

关参数的计算结果,其中面积和变化程度的阈值为5 dBZ,可以看出,10:24与10:18和10:30相比较,与临近的数据相比较时,图像特征参数出现明显的差异,因

此,从 10:24 开始数据有异常的突变。 P_S, P_{NAD}, P_{SPIN} 均为 1, P_r 为 0.870424, 该数据的错误概率为 0.967606, 为错误数据。

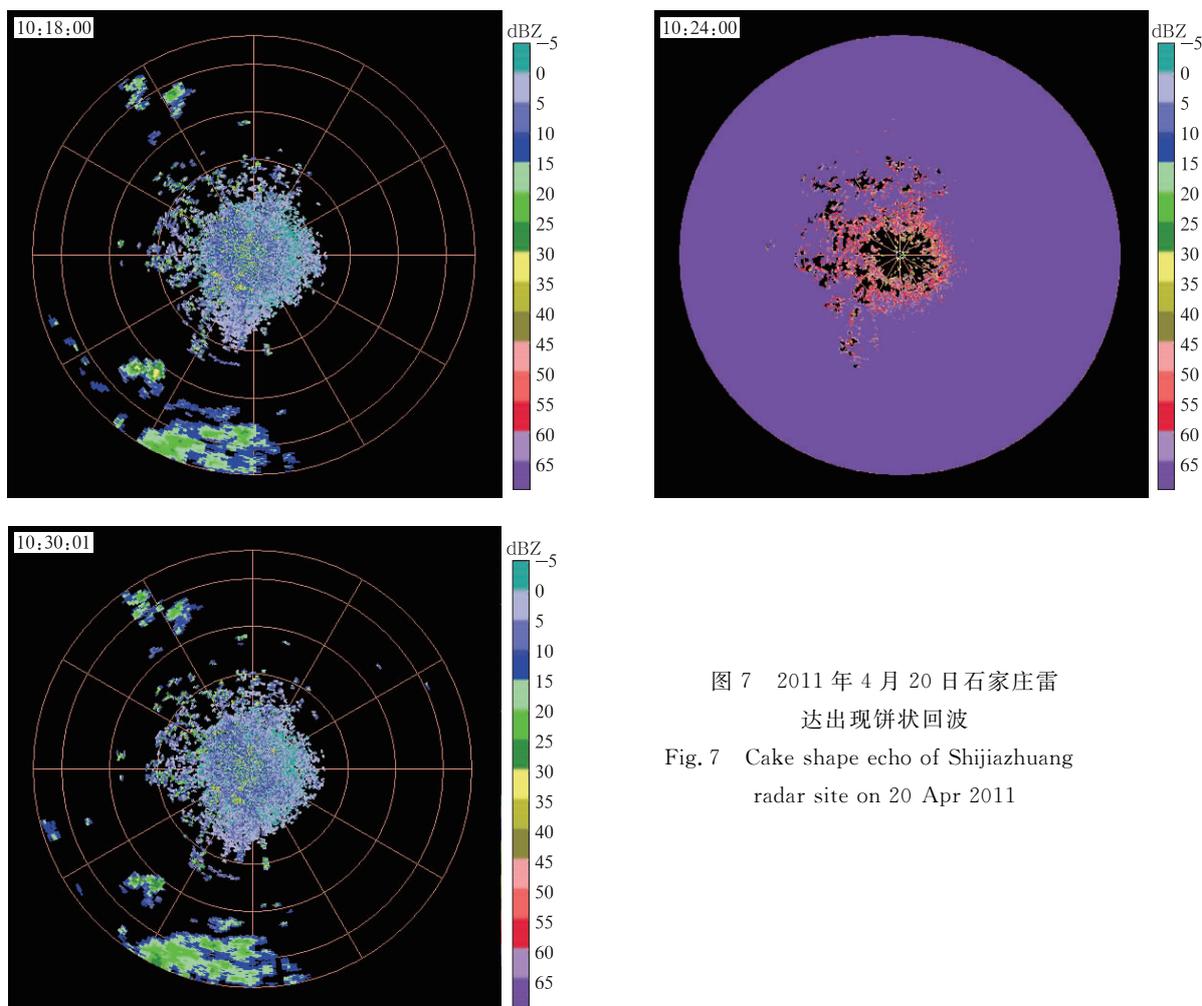


图7 2011年4月20日石家庄雷达出现饼状回波

Fig. 7 Cake shape echo of Shijiazhuang radar site on 20 Apr 2011

表3 2011年4月20日10:06—10:42相邻雷达数据的图像特征相关参数
Table 3 The correlation parameter of image features of adjacent radar data of Shijiazhuang radar site from 1006 UTC to 1042 UTC on 20 Apr 2011

