

文章编号: 2096-1618(2023)01-0006-07

基于天气雷达的风切变识别研究

鲜林¹, 周晔², 高霞², 王海江¹

(1. 成都信息工程大学, 四川 成都 610225; 2. 中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214000)

摘要:风切变是影响航空飞行和着陆安全的重要因素,为提升风切变的识别效果,首先利用“K-邻域频数”法对天气雷达数据进行质量控制,并针对不同的距离库讨论窗口尺寸对数据结果的影响。结果表明,采用多种窗口的质量控制能有效剔除噪声数据,并充分填补缺测点和缺测区域。其次对最小二乘法的识别区域进行改进,在雷达覆盖范围内各区域均有良好表现。使用直接差值滤波法和改进最小二乘法对阜阳地区的一次龙卷过程实例进行风切变的识别研究,对比两种方法的识别结果发现,在距雷达中心10 km内的区域,最小二乘法有较低的误识别率;在距雷达较远区域,该方法亦能精准识别风切变现象发生。

关键词:风切变识别;最小二乘法;多普勒天气雷达;K-邻域频数法

中图分类号: TN959.4

文献标志码: A

doi: 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.01.002

0 引言

风切变是指空间中两点的矢量差,即空间两点的风向、风速突然发生大范围的变化,高度600 m以下的风切变被称为低空风切变。飞机在起飞和着陆时间段里,如果在空中遭遇风切变,空速和升力突发变化,很容易失速并且操作困难,极容易发生重大飞行事故,是公认的空中隐形杀手^[1-5]。2015年,台湾复兴航空的飞机在降落时遭遇了风切变,乘客与机组人员有48人死亡,10人受伤^[6]。所以,研制出有效快速的风切变识别预警算法,能有效保障航空飞行安全。

针对低空风切变识别研究,Uyeda等^[7]利用中气旋和辐合线算法,找到径向风速的差异,识别阵风锋类型风切变时,当阵风锋和风速方向不是垂直关系,则辐合区为风速矢量减少的区域,就可以根据径向风速大小来判断风切变发生的地点。Campbell等^[8]成功研制了一种WX1系统,使用专家系统和计算机视觉技术模仿雷达气象学家的符号推理和视觉处理能力的方法,用多普勒天气雷达对低空风切变进行可视化显示。结果证明,该系统具有识别微暴流和风切变的能力。Boilley等^[9]开展一项数值研究,评估高分辨率建模预测风切变的能力。Augros等^[10]开发一种检测低空风切变的算法,将法国运营网络的所有雷达收集的数据,通过组网融合投影到笛卡儿坐标系中,对比相邻格点间的风速来确定风切变的发生,该算法能观测到小尺度风切变的特征。胡明宝等^[11]基于海军航空兵东海宁波场站多普勒天气雷达资料探测低空风切变,主要算法包括一维径向切变值、一维切向切变值、二维组合

风切变值的计算。王珊珊^[12]通过多普勒天气雷达实测的一次飊线过程资料,对WSD-88D合成算法进行封装,实现工程设计,结果表明,对低空风切变识别有一定的帮助。王楠等^[13]基于多普勒天气雷达径向速度资料,使用最小二乘法去识别低空风切变和辐合线,并分析不同的计算窗口对资料预处理效果和切变梯度的影响。魏耀等^[14]利用天气雷达数据,使用一种随距离远近而发生变化的“拟合窗口”的最小二乘法去识别风切变,结果表明,在识别能力等方面都好于直接差值滤波法。Wang等^[15]通过机载气象雷达识别,使用雷达成光谱宽度和平均径向速度数据的区域增长算法用于快速识别不同的高度的水平风切变区域,结果表明,算法具有更好的准确性,更快的识别速度。蒋立辉等^[16]使用CINRAD-CD雷达的基数据,提出基于自适应多尺度的风切变预警算法,来解决天气雷达单尺度识别风切变产生的漏报问题。赵静^[17]利用新一代天气雷达的基数据进行质量控制,针对直接差值滤波法存在漏报问题,提出基于CINRAD基数据识别风切变算法的研究,使用江苏雷电大风实例验证最小二乘法对风切变的识别。闫文辉等^[18]利用徐州一次飊线过程、西南急流过程、MICAPS高空资料对风切变算法进行分析验证,其中分别计算了二维合成风切变、时间风切变和垂直风切变,结果表明,风切变算法能对民航的低空风切变预警有一定的帮助。

