

文章编号: 2096-1618(2017)03-0269-07

# 龙卷过程中雷达合成切变产品的分析

赵 亮

(中国民用航空飞行学院广汉分院, 四川 广汉 618300)

**摘要:**低空风切变是飞机起飞和着陆时最重要的危险因素,龙卷是低空风切变的一种,是由雷暴云底伸展至地面的漏斗状云产生的强风涡旋,龙卷位置和强度的识别对于飞行安全的保障有重要意义。使用最小二乘法根据多普勒天气雷达径向速度信息计算合成切变,进而对龙卷过程中的合成切变产品进行分析,得出以下结论:合成切变产品有助于识别龙卷所在位置,并能定量给出龙卷所在位置的风切变值。

**关键词:**天气雷达;龙卷;最小二乘法;合成切变

**中图分类号:**TN959.4

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2017.03.007

## 0 引言

根据国际民航组织的统计,1979–1989年发生的飞行事故中,30%与天气有关<sup>[1]</sup>。这些天气主要包括:雷暴、恶劣能见度、冰雹、大风或龙卷等。龙卷是一种由雷暴云底伸展至地面的漏斗状云产生的强风涡旋,发生龙卷时最大中心风速可能超过140 m/s<sup>[2]</sup>,是台风近中心最大风速的几倍。龙卷尺度较小,达到地面时的直径一般小于1 km;龙卷生消迅速,生存周期为十几分钟到几小时,但其破坏力惊人,过境时甚至能够卷起汽车、飞机等。

龙卷发生时对应着很强的低空风切变,美国国家研究委员会给出了风切变的定义。风切变表示距离相近的空间两点之间平均风矢量的差,即在同一高度或不同高度段范围内风向或(和)风速的变化。风切变可以分为3类:水平风的垂直切变;水平风的水平切变;垂直风的切变。它们都表示两点之间风速或(和)风向的变化。对飞行产生重要影响的主要是低空风切变。航空气象学中,低空风切变是指在高度600 m以下的风切变<sup>[3]</sup>。文献[4]给出国际民航组织采用的低空风切变强度等级见表1。超过0.1 s<sup>-1</sup>的垂直切变会对飞行产生威胁,第二类风切变在即26×10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>以上时会威胁到飞行安全<sup>[4]</sup>。如果天气雷达能够定量探测到风切变区域,则有利于保障飞机起降和飞行安全。但是,由于风切变持续时间短、尺度小、强度大,从而导致对风切变的探测和预报较难。

多普勒天气雷达既有反射率因子产品,还有反映风场变化的径向速度产品。基于径向速度生成的合成

切变产品能够反映出大气流场的不均匀,也可以表示一定尺度范围内的低空风切变现象。合成切变产品的计算方法可以分为:直接计算差值滤波法和最小二乘法拟合两类<sup>[5]</sup>。Harris等<sup>[6]</sup>在1985年最先提出第一类方法,首先计算一维径向和切向风切变,再将二者通过求平均和滤波的方式合成二维风切变,这是早期机载低空风切变预警系统的基础。1996年,德国Magnetron雷达公司生产的雷达包含计算一维、二维、三维风切变场的软件系统。1998年,美国的WSR-88D雷达提供了二维风切变软件<sup>[7]</sup>。中国自20世纪90年代开始布网的敏视达公司生产的新一代天气雷达采用了基于美国新一代天气雷达的合成切变算法<sup>[8]</sup>。胡明宝等<sup>[9]</sup>根据第二类方法定量分析了机场附近的低空风切变。王珊珊等<sup>[10]</sup>在第一类方法的基础上,研究了锋线的自动识别方法。魏耀等<sup>[5]</sup>提出一种改进的最小二乘法计算合成切变,该方法结合雷达回波沿径向的分布特点,选取了随探测距离改变的“分析窗口”,对径向切变和方位切变的速度点做线性拟合,分别得到径向切变和方位切变,再组成合成切变,并对直接计算差值滤波和最小二乘法进行了对比并指出:最小二乘法计算的合成切变在定位精度、边缘识别能力等方面优于直接插值滤波法。魏鸣等<sup>[11]</sup>利用最小二乘法线性拟合优势,选择适于机载雷达参数的分析窗口,对多个实例进行了识别分析,为机载雷达风切变识别及预警提供了更好的依据。