时间	$\Delta S(\geq 5 \text{ dBZ})$	Z_{MAD}/dBZ	$S_{PIN}(\geq 5 \text{ dBZ})$	r
10:00—10:06	619	0.082349	1.315326	0.820525
10:06—10:12	238	0.081335	1.299354	0.826941
10:12—10:18	490	0.081691	1.315719	0.827493
10:18—10:24	7495	0.234046	13.341818	0.129576
10:24—10:30	7198	0.234970	13.308351	0.144123
10:30—10:36	625	0.078279	1.259607	0.841661
10:36—10:42	650	0.082204	1.326002	0.823098

表4是3个体扫在仰角 0.5° 、方位角 $180^\circ \sim 183^\circ$ 连续3条扫描线上51~60 km距离库的回波强度,可以看出,3个时刻扫描线位置信息正常,但10:24回波强度比10:18和10:30增强了50 dBZ以

上。因此,通过与临近和连续正常数据4个参数的比较能够剔除强度错误数据。

3.3 总体效果检验

利用上述识别方法,对石家庄雷达站2004—

2013 年 40 次雷达故障中不同类型的故障数据总体的识别效果如表 5 所示。其中错误数据为 526 个,异常概率阈值为 0.6。

由表 5 可以看出,总体的错误数据识别率达到 90% 以上。特别是对位置异常的错误数据全部识别。因此,采用基于模糊逻辑的分步式异常数据自

动识别方法,对于大部分硬件故障数据能够较好地识别。

对于部分强度信息错误数据未能识别,这是由于采用基于模糊逻辑的错误数据的识别方法,当图像的强度、范围特征变化愈大,识别效果愈好。如果雷达故障对回波的影响在正常气象回波在演变过程

表 4 2011 年 4 月 20 日 10:18—10:30 回波强度变化情况
Table 4 Intensity change from 1018 UTC to 1030 UTC on 20 Apr 2011

时间	方位角/(°)	仰角/(°)	51~60 km 距离库回波强度/dBZ									
			51 km	52 km	53 km	54 km	55 km	56 km	57 km	58 km	59 km	60 km
10:18	180.88		-2.0	1.0	-0.5	5.5	12.5	2.0	3.0	2.0	1.0	-1.5
	181.85	0.53	1.5	4.5	8.5	7.5	9.0	6.0	5.5	2.5	0.0	-0.5
	182.81		1.0	0.5	-0.5	6.0	8.0	11.5	8.0	-2.0	2.5	4.5
10:24	180.83		61.0	59.0	60.5	73.5	64.5	61.0	68.5	71.0	71.0	88.0
	181.85	0.57	59.0	70.0	68.5	72.0	71.5	63.0	63.5	55.0	74.5	74.5
	182.81		54.0	67.5	62.5	60.0	68.0	87.5	87.5	67.0	88.0	88.0
10:30	180.75		10.5	11	4.5	5.0	0.5	10.5	2.5	8.0	5.0	1.0
	181.67	0.57	5.5	4	3.5	2.0	1.5	4.0	4.0	-1.5	3.5	4.0
	182.64		3.5	7.5	-1.0	2.0	7.0	3.5	0.5	1.5	3.5	6.5

表 5 不同硬件故障数据的识别情况(判定阈值: $P \geq 0.6$)
Table 5 Identification result of erroneous radar data(identification threshold $P \geq 0.6$)

错误数据类型	回波形态	数据量	识别	识别率/%
强度异常	饼图,大范围噪点	28	22	78.57
	V 型缺口,扇状回波	428	394	92.06
	强度异常增强或减弱	37	27	72.97
	环状	1	1	100
方位角/仰角异常	回波整体方位改变	1	1	100
	丝状回波	29	29	100
	范围异常	2	2	100
异常数据总体识别情况		526	476	90.49