风切变主要是有风的水平切变和风的垂直切变,但基本的识别算法,都是计算径向或者切向的速度变化,或者两者的合成切变来判断风切变大小和位置。本文先对天气雷达径向数据用“K-邻域频数”法做质量控制,并针对不同的距离库讨论窗口尺寸对质量控制效果的影响,接着使用直接差值滤波法和改进的最

小二乘法就识别能力、雷达中心附近 10 km 左右的风切变误识别等方面进行对比,并讨论了不同的识别区域对风切变识别效果的影响。

1 数据预处理

由于雷达内部系统噪声和外部飞机声音的干扰,雷达回波数据中会出现很多离散孤立的噪声数据,多普勒天气雷达也会因地形遮挡、无回波数据等引起的缺测数据^[17]。所以,为避免噪声和缺测数据对风切变识别算法产生影响,需要对雷达基数据进行数据质量控制。本文采用“ K -邻域频数法”^[19]对天气雷达基数据进行处理,其原理如下:(1)将 \pm Nyquist 速度范围分成不同的 P 个等距区间 $N_p (p=1,2,\dots,P)$,区间间隔为 Δd ,窗口中心点的速度值为 V_{ij} ,则第 $P+1$ 个区间的速度值为 $V_{ij} \pm \Delta d/2$;(2)统计在 $U \times V$ 窗口内的速度值在不同区间的分布频数 $A_p (p=1,2,\dots,P)$ 和 A' ,令 A_{\max} 是 $A_p (p=1,2,\dots,P)$ 和 A' 中的最大值,取 A_p 为 A_{\max} 所对应的区间的速度值;(3)将窗口中心点的值设置为 V'_{ij} ,通过式(1)可进行奇异点的剔除和缺测点的填补。

$$V'_{ij} = \begin{cases} 0 & V_{ij} \neq 0, A' \leq K_1 \\ V_{ij} & V_{ij} \neq 0, A' > K_1 \\ V_p & V_{ij} = 0, A_{\max} \geq K_2 \\ V_{ij} & V_{ij} = 0, A_{\max} < K_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, K_1 为奇异点剔除的阈值, K_2 为缺测点填补的阈值,无回波数据则用“0”代替。

当窗口中心点的原值 V_{ij} 不为 0 时,表示该点为有效回波点,则应该判断是否为奇异点,当 $A' \leq K_1$ 时,则说明该点出现的次数很少,以至于小于 K_1 次,则认为该点为奇异点,应予以剔除。当 $A' > K_1$ 时,说明该窗口周围有许多与之数值接近的回波点,此时该值具备区域统计特征,则认为是有效的回波点,予以保留。当窗口中心点原值 V_{ij} 为 0 时,则需判断是否要进行缺测填补。当 $A_{\max} \geq K_2$ 时,说明该窗口里有许多的有效点,大于给定的阈值,则可将 A_{\max} 对应区间的中心点的值 V_p 赋给 V_{ij} ;当 $A_{\max} < K_2$ 时,表示窗口区域内无回波或者有少量的回波,此时该点无需填补。

“ K -邻域频数”算法利用同一物体回波在同一距离内具有统计特性,但雷达的空间分辨率因不用型号而有所改变,因此参数 (U, V, P, K_1, K_2) 的选择严重影响着算法的效果。其中 K_1, K_2 参数的选取参考了郑佳锋^[21]提供的经验数值,分别取为 $K_1 = 3, K_2 = 4, P = 20$, 本文对窗口参数 U, V 进行多次试验,对比取不同的 U, V 值对噪声剔除和缺测填补的影响。