雷达低仰角扫描的径向速度可近似认为是风场在水平面上的径向投影,根据某个仰角计算出的合成切变可认为主要是水平风的水平切变。

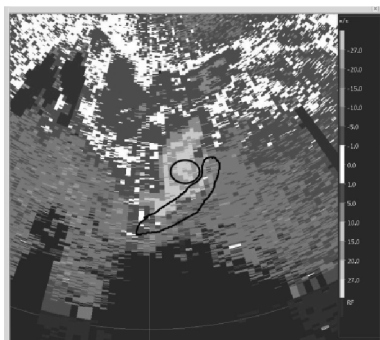
首先对速度数据进行数据质量控制,然后采用魏

耀等提出的改进的最小二乘法计算合成切变,并以图像形式输出,然后,对一次典型龙卷过程的合成切变特征进行分析,说明龙卷发生过程中对应的合成切变特征。

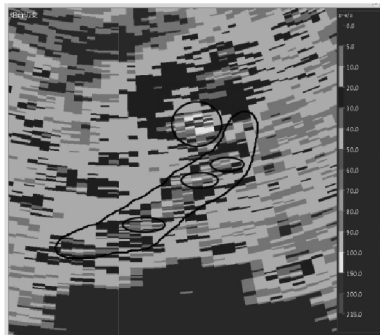
## 1 径向速度数据质量控制

速度模糊指当实际目标物的径向速度超过了雷达能够不模糊测量的最大值时,就会以一种速度相反的值显示在雷达回波图像上,且出现速度模糊的边界表现为正负速度最大值之间的跳变。如果不做速度退模糊处理,则在速度模糊边界会产生很大的合成切变值。如图1所示,图1(a)表示存在速度模糊的径向速度,图中圈出的小的黑色区域内正速度模糊为了负速度,圈出的细长的黑色区域表示正常的风速变化,图1(b)表示根据图1(a)得到的合成切变产品,对应速度模糊的小的黑色区域位置表现为较大的风切变值。

噪声点也可能导致较大的切变值。而噪声点和速度模糊产生的较大切变值,并不对应着真实的风切变,所以,在进行合成切变计算之前,为了减轻噪声点和速度模糊对合成切变产品的影响,需要对径向速度数据先做质量控制。质量控制主要包括两方面的内容:消除噪声点和速度退模糊。



(a) 存在速度模糊的径向速度



(b) 合成切变图

图1 速度模糊及其对应的合成切变示意

### 1.1 消除噪声点

王佑兵等<sup>[12]</sup>指出:噪声大多以孤立点或细线的方式出现,可以采用下式查找噪声点:

$$P_x = N/N_{\text{total}} \quad (1)$$

式中, $N_{\text{total}}$ 代表以距离库 $X$ (滤波点)为中心的 $n \times n$ 个窗口内距离库的个数( $n^2$ )。 $N$ 表示窗口内速度有效的距离库个数。如果 $P_x$ 小于一个给定的阈值(缺省为75%),则认为点 $X$ 是孤立的噪声点,采用窗口为 $n \times n$ 的二值中值滤波对其进行处理,滤波窗口不宜开得太大,一般采用3或5点即可,文中取为 $3 \times 3$ 。中值滤波法的基本原理如下:对窗口内 $n^2$ 个数据按照从大到小(或从小到大)的顺序排列,取中间值作为滤波点 $x$ 的数据值。

### 1.2 速度退模糊

速度退模糊首先要根据速度场的连续性查找速度模糊区域,然后根据模糊速度和真实速度之间的对应关系恢复出目标物的真实径向速度。

采用Zhang Jian等<sup>[13]</sup>提出的二维多路自动速度退模糊算法退速度模糊。

二维多路自动速度退模糊算法该算法的基本思路如下<sup>[14]</sup>。

#### 1.2.1 查找弱风区

径向速度图上的零速度线附近不会模糊。在零径向速度线附近两侧,弱的流入(流出)会出现转变,通过识别正负速度转换区即可定位弱风区。假的零速度线出现在速度模糊区内的风速持续增大时,由于此时的零速度线与周围环境风场差异过大,很容易根据经验排除此时的速度是错误的。就可以根据弱的流入流出速度来设定门限,由此选出正确的弱风区。

