

# 基于 VAD 技术的迭代法在实测多普勒速度缺测区域的填补研究<sup>\* 1</sup>

夏文梅<sup>1</sup> 徐 芬<sup>1</sup> 谢志清<sup>1</sup> 慕熙昱<sup>1</sup> 陈 楠<sup>2</sup>  
Xia Wenmei<sup>1</sup> Xu Fen<sup>1</sup> Xie Zhiqing<sup>1</sup> Mu Xiyu<sup>1</sup> Chen Nan<sup>2</sup>

1. 江苏省气象科学研究所, 南京, 210008

2. 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京, 211101

1. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China

2. AFIM, Nanjing 211101, China

2009-08-24 收稿, 2009-10-12 改回.

**Xia Wenmei, Xu Fen, Xie Zhiqing, Mu Xiyu, Chen Nan. 2011. An iterative filling method for the lacking area in the observational Doppler velocity field based on the VAD technique. Acta Meteorologica Sinica, 69(1):161-169**

**Abstract** The existence of the lacking region in the Doppler weather radar velocity field is one of the most important factors impacting the accuracy of velocity products. An iterative filling method based on the VAD technique is presented in detail under the assumption of the actual wind field of linear distribution. A filling test is conducted for the artificially created random discontinuous cumulative  $10^{\circ}$ – $180^{\circ}$  missing gap as well as the continuous cumulative  $10^{\circ}$ – $180^{\circ}$  gap according the type of lacking area, based on the observational Doppler data. The analysis shows that the method is suitable for the random discontinuous cumulative gap within  $180^{\circ}$  and the continuous cumulative gap up to  $110^{\circ}$ . The average absolute error is in about 2 m/s compared with the original data. The linear interpolation method and the iterative method are also compared with each other under the two methods' prerequisite conditions met concurrently. The results show that the accuracy of the two methods are creditable. Relative to the sensitivity in the positive and negative turn of velocity data in linear interpolation method, iterative method should have a broader application.

**Key words** VAD technique, Iterative method, Filling technique, Doppler velocity, Lacking region

**摘 要** 多普勒天气雷达径向速度场缺测区域的存在是影响速度二次产品算法精确度的重要因素, 在实际风场为线性分布的假设条件下, 文中详细介绍了一种基于 VAD 技术的迭代填补技术。在合理考虑迭代约束条件的情况下, 应用实测多普勒速度数据, 根据缺测区域类型随机制造非连续累积  $10^{\circ}$ – $180^{\circ}$  缺口的缺测区域和连续累积  $10^{\circ}$ – $180^{\circ}$  缺口的缺测区域进行填补试验。与原数据进行对比分析表明, 该方法适用于非连续累积缺口  $180^{\circ}$  以内的缺测区域以及连续累积缺口  $110^{\circ}$  以内的缺测区域, 平均绝对误差约在 2 m/s 以内, 填补效果良好。另外, 在同时满足线性插值填补法和迭代填补法的前提条件下, 对比结果表明两种方法精度可信度均较高, 相对于插值法对速度数据正负交替的敏感性, 迭代法适用范围更广。

**关键词** VAD 技术, 迭代法, 填补技术, 多普勒速度, 缺测区域

**中图法分类号** P412

## 1 引 言

在多普勒天气雷达探测大面积降水回波时, 降水回波区域中经常存在缺测的空洞区域, 缺测区域

的存在并不十分影响主观观测回波特征, 气象工作者可根据实况大致判断缺测区域是否存在降水回波, 但在利用计算机反演降水等定量算法中(王叶红等, 2006; 胡志群等, 2008), 缺测区域就成为影响算

\* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40665001、40475017)、中国气象局新技术推广项目(CMATG2008M39)。