中的合理限度内,雷达故障对回波强度影响程度较小,可能导致对错误数据的漏识别。此外,识别阈值的选择对识别效果也会产生影响,当阈值过高时,会对错误数据漏判。

4 结论与讨论

本文通过对雷达硬件故障时的基数据完整性、位置信息和回波特征分析,研究了雷达故障导致的错误数据和回波特征,与故障类别的相关性及质量控制方法主要结论如下:

1) 雷达出现故障对基数据的数据完整性、位置和强度信息产生影响,引起回波的形态、范围、位置和强度异常,不同部位和类别的硬件故障对数据影响有所不同,接收机系统故障主要影响雷达数据强

度信息;伺服系统故障主要影响扫描数据的方位和仰角信息,数据完整性也较差,需要进行数据位置信息和数据完整性检查才能较好识别。

2) 根据雷达工作模式和技术参数要求,通过雷达数据完整性和位置信息检查,可以实现对硬件故障导致的不完整数据和位置信息错误数据的剔除。

3) 雷达数据强度信息影响回波形态、范围和强度等图像特征,采用回波面积、强度变化的平均绝对差、强度变化程度和相关系数 4 个参数,通过与相邻体扫和邻近的连续正常体扫数据回波特征参数的比较,可以较好地实现对雷达硬件故障产生的数据强度信息错误进行质量控制。

本文利用雷达基数据中的强度和位置等信息对故障数据进行识别,但不同部位和类别的硬件故障对数据的影响有所不同,仅靠一种方法无法实现对

异常错误数据的彻底剔除。多普勒天气雷达不但能够提供原始数据信息,还具有在线监测、标定和报警信息,因此,在实际工作中可结合雷达状态和报警信息等资料,通过多种手段综合应用,对雷达资料进行分步检查能够较全面地实现对雷达硬件导致的数据错误有效的质量控制。

雷达作为短时预报和监测的重要手段,对资料时效性要求很高,目前单站雷达数据一般采用文件形式传输至省信息中心,部分区域同步观测的雷达实现了数据流传输,资料通过国家和省级通信系统实现共享,无论在雷达站还是省级信息中心,雷达故障数据均未经过质量控制直接进入共享系统,严重影响精细化预报及其他定量气象业务应用的精度。因此,急需建立雷达数据质量控制系统,在单站雷达数据上传或进入质控数据共享系统之前,首先进行资料的质量控制,对数据进行可用、可疑和不可用判定,加以标识供业务应用参考。本文提出的算法目前主要对文件级数据进行处理,可在6 min之内完成1个体扫数据的检查,效果检验表明:对故障数据的总体识别率超过90%。

不同业务对雷达资料的需求也存在差异,雷达实时数据流不但含有气象信息,还有雷达状态和报警、控制信息等,最终分别形成基数据、状态信息、报警信息、标定信息等文件级数据,这些原始数据既是预报员获取气象信息来源,也是保障人员分析雷达运行状态,进行故障诊断和改进雷达技术的重要依据。因此,雷达的原始数据和经过质量控制后的数据分别满足不同类型和层面的业务需求,均需上传和共享。