#### 1.2.2 速度退模糊处理

速度退模糊主要根据风场变化的连续性原则查找模糊度速度点。查找时需设定一个阈值 $T_v$ ,如果雷达观测到的某一点的速度值为 $V_t$ ,参考速度为 $V_a$ ,那么当 $|V_t - V_a| \leq T_v$ ,则认为 $V_t$ 为不模糊的正确点;如果 $|V_t - V_a| > T_v$ ,则认为 $V_t$ 可能出现模糊,根据公式(2)和(3),选择合适的正整数 $n$ ,使得 $|V - V_a| \leq T_v$ 。

$$V = V_t - 2nV_N \quad V_t > 0 \quad (2)$$

$$V = V_t + 2nV_N \quad V_t < 0 \quad (3)$$

式中, $V$ 表示退模糊后的速度值, $V_N$ 表示雷达对应的最大不模糊速度。

第一步完成后,为获取初始参考点集,先对弱风区内的速度做退模糊,然后再沿切向和径向做退速度模糊处理。

## 2 最小二乘法计算合成切变的原理

### 2.1 最小二乘法原理

速度数据处理过程中,噪声会对径向速度的估计产生影响。为了在计算风切变时尽可能避免这些影响,采用最小二乘法计算。其原理:设有一组随机数 $(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_n, x_n)$  要求取通过 $n$ 组数据的一根最好的直线,则该直线方程为

$$y^* = a + bx \quad (4)$$

如果用某种方法把式中 $a$ 和 $b$ 的值确定下来,则可根据 $x$ 确定 $y$ 值。由式(4)确定估计值为 $y_i^*$ 与实测值 $y_i$ 之间的误差为

$$\delta = y_i - y_i^* = y_i - a - bx_i \quad (5)$$

最小二乘法的原理,就是使拟合直线的上述误差的平方和达到最小,即:

$$D = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2 \quad (6)$$

达到最小。为此,必须满足:

$$\frac{\partial D}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0 \quad (7)$$

和

$$\frac{\partial D}{\partial b} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) x_i = 0 \quad (8)$$

由以上两式,可以求出 $a$ 和 $b$ 的值,从而确定误差平方和达到最小时的直线方程。可以证明,直线斜率 $b$ 可以表示为

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

### 2.2 径向切变

计算径向切变时,首先选择一个计算的“分析窗口”,窗口一般为 $300 \sim 3000 \text{ m}^{[15]}$ 。假设窗口取值为 $n$ 个(必须是同一径向上的点,而且是相邻的点)。 $(v_1, r_1) \dots (v_i, r_i) \dots (v_n, r_n)$  ( $v_i$ 为窗口中第 $i$ 个点的径向速度, $r_i$ 为第 $i$ 个点与雷达之间的距离)。

由上述的原理分析:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n v_i r_i}{\sum_{i=1}^n r_i \sum_{i=1}^n r_i - n \sum_{i=1}^n r_i^2} \quad (10)$$

考虑到某一点的数据实际上是以该点为中心的采样体积内的平均值,该体积在径向方向上有一定的深

度(称为距离库长,文中所用雷达数据的距离库长为 $0.25 \text{ km}$ )。由图2可知, $A$ 点和 $C$ 点的径向速度的径向切变为 $(V_C - V_A)$ 值和 $A, B, C$  3个点的距离库总长度之比。按照(10)式计算的斜率 $b$ 表示 $(V_C - V_A)$ 与 $A$ 和 $C$ 两点之间距离之比,所以,径向速度切变值应为<sup>[5]</sup>

$$R_s = \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{\Delta v}{\Delta R} = \frac{b \cdot \Delta r}{\Delta r + \text{距离库长}} \quad (11)$$

式中, $\Delta r$ 表示 $A$ 点和 $C$ 点所对应距离库的中心点之间的距离; $\Delta R$ 表示 $A, B$ 和 $C$  3个距离库的总长度,如图2所示。