U, V 的值原则上与雷达的分辨率相联系,对于 SA 波段雷达来说,反射率因子的径向分辨率为 1 km,速

度和谱宽的径向分辨率为 0.25 km,方位分辨率为 1° ,当径向速度的 $U \times V$ 选取为 3×3 时,可计算在 50 km 处, $U \times V = 3 \text{ km} \times 2.6 \text{ km}$,统计这样大小的回波体,可以表达出它的统计特性,但一般风切变区域都比较小,因此窗口也不需要取大,通常反射率因子的 $U \times V$ 都取为 3×3 或者 5×5 。但雷达资料点面积元 $0.25 \text{ km} \times (1^\circ \times \pi \times r/180)$ 会随着距雷达中心的距离 r 的增加而增大,同时,方位向上的弧长也会随着 r 的增加而增大,这直接影响了频数在径向上和切向上的平衡性,也会使数据资料面积元取值有一些误差。因此,本文使用“拟合窗口”的概念。基本思想为:随着距雷达中心的距离的增加,适当增加“拟合窗口”在径向方向上包含的数据点数 U ,适当减少“拟合窗口”中在切向方向上包含的数据点 V ,同时,为保证取值精度^[23]在离雷达中心远近都保持一致,即拟合窗口的面积应该基本不变,所以 $U \times V$ 的值应该为一个常数。经过多次试验,再结合相关实际情况,决定拟合窗口的参数选择如表 1 所示。

表 1 K -邻域频数法拟合窗口参数

参数	$0 \leq r < 30 \text{ km}$	$30 \text{ km} \leq r < 45 \text{ km}$	$45 \text{ km} \leq r < 90 \text{ km}$	$90 \text{ km} \leq r < 150 \text{ km}$
U	5	6	7	9
V	9	8	7	5

2 风切变识别算法

2.1 直接差值滤波法

直接差值滤波法就是用差值法计算径向切变和切向切变,然后合成得到合成切变^[20]。

径向切变 R_s 为

$$R_s = \frac{V(r, \theta) - V(r - \Delta r, \theta)}{\Delta r} \quad (2)$$

其中: V 为雷达径向数据, θ 为方位角, Δr 为径向分辨率, $V(r, \theta), V(r - \Delta r, \theta)$ 为同一方位角上不同距离圈上的相邻两个径向速度数据。

切向切变 A_s 为

$$A_s = \frac{V(r, \theta) - V(R, \theta - 1^\circ)}{A(\theta)} \quad (3)$$

其中: $A(\theta)$ 为不同距离圈的弧长, $V(r, \theta), V(R, \theta - 1^\circ)$ 为同一距离圈上不同方位角上的相邻两个方位速度数据。

计算得到的 R_s 和 A_s 包含噪声,会对其得到的 R_s 和 A_s 进行滑动平均处理,采用矩形窗的形式,这个矩形窗口一般采用 3×3 进行数据处理。合成切变是由径向切变和切向切变合成而得,公式为

$$C_s = \sqrt{(R_s)^2 + (A_s)^2} \quad (4)$$

2.2 最小二乘法

对于径向风切变 R_s ,在同一条径向上选取长度为

M 的识别区域,窗口有 m 个距离库: $(v_{i,j}, r_{i,j}), (v_{i,j+1}, r_{i,j+1}) \cdots (v_{i,j+m}, r_{i,j+m})$, 其中 $v_{i,j+m}$ 表示识别区域中第 m 个距离库的径向速度, $r_{i,j+m}$ 表示第 m 个点与雷达中心的距离。最小二乘法计算风切变的方法如下所示。

设线性回归方程为

$$v^* = a + br \quad (5)$$

其中: a 为初始值, b 为斜率, r 为距离, v^* 为识别区域速度估计值。

则估计值与预测值的误差为

$$\delta_i = v_i - v_i^* = v_i - a - br_i \quad (6)$$

由最小二乘法原理可得,使式(6)的误差平方的和最小。即:

$$D = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (v_i - a - br_i)^2 \quad (7)$$

分别对 a, b 求偏导并令其等于 0, 即:

$$\frac{\partial D}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n v_i - a - br_i = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial D}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (v_i - a - br_i) r_i = 0$$

得到:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n v_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (9)$$

如图 1 所示, A, D 两点之间的径向切变值是两点径向速度差与两点间总长度 ΔR 之比。斜率 b 为 $(v_D - v_A)$ 与两点间距离的比值。则一维径向切变值为

$$R_s = \frac{\Delta v}{\Delta R} = \frac{b \Delta r}{\Delta r + L_R} \quad (10)$$