本文所提出的算法也可应用于雷达状态实时监测系统,通过对数据流信息的分析,对数据的可用性进行判别,完善多普勒天气雷达报警和监控系统。此外,文中给出的算法主要是基于对回波强度和位置信息的分析和处理,对于雷达硬件故障导致的速度和谱宽数据错误及质量控制方法仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 肖艳姣,刘黎平,杨洪平.基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术.气象学报,2008,66(3):470-473.
- [2] 肖现,王迎春,陈明轩,等.基于雷达资料四维变分同化技术对北京地区一次下山突发性增强风暴热动力机制的模拟分析.气象学报,2013,71(5):797-816.
- [3] 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.气象学报,2007,65(2):252-260.
- [4] 江源,刘黎平,庄薇.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,2009,20(2):203-213.
- [5] 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.应用气象学报,2012,23(2):147-158.
- [6] 李丰,刘黎平,王红艳,等.C波段多普勒天气雷达地物识别方法.应用气象学报,2014,25(2):158-167.
- [7] 何彩芬,黄旋旋,丁焯毅,等.宁波非气象雷达回波的人工智能识别及滤波.应用气象学报,2007,18(6):856-864.
- [8] 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.气象学报,2013,71(5):962-975.
- [9] 陈忠勇,蔡宏,向阿勇,等.天气雷达探测遭电子干扰分析与解决途径.气象科技,2012,40(5):719-722.
- [10] Jungbluth K, Belles J, Schumacher M. Velocity Contamination of WSR-88D and Wind Profiler Data Due to Migrating Birds // The 27th Conference on Radar Meteorology. American Meteorological Society, 1995:666-668.
- [11] 周红根,柴秀梅,胡帆,等.新一代天气雷达回波异常情况分析.气象,2008,34(6):112-115.
- [12] 潘新民,柴秀梅,崔柄俭,等.CINRAD/SB雷达回波强度定标调校方法.应用气象学报,2010,21(6):739-746.
- [13] 胡东明,刘强,程元慧,等.CINRAD/SA天线伺服系统轴角箱多次故障的分析.气象,2007,33(10):114-117.
- [14] 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.气象,2013,39(5):645-652.
- [15] 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.气象科技,2013,41(6):993-997.
- [16] 杨金红,高玉春,柴秀梅.新一代天气雷达运行保障能力分析.气象科技,2014,42(1):31-37.
- [17] 杨传凤,张璇,张骞,等.CINRAD/SA雷达俯仰角码跳闪导致天线异动的故障排除.气象水文海洋仪器,2011,28(4):109-114.
- [18] 蔡勤,柴秀梅,周红根,等.CINRAD/SA雷达闪码故障的诊断分析.气象,2011,37(8):1045-1048.
- [19] 中国气象局.新一代天气雷达系统功能规格书(S波段).2010.
- [20] 朱永松,国澄明.基于相关系数的相关匹配算法的研究.信号处理,2003,19(6):531-534.
- [1] 肖艳姣,刘黎平,杨洪平.基于天气雷达网三维拼图的混合反

The Quality Control Method of Erroneous Radar Echo Data Generated by Hardware Fault

Zhao Ruijin¹⁾²⁾ Liu Liping¹⁾ Zhang Jin²⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Hebei Provincial Meteorological Information Center, Shijiazhuang 050021)

Abstract

Radar hardware fault affects data quality directly. Erroneous data not only affect local forecaster analyzing weather, but also have serious influence on the running of national operation system. So far, study on radar data quality control mainly aims at non-meteorological echoes, such as ground clutter, sea clutter, electromagnetic interference and so on. There isn't enough effective quality control method for erroneous data generated by hardware fault. Through analysis on the integrity of base data, position information and characteristic of hardware fault echoes, the correlation between erroneous data and fault category, and effects of different fault on data and echoes are studied. A quality control method is provided.

Erroneous data generated by radar hardware fault affect integrity of base data, position and intensity information of echoes. There is some difference among different type hardware fault or part of radar. Transmitter and receiver system fault mainly affect the intensity information. Servo system fault mainly affect position information and the integrity of date. Through checking base data integrity and echoes position information, fault data generated by servo system can be identified. The radar intensity information affect image feature such as shape, range and intensity. The error intensity information data generated by radar hardware fault can be controlled through fuzzy-logical principle, and identified through comparing parameters such as radar echoes area, mean absolute difference of intensity, the degree of intensity change, and image correlation coefficient with neighboring normal data. There is some difference between different parts of radar or different kinds of hardware fault. It is impossible to identify all erroneous data only by one method. In the actual work, it is necessary to combine status and alarm information, and apply multiple means to check radar data step by step. Only in this way, erroneous data generated by hardware fault can be effectively and comprehensively controlled.

A test on erroneous data generated by hardware fault of Shijiazhuang radar site from 2004 to 2013 is carried out, and the identification ratio is above 90%. It is supplement for the existing quality control methods which mainly aim at non-meteorological echoes when radar operate normally. The proposed algorithm is mainly based on the intensity and position information, and the quality control method on velocity and spectral width error generated by hardware fault should be further studied.

Key words: radar hardware fault; data quality control; fuzzy-logical principle