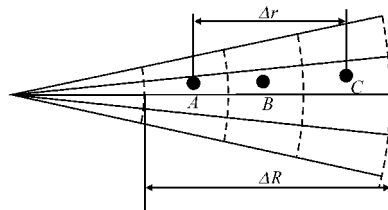


图2 径向切变两点距离示意图

### 2.3 方位切变

方位切变在计算时,首先在同一探测距离圈上选择一个“分析窗口”,窗口的大小 $n$ 表示包括 $n$ 个资料点, $(v_1, \theta_1) \dots (v_i, \theta_i) \dots (v_n, \theta_n)$ ,  $\theta_i$ 为窗口内第 $i$ 个点弧度表示的方位角, $V_i$ 为窗口内第 $i$ 个点的径向速度。

拟合曲线的斜率 $b$ 可计算如下<sup>[5]</sup>:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n v_i \theta_i}{r \left( \sum_{i=1}^n \theta_i \sum_{i=1}^n \theta_i - n \sum_{i=1}^n \theta_i^2 \right)} \quad (12)$$

方位切变两点方位差如图3所示,每个点采样体积的大小与雷达天线的波束宽度和距离库长度有关,而速度表示以某点为中心的采样体积内的平均值。同一探测距离上 $A, B$ 两点的方位切变为

$$AZ_s = \frac{V_B - V_A}{r \cdot \Delta \theta + \frac{\pi r \times \theta^\circ}{180^\circ}} \quad (13)$$

式中, $r$ 表示 $A$ 点离雷达位置的距离, $B$ 点离雷达位置的距离与 $A$ 点相同, $\Delta \theta$ 表示 $A$ 点和 $B$ 点所在距离库的中心方位差, $\theta$ 表示雷达径向速度的角度分辨率,文中所用雷达数据的角度分辨率 $1^\circ$ 。

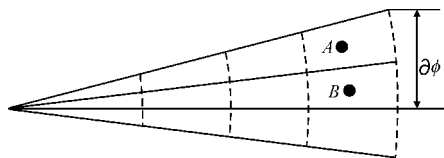


图3 方位切变两点方位差示意图



最小二乘法求得的斜率  $b = (V_B - V_A)/(r \cdot \Delta\theta)$ , 不是真正意义上的方位切变。径向速度的方位切变应修改为

$$AZ_s = \frac{\partial V}{r \partial \varphi} = \frac{b \cdot r \cdot \Delta\theta}{r \cdot \Delta\theta + \frac{\pi r \times \theta^\circ}{180^\circ}}$$

(14)

式中各参数的意义与前文相同。

2.4 合成切变

合成切变可根据径向切变和方位切变获得

$$C_s = \sqrt{(R_s)^2 + (AZ_s)^2}$$

(15)

2.5 选取分析窗口

借鉴参考文献,选取资料点的个数时尽可能使合成切变分析窗口的面积保持不变:

$$Nr \cdot Na = Cons$$

(16)

式中: $Nr$  表示计算径向切变时分析窗口包含的资料点数; $Na$  表示计算方位切变时分析窗口包含的资料点数; $Cons$  为常数。这样做的目的是使合成切变的拟合精度不随距离改变<sup>[5,6,11]</sup>。文中使用的拟合窗口的大小见表 1。

表 1 拟合窗口大小的选择

$r/\text{km}$	$0 \leq r < 30$	$30 \leq r < 45$	$45 \leq r < 90$	$90 \leq r < 150$	$150 \leq r < 230$
$Nr$	4	5	7	8	10
$Na$	10	8	6	5	4

由于所采用的径向速度产品有效数据范围为 230 km,所以窗口设置时最远距离为 230 km。

应用上述方法对整个仰角资料进行计算后,所得结果以平面位置显示的形式,用 16 个等级(0 ~ 200 E-4/s,E-4/s 表示  $10^{-4}/\text{s}$ )的彩色显示,即得到合成切变产品。