作者简介: 夏文梅, 主要从事雷达气象研究。E-mail: njxiawm@sina.com

法反演效果的重要因素了。强度回波的缺测区域经常使降水估测算法出现较大误差,连续时段的缺测易造成回波跟踪算法的失败;速度回波的缺测区域降低以径向速度为地物识别算法的效率(刘黎平等, 2007),直接影响用径向速度反演平均散度和垂直速度等算法(Thomas, et al, 1998; Paul, et al, 1996; 夏文梅等, 2003; 胡志群等, 2007)的效果。为此人们在回波缺测填补技术上开展了一系列研究,关于回波强度信息缺测区域的填补技术国内外已做了大量研究工作,并已运用在雷达业务算法中,取得了良好效果。在速度信息填补技术方面,汪家慧(2002)用较高仰角的速度资料对相应的低仰角无回波区进行填补,但只适用于高低层风场一致的情况;梁海河等(2002)提出了  $k$ -邻域频数法来消除风场中的“噪声”和填补缺测,但其主要是针对缺测点;沃伟峰(2003)则采用线性插值技术与缺测区域相邻的数据通过线性插值的办法达到填补缺测区域的目的,但该方法只适用于连续缺测方位角小于  $8^\circ$  的情况;徐芬等(2007)采用逐点数据对称法来削弱回波缺失和距离折叠引起的误差,但该方法损失了部分有效数据,使得计算散度偏小。因此,研究开发适于业务运行的高效可靠的速度回波缺测区域填补技术就显得尤为重要。

VAD 技术是迄今为止从多普勒雷达测量的径向速度数据中提取风场信息使用最为广泛成熟的一种算法,已在业务中使用,本文提出了一种在假设线性风场条件下,基于 VAD 技术的迭代填补法,通过对南京 CINRAD/SA 雷达实测多普勒径向速度数据人为制造的缺测区域进行填补,并做效果和精度分析,给出该方法的适用范围。

## 2 基于 VAD 技术的迭代填补法

由 VAD 技术提取的风向、风速、散度等风场信息是在某一固定距离圈上对径向速度  $V_r(\theta)$  作谐波分析得到的结果,距离圈上  $V_r(\theta)$  数据局部区域缺测将会给计算结果带来误差,例如正速度区存在缺测,提取的辐合值会明显增加,反之如果是负速度区存在缺测,则辐散值会明显增大。当缺测缺口大于  $30^\circ$  或者累积的缺测区大于  $60^\circ$  的时候,对计算的水平散度有明显的影 响,因此为减少此类误差,需要设计合理的填补技术来填补径向速度缺测区域。

### 2.1 VAD 技术简介

在线性风场的假定条件下,由 VAD 理论可知

$$V_r(\theta) = u_0 \cos\theta \cos\alpha + v_0 \sin\theta \cos\alpha + \frac{1}{2}(u_x + v_y)r \cos\alpha + \frac{1}{2}(u_x - v_y)r \cos 2\theta \cos\alpha +$$

$$\frac{1}{2}(u_g + v_x)r \sin 2\theta \cos\alpha - V_f \sin\alpha \quad (1)$$

其中的  $\theta$  和  $\alpha$  分别是方位角和仰角,  $r$  为径向距离。当雷达低仰角扫描时,由于垂直速度  $V_f$  对多普勒速度  $V_r(\theta)$  贡献很小,可以忽略不计。因此对式(1)作谐波分析可得

$$\begin{cases} u_x + v_y = \frac{2}{Mr \cos\alpha} \sum_{i=1}^M V_{r_i} \\ u_0 = \frac{2}{M \cos\alpha} \sum_{i=1}^M V_{r_i} \cos\theta_i \\ v_0 = \frac{2}{M \cos\alpha} \sum_{i=1}^M V_{r_i} \sin\theta_i \\ u_x - v_y = \frac{4}{Mr \cos\alpha} \sum_{i=1}^M V_{r_i} \cos 2\theta_i \\ u_y + v_x = \frac{4}{Mr \cos\alpha} \sum_{i=1}^M V_{r_i} \sin 2\theta_i \end{cases} \quad (2)$$

$M$  是某一距离圈上有速度值点的总数,将某一距离圈的  $V_r(\theta)$  代入式(2),即可得到一组平均风向风速、散度项和形变项,即  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$ 。

### 2.2 迭代法实现步骤

在线性风场的条件下,假定雷达低仰角扫描某一距离圈存在缺测区域,定义该距离圈上  $V_r$  随方位角的分布为  $V_{r_0}(\theta)$  ( $V_{r_0}(\theta)$  包括有回波区部分  $V'_{r_0}(\theta)$  和无回波区部分  $V''_{r_0}(\theta)$ )。具体迭代步骤:

(1) 将  $V_{r_0}(\theta)$  代入式(2)得到一组平均风向风速、散度项和形变项,即  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$ 。将所求  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$  代入式(1)得到一组新的  $V_r$  随方位角的分布,定义其为  $V_{r_1}(\theta)$ ,  $V_{r_1}(\theta)$  中对应于  $V_{r_0}(\theta)$  中有回波的部分称为  $V'_{r_1}(\theta)$ , 对应于  $V_{r_0}(\theta)$  中缺测回波的部分称为  $V''_{r_1}(\theta)$ 。

(2) 由于处理的距离圈存在无回波区,因此步骤(1)中计算  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$  的数值是有误差的,缺测区越大,误差越大,为减小误差,用  $V''_{r_1}(\theta)$  对  $V_{r_0}(\theta)$  缺测区域进行填补:保留  $V_{r_0}(\theta)$  中有回波的点,缺测回波的部分  $V''_{r_0}(\theta)$  用  $V''_{r_1}(\theta)$  替代,这样得到一组新的  $V_r(\theta)$  随方位角的分布,定义其为  $V_{r_2}(\theta)$ ,  $V_{r_2}(\theta)$  由  $V'_{r_0}(\theta)$  和  $V''_{r_1}(\theta)$  组成。

(3) 经过上述(1)、(2)步骤处理后,得到了一组经一次填补的完整径向速度序列。但该序列相对于我们要求得理想径向速度数据序列仍有偏差,因此设计对比原来有速度回波数据  $V'_{r_0}(\theta)$  和经过重新反演得到的与之对应的  $V'_{r_1}(\theta)$  之间的均方根误差作为迭代的约束条件。一次迭代后计算一个速度均方根误差(计为  $S_{RM}$ )

$$S_{RM} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (V'_{r0i}(\theta) - V'_{r1i}(\theta))^2} \quad (3)$$

$M$  为  $V_{r0}(\theta)$  中有速度值点的总数,  $S_{RM}$  值越小表明迭代过后所得的径向速度资料相对于原始数据的误差越小。

(4) 为使  $S_{RM}$  数值降低到最小, 利用步骤(2)所求得的新的随方位角的分布  $V_{r2}(\theta)$  重复上述步骤(1)、(2)、(3), 计算得到一系列的均方根误差, 当  $S_{RM}$  达到最小时, 步骤 2 通过迭代得到的  $V_{r2}(\theta)$  即是所要得到的某距离圈的径向速度场。

### 2.3 约束值讨论

在实际通过计算机实现算法操作过程中  $S_{RM}$  最小值取值操作偶尔会遇到问题。  $S_{RM}$  值最小的判断在计算中偶尔会出现突变现象, 即在逐渐减小数据的时候偶尔会突然出现数据增大又减小的现象, 这将导致迭代法提前终止, 填补数据仍未达到最理想状态。经分析发现由于径向速度数据有正有负, 在进行迭代前若数据质量较差并且未进行较好的数据质量控制时, 本该正值的地方出现负值或相反情况将导致  $S_{RM}$  数值突变。为避免该现象的发生, 在计算机实现时采用了取连续多组  $S_{RM}$  平均最小值的方式作为迭代终止约束条件, 经检验该方法切实可行。

### 2.4 误差检验

本文采用交叉验证方法对缺测区域的填补结果进行对比分析, 即在实测多普勒速度图上人为制造缺测区域, 利用迭代法进行填补, 然后对填补数值与实际数值进行对比分析, 讨论填补方法优劣, 并进行误差分析。采用平均绝对误差  $\Delta$  来表示填补技术的精度。

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{oi} - x_{ei}| \quad (4)$$

式(4)中,  $x_{oi}$  为第  $i$  个实际数值,  $x_{ei}$  为第  $i$  个填补数值,  $N$  为填补的个数。

## 3 填补试验和误差分析

### 3.1 缺测区域分类

根据雷达周边地理环境不同、雷达型号不同以及雷达运行状态的不同, 缺测区域主要由下述 3 种情况造成: I 地物阻挡造成的低仰角回波缺测(图 1a); II 距离折叠造成的缺测区域, 表现在中国雷达观测网中 CINRAD/SA 型号雷达中速度产品的紫色区域(图 1a 和 1b); III 实际观测的无回波区域(图 1c)。还包括天线运转不连续造成的随机径向数据缺失区域(图 1b 白色箭头处), 该类型情况也可归纳到 I 类型中。本文的填补方法适用于这 3 种类型的缺测区域。