式中 L_R 是雷达径向分辨率。

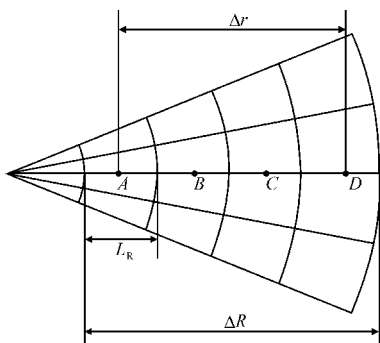


图 1 一维径向风切变原理示意图

对于切向切变 A_s , 在离雷达中心点相同距离的径向圆周上选取长度为 N 的识别区域, 识别区域里有 n 个资料点, 即为 $(v_{i+1,j}, r_{i+1,j}), (v_{i+2,j}, r_{i+2,j}) \cdots (v_{i+n,j}, r_{i+n,j})$, 其中, $v_{i+n,j}$ 为第 n 点的径向速度, $r_{i+n,j}$ 为第 n 点与雷达中心点的距离。再使用最小二乘法计算得到:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n v_i \theta_i}{\sum_{i=1}^n \theta_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n \theta_i^2} \quad (11)$$

如图 2 所示, 同一探测距离上的 A, B 两点的切向切变为

$$A_s = \frac{v_B - v_A}{r \Delta \theta + r \frac{\pi \times \theta_R}{180}} \quad (12)$$

其中: $\Delta \theta$ 为弧度, θ_R 为雷达角度分辨率。

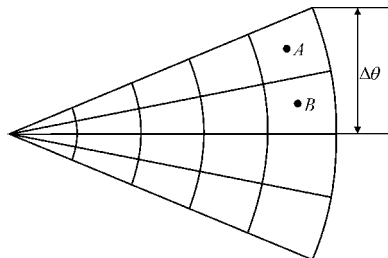


图 2 一维切向风切变原理示意图

由最小二乘法计算可得到的斜率:

$$b = \frac{v_B - v_A}{r \Delta \theta} \quad (13)$$

所以一维切向风切变值 A_s 为

$$A_s = \frac{\Delta v}{r \Delta \theta} = \frac{b \cdot r \Delta \theta}{r \Delta \theta + r \frac{\pi \times \theta_R}{180}} \quad (14)$$

最小二乘法的二维合成切变定义与直接差值滤波法定义相同, 公式为

$$C_s = \sqrt{(R_s)^2 + (A_s)^2} \quad (15)$$

2.3 改进的最小二乘法

在计算径向切变和切向切变时, 选取不同的识别区域, 会对风切变识别的结果及误差有一定的影响。对于径向切变, 随着距离的增加, 若径向上识别区域内包含的数据点 m 过小, 则会使最小二乘拟合失去意义, 并且会导致线性拟合误差增大, 对径向风切变识别量级不准确。为了减少线性拟合的误差, 应当适量增加径向上识别区域内的数据点数 m 。对于切向切变, 数据点面积元有相同的圆心角和 Δr , 那么区域随着距雷达中心点距离的增加, 边界的弧长也在增加, 识别区域的弧长也会增加, 如果切向上识别区域内的数据点 n 过多, 则拟合结果会逐渐偏离线性。为了减少线性拟合的误差, 应当适量减少切向上识别区域内的数据点数 n 。

由于提取的切变数据是径向切变和切向切变合成的, 为提升风切变的拟合结果不随着距离的增加而发生变化, 径向方向的数据点数和切向方向上的数据点数的乘积逼近为一个常数。即

$$m \times n = t \quad (16)$$

式中, m 表示径向上的识别区域的数据点数, n 为切向上的识别区域的数据点数, t 为一常数。在选取识别

区域的 m 、 n 值时,先是参考了魏耀等^[14] 对于距离的选取,并结合一些相关实验,最终确定识别区域的选取如表 2 所示。

表 2 径向切变和切向切变识别区域资料点数 m 、 n 选取

点数	$0 < r \leq 30$ km	$15 \text{ km} < r \leq 45$ km	$45 \text{ km} < r \leq 90$ km	$90 \text{ km} < r \leq 150$ km
m	5	7	8	9
n	9	7	6	5

3 风切变识别结果分析

3.1 数据来源

2008 年 7 月 23 日用新一代天气雷达(CINRAD/SA)观测阜阳的一次龙卷天气过程的数据,CINRAD/SA 雷达的最大可测半径为230 km,库长为250 m。