3 实例分析

2003 年 7 月 8 日 23:20-23:30(北京时间),安徽省无为县遭受强龙卷袭击,造成生命财产重大损失,无为县两个乡镇 16 人死亡 166 人受伤,大量房屋倒塌。从房屋遭到破坏的程度,可大致判定龙卷的级别为 F3,属于强烈龙卷<sup>[16]</sup>。该龙卷在径向速度图上表现为明显的小尺度涡旋。位于合肥的中国第一部新一代多普勒天气雷达(CINRAD-SA)记录了此次龙卷发生前、

发生过程中和发生后的反射率因子与径向速度的完整数据,在中国尚属首次。俞小鼎等详细分析了此次龙卷发生的天气背景和中气旋特征进行了,下面主要从合成切变产品的角度分析此次龙卷过程。

分析时采用 23:12-23:45 采集的 4 个雷达体扫(23:12,23:23,23:29,23:45)数据生成的合成切变产品,分析龙卷发生前、过程中和发生后低层各仰角的合成切变特征。因为龙卷对应的低空风切变通常只影响到最低的 3 个仰角,所以,只对最低的 3 个仰角(0.5°、1.45°和 2.4°)的合成切变产品进行分析。后面给出的所有图形的中心位置及龙卷发生时的位置,图 4、图 5 分别对应着 4 个体扫时刻,分别表示 4 个体扫时刻对应的 0.5°和 1.45°仰角时的径向速度图。

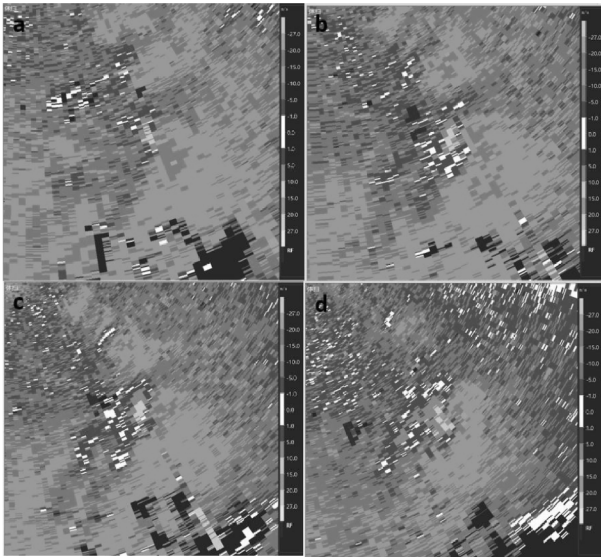


图 4 4 个体扫时刻对应的 0.5°仰角时的径向速度

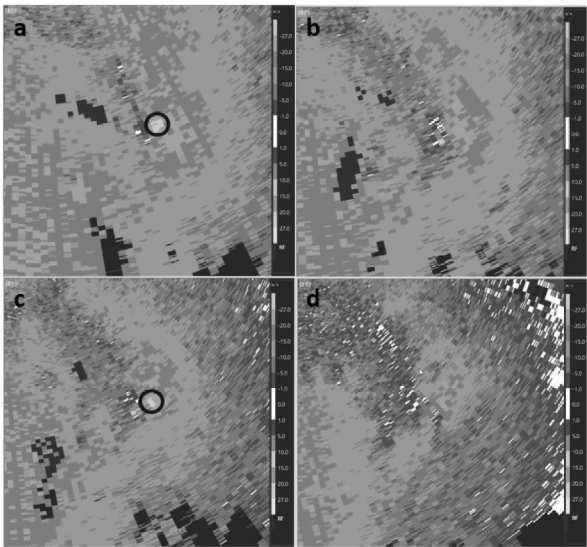


图 5 4 个体扫时刻对应的 1.45°仰角时的径向速度  
(黑色圈中存在速度模糊)

由图4和图5可以明显看出该时刻存在中气旋特征,而龙卷在速度场上的表现即中气旋。注意,1.45°仰角时的图5(a)、(c)中存在速度模糊现象,若不做退速度模糊处理,则会算出错误的较大合成切变值。图6表示2.4°仰角时4个体扫时刻的径向速度图,同样图6(a)、(c)中存在速度模糊。