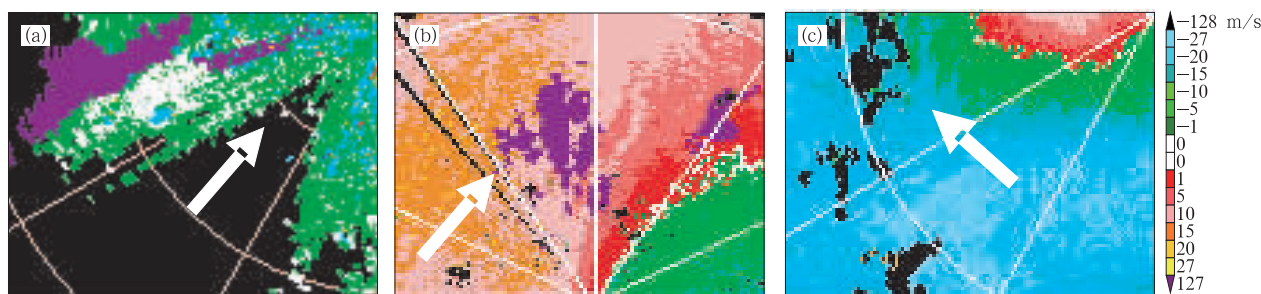


图 1 3 种类型的多普勒速度缺测区域

(a. 地物阻挡缺测区, b. 距离折叠缺测区, c. 实际无回波区)

Fig. 1 Three types of lacking region images in the Doppler velocity product. The lacking region caused by ground clutter (a), the lacking region caused by folding range (b) and the actual no echo region (c)

### 3.2 线性插值填补法和迭代填补法比较

天气雷达在正常运行情况下, 有时会因为天线运转的机械瞬间停顿在图像上产生缺测区域(图 1b), 一般情况下径向缺测根数不多时, 并不影响数据质量, 但是在缺失径向根数较多时, 将大幅度降低速度数据再利用价值。为此必须在数据再利用前对缺失区域进行合理填补, 一般在常规处理此类数据现象时, 采用的是线性插值法。本节采用线性插值法和本文提出的迭代填补法对 I 类型缺测数据分别

进行填补, 并对两种方法进行比较。

#### 3.2.1 数据来源

用于方法统计的雷达径向速度数据取自南京雷达站 2004—2007 年的 45 次大面积降水天气过程的多普勒径向速度数据, 为确保对填补方法的研究纯度, 笔者在统计前事先对出现速度模糊的数据人为判断并进行了退速度模糊处理, 再进行填补技术的研究。需要指出的是统计数据中大部分是符合迭代填补法线性风场数据, 也有少量中小尺度强对流系

统和大量降水中的局部非线性风场数据,整体统计结果表明该方法适用于江淮地区或江苏省梅雨汛期大面积降水天气过程的情况;对于其中中小尺度强对流系统和大量降水中的局部非线性风场则部分适用,部分不适用,有一定局限性。下文示例均选择了符合风场条件的数据做示范。

为满足两种填补方法的条件,选用了 1.5°仰角

的速度数据。文中给出的示例是来自 2004 年 6 月 15 日 00 时 50 分(世界时)的大面积降水雷达体扫基数据(图 2a)。为对比两种填补法,根据图像特征人为制造两块连续缺测 8°方位角(根据数据径向的分辨率为 1°,即人为制造 8 根缺失径向)的区域(图 2b、图 3b),图 2b 是人为缺测区域有正有负的速度区域,图 3b 是人为缺测区域均为负速度区。