3.2 K -领域频数法结果分析

图 3 分别为 2008 年 7 月 23 日 12:10(北京时,下同)雷达径向速度图像、基于 3×3 窗口的滤波与缺测

填补回波、基于拟合窗口的噪声去除及缺测填补回波。图 3(a)的 A 区域中,有一些孤立点,这是由于雷达性能或探测区域内有干扰所致;图 3(b)的 A 区域中,对孤立点进行一些滤除,但因为所选窗口较小,并不能全部滤除孤立点;图 3(c)的 A 区域中,算法滤除一些孤立点,但可以看到有切向方向上的细长回波,这与算法中的填补缺测阈值 K_2 有关,若 K_2 值过小,本应该被剔除的噪声被误判为有效值从而进行重新填补,就有了图中所示的细长回波。图 3(a)的 B 区域中,两个距离库的风速与周围风速存在明显差异,且在天气过程中,两次的体扫时间点都未发现该区域的异常,所以判定为奇异点,应该剔除;图 3(b)的 B 区域中,奇异点未被剔除,因为所选的窗口过小,并不能剔除该奇异点;图 3(c)的 B 区域中,因为所选窗口大,窗口内具有统计特性的频数占据较大权重,故能滤除奇异点。在图 3(a)的 C 区域中,存在了许多缺测点,在实际应用中要对缺测点进行填补;在图 3(b)的 C 区域中,因为所选的窗口过小,缺测填补的效果较差;图 3(c)的 C 区域中,因为选取了可随离雷达中心距离远近而改变的窗口,能有效地对缺测数据填补。

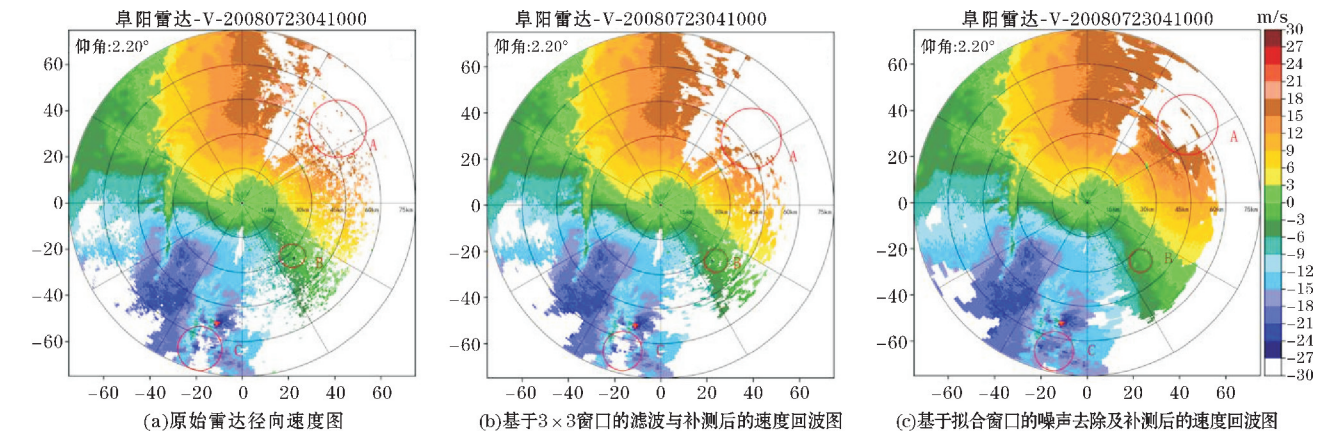


图 3 2008 年 7 月 23 日 12:10(北京时) 雷达径向速度图像

3.3 风切变识别结果分析

2008 年 7 月 23 日阜阳发生一次龙卷天气过程,周围地区十多个乡镇遭遇雷电大风天气并造成灾害。以下对这次天气过程进行分析。

图 4 为阜阳 2008 年 7 月 23 日 12:10、13:07 的多普勒天气雷达回波图及低空风切变识别结果图。从 2.20° 仰角雷达回波图(图 4a)、径向速度图(图 4c)中可知,在西南 55 km 附近的反射率强度最大可达 50 dBZ,径向回波速度超过 -15 m/s ,从 2.24° 仰角雷达回波图(图 4b)、径向速度图(图 4d)中可以看到,在东南 45 km 附近的反射率强度最大 50 dBZ,径向速度图中有正负速度出现,正速度的极值可达 18.5 m/s ,负速度