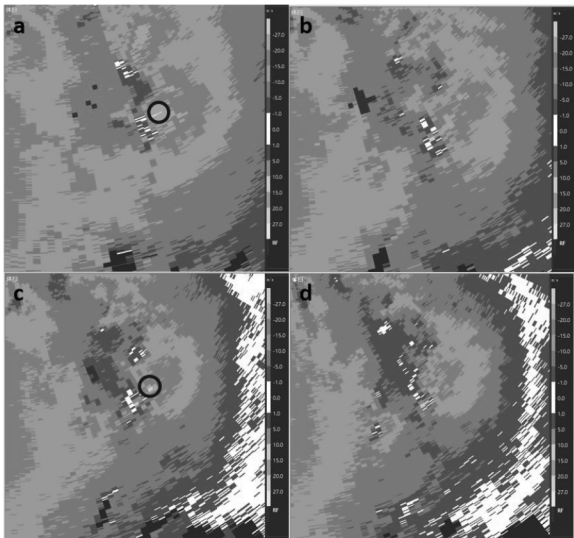


图6 4个体扫时刻对应的2.4°仰角时的径向速度图  
(黑色圈中存在速度模糊)

图7给出了图5(a)、(c)所对应的速度退模糊后的径向速度。速度模糊区域已经成功恢复为正确的速度值,退模糊后的最大速度达到-33 m/s。图8给出了图6(a)、(c)退速度模糊后的结果,退模糊后的最大速度达到-30 m/s。

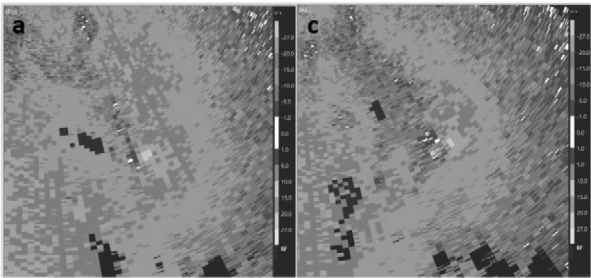


图7 1.45°仰角时退速度模糊后的径向速度

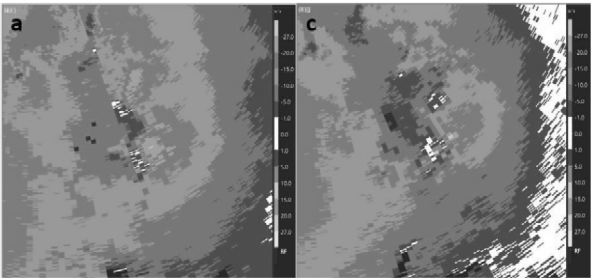


图8 2.4°仰角时退速度模糊后的径向速度

图9-图11是根据最小二乘法计算出的4个体扫时刻分别对应的最低3个仰角的合成切变产品,合成切变产品的单位是 $10^{-4}/s$ 。

龙卷发生的位置大概位于雷达153°方位,78 km左右的位置处,当雷达扫描仰角为0.5°,不考虑地球曲率时,该位置处对应的高度大概为680 m,所以其对应的切变为低空风切变。从0.5°仰角不同体扫时刻的合成切变产品可以看出:在龙卷发生前(23:12)和龙卷发生后(23:45)组合切变产品的数值基本小于 $70 \times 10^{-4}/s$ ,在龙卷发生过程中(23:23,23:29),合成切变值超过 $70 \times 10^{-4}/s$ 达到 $100 \times 10^{-4}/s$ 以上。