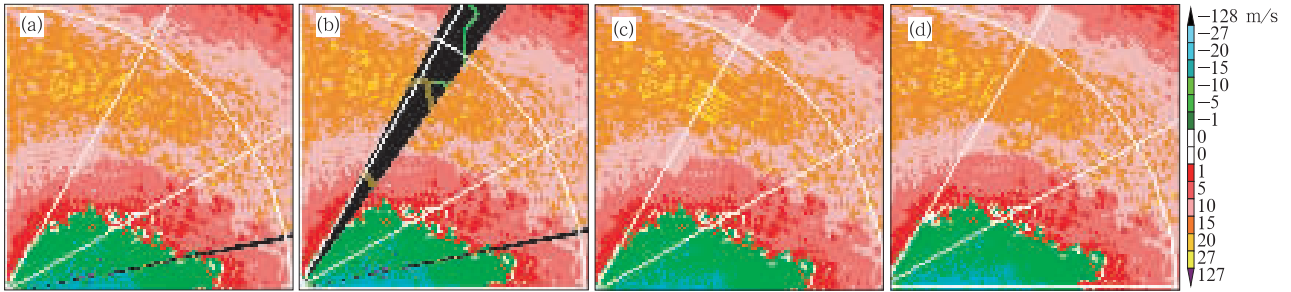


图 2 2004 年 6 月 15 日 00 时 50 分的 1.5°仰角速度图像填补

(a. 原图(28°—35°), b. 人为缺测(28°—35°), c. 线性插值填补, d. 迭代填补)

Fig. 2 Velocity filling images at 00:50 UTC 15 June 2004 with elevation of 1.5°

(a. the original image (28°—35°), b. the artificial lacking region with 28°—35°, c. the filling image by linear interpolation method, d. that by iterative method)

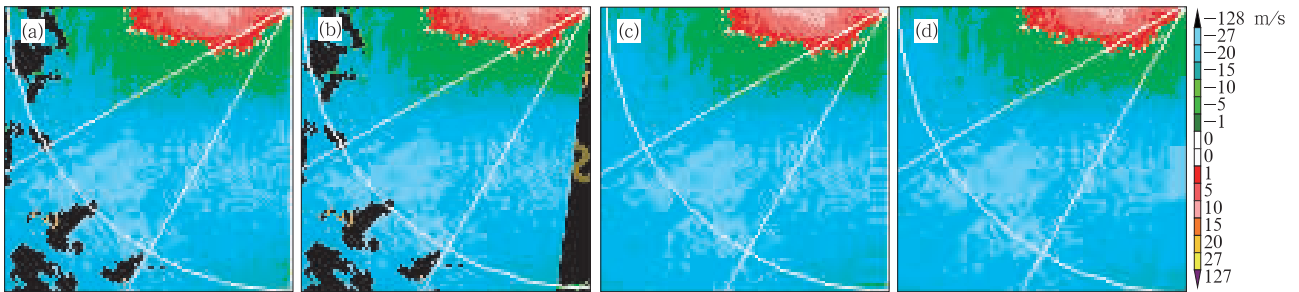


图 3 2004 年 6 月 15 日 00 时 50 分的 1.5°仰角速度图像填补

(a. 原图(180°—186°), b. 人为缺测(180°—186°), c. 线性插值填补, d. 迭代填补)

Fig. 3 As in Fig. 2 but for 180°—186° lacked

### 3.2.2 两种填补法对比分析

图 2c 和 3c 是通过线性插值方法对图 2b 和 3b 人造的缺测区域进行填补的图像效果,图 2d 和图 3d 是通过迭代法对该人造缺测区域进行填补的图像效果。为满足线性插值的要求,人为制造的缺测区域为小于 8°的连续方位角,从填补的图像效果来看两种方法差别并不明显,线性插值的填补区域与邻边数据接近,数值上与原数据相差不大,但图像上呈现出明显填补轮廓,填补效果不太自然;迭代法填补出的图像效果比起原图像一些较大数值点略被平滑,整体填补数据从色标表示上略小于原值,但是图

像填补区域从数据区域到缺测区域再到数据区域过渡比较自然。

为了比较两种方法的填补精度,计算两种方法的平均绝对误差  $\Delta$  和各径向速度区间误差频率(表 1)结果表明,两种填补法在满足各自方法前提条件下平均绝对误差相差不大,都满足速度填补的精度要求。缺测区域有正负速度的情况下迭代法比线性插值法  $\Delta$  小约 0.9 m/s,而缺测区域是同一符号速度的情况下迭代法比线性插值法平均绝对误差  $\Delta$  小约 0.4 m/s,相差不大。表明迭代法在正负速度过渡区域的填补精度要高于线性插值法。而在同

表 1 两种填补法对比分析  
Table 1 Comparison between the two filling methods

方法	平均绝对误差(m/s)	0—2 m/s 误差频率	3—5 m/s 误差频率	6—10 m/s 误差频率
线性插值法(28°—35°)	2.34	60.9%	32.3%	6.8%
迭代法(28°—35°)	1.44	84.2%	14.7%	1.1%
线性插值法(180°—186°)	2.13	65.2%	29.9%	4.9%
迭代法(180°—186°)	1.78	74.3%	22.5%	3.2%