的极值可达 -17 m/s ,在这两个区域内能明显地看出风速存在变化。

图 4(e)的 A 区域中,在距雷达中心 10 km 范围内存在风切变误识别,这是由于雷达所探测的风速资料并非是连续的而是离散的,其风速变化的最小阈值为雷达固有的多普勒速度分辨率。在距离雷达较近区域,相邻径向间的弧长较小,此时若采用直接差值滤波法或窗口较小的最小二乘法进行风切变识别,那么单个多普勒速度分辨率风速的变化就可以在切向上反演出较大的切变强度值,从而造成风切变的误识别。图 4(f)的 A 区域中,虽然在距雷达中心 10 km 以内,减少了部分风切变误识别,但是 3×3 的识别区域相对较小,所能提取的区域风速特征与直接差值滤波法使用

的相邻径向风速区别甚微,虽比直接差值滤波法效果有一定改善但并未完全滤除;图4(g)的A区域中,采用了随雷达中心距离远近变化的识别区域,可以看到,在A区域里可大大地改善由雷达资料分布特点而造成的误差。

图4(e)的B区域中,计算切变大值的原因与A区域相同,在这片区域,速度的幅值在很窄的区域内波动,由于距离雷达稍远,情况有所改善;图4(f)的B区域中,因所选识别区域过小,虽能剔除一些切变大值,但未完全剔除;图4(g)的B区域,采用随雷达中心距离远近变化的识别区域,这个区域的风切变误识别就基本消失。

图4(e)的C区域中,可以看到,周围有零散值分布,并且在识别边缘上效果较差;在图4(f)的C区域中,相较于图4(e)来说,使用3×3识别区域,效果要好

一些,但是周围的边缘,还是存在很多零散切变值;在图4(g)的C区域中,能明显看到区域内少了很多切变值,切变最大值为 $25\text{ m}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-1}$,切变最大值所在区域与径向速度图4(c)中的切变位置一致;

对比图4(f)和图4(g),使用不同的识别区域,会得到不同的结果,在距雷达中心附近,可以看到选用随雷达中心距离远近变化的识别区域得到的结果要好于选用3×3的识别区域得到的结果。

在图4(h)的D区域,在径向速度图中有一条带状回波,识别了风切变,切变值可达到 $7\text{ m}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-1}$;图4(h)的E区域,切变值最大区域与径向速度图中切变位置一致。从图4(e)、图4(f)、图4(g)来说,改进的最小二乘法在距雷达中心附近10 km内的风切变误识别、切变边缘的识别效果都是优于直接差值滤波法的。