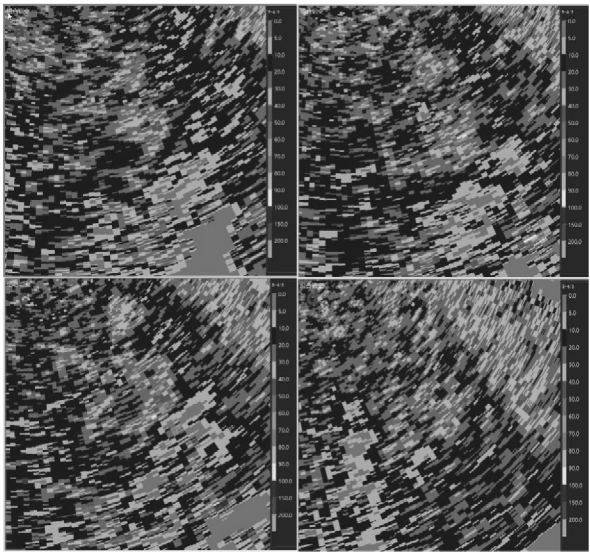


图9 4个体扫时刻0.5°仰角时的合成切变演变

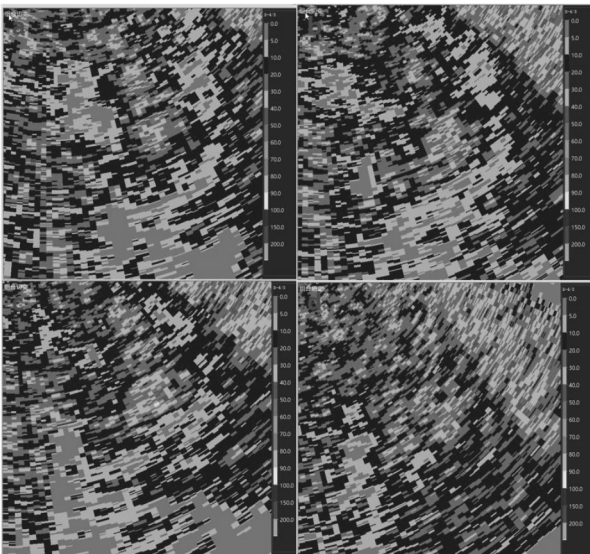


图10 4个体扫时刻1.45°仰角时的组合切变演变

表2给出了4个体扫时刻最低3个仰角的最大合成切变值,图12以图形方式给出了表2所示的结果。



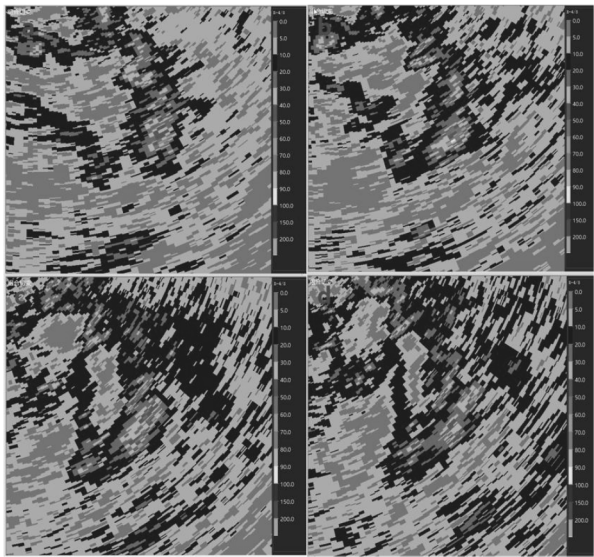


图 11 2.4°仰角的合成切变

表 2 4 个体扫时刻最低 3 个仰角的最大合成切变值			
体扫时间	0.5°最大切变/ (10 <sup>-4</sup> /s)	1.45°最大切变/ (10 <sup>-4</sup> /s)	2.4°最大切变/ (10 <sup>-4</sup> /s)
23:12	73	85	81
23:23	106	87	96
23:29	105	99	80
23:45	59	67	71

由表 2 可见:最大切变值出现在 0.5°仰角,值为  $106\times10^{-4}/\text{s}$ ,出现在龙卷发生过程中。从之前的速度场图像可以看出,龙卷发生时最大速度出现在 2.4°仰角(出现速度模糊),而合成切变最大的地方与风速最大值位置不一致,合成切变最大出现在 0.5 度仰角。

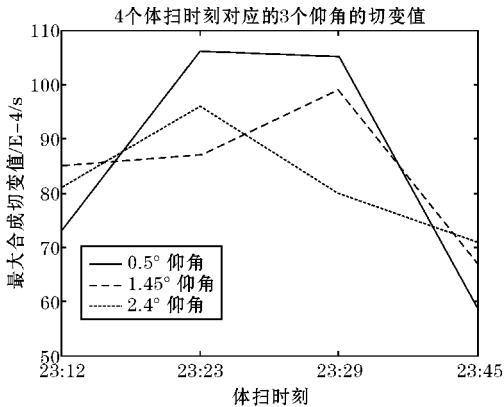


图 12 4 个体扫时刻最低 3 个仰角的最大合成切变

从图 12 中很容易看出:此次过程中,龙卷发生过程中,合成切变最大,且出现在最低的 0.5°仰角;龙卷发生过程中,合成切变值基本都大于  $90\times10^{-4}/\text{s}$ ;最低的 3 个仰角在在龙卷发生前后的合成切变值都有一个逐渐增大又减小的过程。

4 结束语

龙卷发生时伴随着强烈的低空风切变,合成切变产品有助于更精确地确定龙卷发生的位置和风切变的强度。利用多普勒天气雷达探测到的径向速度资料,基于最小二乘法生成了合成切变产品,并对数据中的速度模糊现象使用二维多路速度退模糊算法做了退模糊处理,生成的合成切变值更准确。另外,由于切变产品主要适用于低空探测,应取低仰角的 PPI 资料,所以采用了 0.5°、1.45°和 2.4°仰角的合成切变资料对一次典型的 F3 级龙卷发生前、发生过程和发生后的切变情况进行分析。结果表明:龙卷发生时对应着很强的合成切变,在龙卷发生前合成切变有逐渐增大的趋势,龙卷发生后合成切变值逐渐减小;龙卷发生时,0.5°、1.45°和 2.4°仰角的合成切变值基本都大于  $90\times10^{-4}/\text{s}$ 。

致谢:感谢中国民用航空飞行学院面上项目(J2016-48)对本文的资助

参考文献:

[1] 杨春风,王荣,李新泉. 影响航空飞行安全的气象要素探讨[J]. 现代农业科技,2010,(1).

[2] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. 气象学报,2012,(6).

[3] 郭虎道. 低空风切变对飞行的影响[J]. 四川气象,2001,(9).

[4] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社,2000:179-187.

[5] 魏耀,张兴敢. 多普雷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).

[6] 杜爱军. 多普勒雷达退速度模糊及风切变的仿真与识别[D]. 南京:南京信息工程大学,2016.

[7] WILSON F W. Divergence estimation by single-Doppler radar[R]. International Conference on the Aviation Weather system. 1989:112-114.

[8] 中国人民解放军总参谋部气象局. 多普勒天气雷达资料分析与应用[M]. 北京:解放军出版社,2000.

[9] 胡明宝,谈曙青,汤达章,等. 单部多卜勒天气雷达探测低空风切变方法[J]. 南京气象学院学报,2008,23(1):113-118.

[10] 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).

[11] 魏鸣,张明旭,张培昌,等. 机载雷达风切变识

别算法研究及在机场预报中的应用[J]. 大气科学学报,2014,(4).

[12] 王佑兵,万玉发. 雷达体扫反射率场的自动质量控制[J]. 气象科技,2006,34(5).

[13] Zhang Jian, Wang Shunxin. An automated 2D multipass Doppler radar velocity dealiasing scheme[J]. Atmos. Oceanic Techno. 1,2006,23: 1239-1248.

[14] 蔡亲波,颜琼丹. 二维多路多普勒雷达风场自动退模糊算法应用研究[J]. 气象科学,2009(10).

[15] 何建新,姚振东,李飞,等. 现代天气雷达[M]. 成都:电子科技大学出版社,2004.

[16] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,2006,(6).

# Analysis of Radar Composite Shear Products in the Process of Tornado

ZHAO Liang

(Guanghan Sub College Civil Aviation Flight University of China,Guanghan 618300,China)

**Abstract:** Wind shear is the most important risk factors for take-off and landing, the tornado is a low-level wind shear, it is a vortex of strong winds produced by funnel clouds extending from the bottom of the storm cloud to the ground, Identify the position and intensity of the tornado has important significance to protect the safety of the flight. In this paper, using the least square method to calculate shear combination according to the Doppler weather radar radial velocity information, Further analysis of combined shear features in the process of the tornado, draw the following conclusions: combined shear products help to identify the location of the tornado, and tornados' wind shear are given quantitatively.

**Keywords:** doppler weather radar; tornado; composite shear; least squares