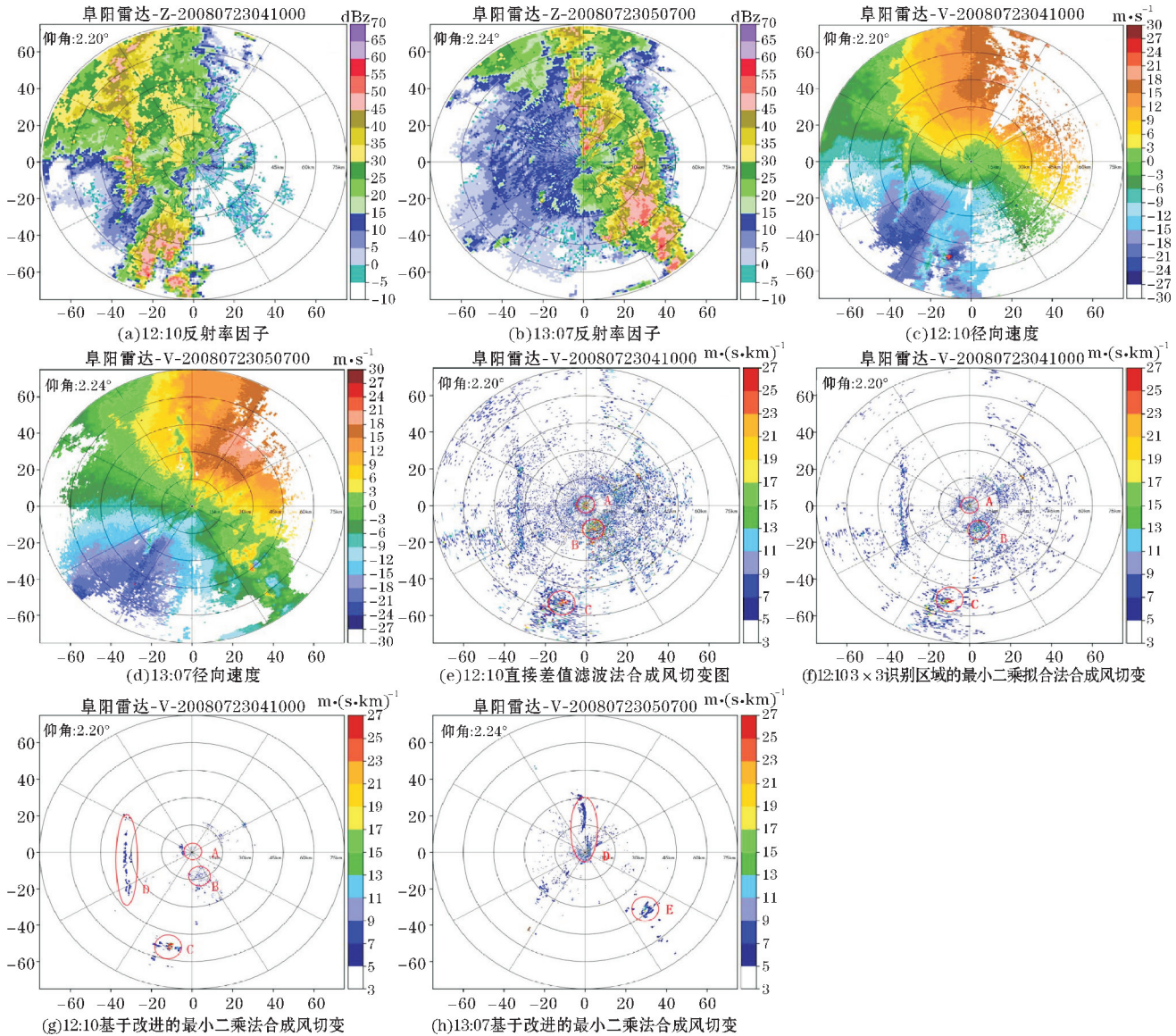


图4 2008年7月23日12:10、13:07多普勒天气雷达回波图像及低空风切变识别结果(显示阈值为 $5\text{ m}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-1}$)

表 3 列出了文中所用的风切变识别算法的一些适用情况及识别效果。

表 3 风切变识别算法的对比

识别算法	优点	缺点
直接差值滤波法	方法简单,能识别一些风切变	距雷达中心10 km内的误识别较多,边缘识别不好,准确性不高
最小二乘法	识别风切变能力较优,距雷达中心10 km内的误识别较少,准确性较高	计算复杂,用时较多,需要选取合适的识别区域

4 结束语

研究了利用 CINRAD/SA 雷达基数据识别低空风切变的方法,并通过阜阳一次龙卷过程的实例验证了低空风切变识别算法的有效性。

(1)对雷达径向速度资料进行质量控制,能有效地对噪声数据剔除以及对缺测点、缺测区域有效的填补。在“K-领域频数”噪声滤除及缺测填补的基础上根据雷达数据资料扇形分布的特点使用了“拟合窗口”,对一些相关参数进行了试验验证。结果证明,使用3×3窗口能滤除一些孤立点,但效果欠佳,并且对于缺测点和大块缺测区域,填补效果较差;使用拟合窗口,能滤除相对较多的孤立点和奇异点,并且对于缺测点和大块缺测区域填补效果较优。

(2)使用直接差值滤波法和最小二乘法都能直观地观测出风切变,但直接差值滤波法在雷达中心附近有很多风切变误识别,并且切变边缘识别效果不好,准确性不高,而使用最小二乘法的效果优于直接差值滤波法。选取不同的识别区域时,选取不一样的数值,对风切变识别有不同的结果。首先采用最小窗口的3×3的识别区域,能改善雷达中心附近的风切变误识别,但使用3×3的识别区域的最小二乘法与直接差值滤波法对比,有一定的改善,但效果不是很明显。使用改进的最小二乘法,很大地改善了雷达中心附近的风切变误识别,并且,在切变边缘识别效果要更优于直接差值滤波法。所以,基于改进的最小二乘法算法在风切变识别效果、距雷达中心10 km左右的风切变误识别、切变边缘识别等方面更优,与雷达径向速度图中风切变的位置相吻合。

(3)需要特别指出的是,本文所使用的径向速度与真实的风速有区别。所以,所使用的方法可以有效识别径向风速的风切变,但与真实的风切变还有一些

区别。

参考文献:

[1] 王秀春,顾莹,李程. 航空气象[M]. 北京:清华大学出版社,2014:139-149.

[2] 黄玲光. 基于雷达数据的强对流天气的识别算法及实现[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

[3] 俞飞,姬鸿丽. 低空风切变的分析与预报[J]. 四川气象,2001(3):18-19.

[4] 彭笑非. 低空风切变对飞机进近着陆的影响分析[J]. 科技、经济、市场,2010(7):34-36.

[5] 陈一峰,杨小丽. 机载激光雷达风切变探测研究[J]. 红外与激光工程,2007(36):617-619.

[6] 赵丽艳. 基于多普勒天气雷达的风切变预警算法研究[D]. 天津:中国民航大学,2016.

[7] Uyeda H,Zrníc D S. Automatic Detection of Gust Fronts[J]. J. atmos. oceanic Technol,1985,3(1):672-679.

[8] Campbell S D,Olson S H. Recognizing Low-Altitude Wind Shear Hazards from Doppler Weather Radar: An Artificial Intelligence Approach [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1987,4(4).

[9] Boilley A,Mahfouf J F,Lac C. High resolution numerical modeling of low level wind-shear over the Nice-Cote d’Azur airport [C]. Proceedings of the 13th AMS Conference on Mountain Meteorology, 2008:11-15.

[10] Augros C,Tabary P,Anquez A,et al. Development of a Nationwide,Low-Level Wind Shear Mosaic in France [J]. Weather and Forecasting, 2013,28(5):1241-1260.

[11] 胡明宝,谈曙青,汤达章,等. 单部多普勒天气雷达探测低空风切变方法[J]. 南京气象学院学报,2000,23(1):113-118.

[12] 王珊珊. 多普勒天气雷达合成切变模块设计[J]. 科技信息,2007(18):82-83.

[13] 王楠,刘黎平,徐宝祥,等. 利用多普勒雷达资料识别低空风切变和辐合线方法研究[J]. 应用气象学报,2007,18(3):314-320.

[14] 魏耀,张兴敢. 多普勒天气雷达合成切变算法及改进方法的研究[J]. 电子与信息学报,2010(1):43-47.

- [15] Wang L, Wei M, Yang T. An advanced algorithm for recognizing wind shear using airborne Doppler weather radar[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229 (G14): 2547 – 2558.
- [16] 蒋立辉, 赵丽艳, 熊兴隆. 基于自适应多尺度的梯度搜索风切变预警算法研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(31): 1–6.
- [17] 赵静. 基于多普勒天气雷达数据质量控制的风切变算法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017.
- [18] 闫文辉, 黄兴友, 李盈盈, 等. 基于多普勒天气雷达的低空多普勒速度的切变识别算法研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(2): 253–261.
- [19] 梁海河, 张沛源, 葛润生. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(5): 591–599.
- [20] Harris F I, Glover K M, and Smythe G R. Gust front detection and prediction[C]. Preprints 14th conference on Severe Local Storms, Bulletin of the American Meteorological Society, Boston, 1985: 342–345.
- [21] 郑佳锋. 新一代天气雷达阵风锋识别算法研究[D]. 成都: 成都信息工程学院, 2013.

Research on Wind Shear Recognition based on Weather Radar

XIAN Lin¹, ZHOU Ye², GAO Xia², WANG Haijiang¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Aviation Industry Corporation of China Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214000, China)

Abstract: Wind shear is an important factor affecting aviation flight and landing safety. In order to improve the identification effect of wind shear, the “*K*-neighborhood frequency” method is used to control the quality of weather radar data. This paper discusses the effect of window size on the data results for different distance libraries. The results show that the quality control using multiple windows can effectively eliminate the noise data and fully fill the missing points and areas. Secondly, the recognition area of the least square method is improved, and it has a good performance in each area of the radar coverage. The direct difference filtering method and the improved least square method are used to identify the wind shear of an example of a tornado process in Fuyang area. Compared with the recognition results of the two methods, it is found that the least square method has a lower error recognition rate in the area within the 10 km of the center of the radar, and the method can also accurately identify the occurrence of wind shear in the area far away from the radar.

Keywords: wind shear identification; least squares method; Doppler weather radar; *K*-neighborhood frequency method