一符号速度缺测区域两者填补能力几乎相当。从误差频率也可看出,迭代法出现大误差的频率在缺测区域有正负速度的情况下比插值法要小 6 倍,而在缺测区域是同一符号速度的情况下两者大误差出现频率相差不大。

综合来看,两种填补方法在缺测区域连续缺口不大、缺测数据符号一致的情况下填补效果相当,迭代法精度略高于插值法;在当缺测数据符号有正有负的情况下,两者总体也能满足填补精度,但插值法误差大值出现频率高于迭代法,对数据符号有正负交替时敏感,而迭代法对数据出现正负交替与符号一致表现几乎一致,比起插值法适用范围更广。

### 3.3 随机非连续缺口速度缺测区域填补

考虑到实际情况中速度图像有 3.1 节表示的 3 种缺测区域类型,本文设计了两种人为缺测区域类型:随机制造非连续缺口速度缺测区域和累积连续

缺口速度缺测区域,来全面考察迭代填补法的填补效果、误差范围以及适用范围。示例采用的速度数据来源与 3.2.1 节一样,原数据取自南京雷达站 2004 年 6 月 15 日 00 时 50 分的大面积降水雷达体扫基数据中 1.5°仰角的速度数据。

首先制造了随机非连续方位角缺测区域的 18 组数据,每组累积缺测方位角从 10°开始,以 10°递增至 180°。并计算了平均绝对误差  $\Delta$ 、误差频率、相关系数、 $U$  统计量。另外为了考察方法在业务工作中的可行性还计算了迭代的机器耗时。通过这几种数据的统计分析来表征填补效果(表 2)。

#### 3.3.1 填补误差

从表 2 的  $\Delta$  项来看,误差与缺测的累积角度无明显关系,误差最小值 1.11 m/s 出现在 130°,最大值 2.2 m/s 出现在 170°,总体来看误差都在 1—2 m/s,填补精度较高,与非连续累积角度大小无关;从误差

表 2 随机非连续 10°—180°缺口填补  $\Delta$ 、误差频率及相关系数和统计量  $U$

Table 2 The mean absolute error  $\Delta$ , the error frequency, the correlation and the statistic  $U$  as are calculated by the iterative filling method for the random discontinuous lacking region of 10°—180°

缺口(°)	平均绝对 误差 $\Delta$ (m/s)	0—2 m/s 误差频率(%)	3—5 m/s 误差频率(%)	6—10 m/s 误差频率(%)	>10 m/s 误差频率(%)	相关系数	$U$ 统计量	耗时(s)
10	1.59	80.0	18.6	1.4	0	0.98	1.06	1
20	1.85	73.4	23.8	2.7	0.1	0.96	0.54	2
30	1.53	83.0	14.5	2.5	0	0.97	1.07	1
40	1.29	90.2	9.1	0.7	0	0.97	1.81	2
50	1.55	77.7	21.6	0.7	0	0.98	2.22	2
60	1.87	70.2	27.6	2.2	0	0.98	0.36	2
70	1.87	72.3	26.6	1.1	0	0.89	1.17	2
80	1.31	89.7	9.1	1.0	0	0.96	0.74	2
90	1.43	83.3	16.3	0.4	0	0.98	0.54	3
100	1.58	81.5	16.9	1.4	0.2	0.95	2.13	3
110	2.11	67.2	26.9	5.8	0	0.97	1.50	3
120	1.57	80.2	18.9	0.9	0	0.94	2.37	3
130	1.11	93.1	5.7	0.2	0	0.96	1.72	3
140	1.67	79.0	19.8	1.2	0	0.98	0.23	3
150	1.59	77.2	19.5	3.3	0	0.92	0.86	3
160	1.96	71.2	25.5	3.0	0.3	0.95	2.33	3
170	2.20	65.8	26.3	7.2	0.7	0.96	2.43	4
180	1.68	77.3	20.1	2.2	0.4	0.94	2.47	4

频率来看累积缺测角度的大小对小误差影响不大,但是在出现误差大于 10 m/s 的频率上方位角累积缺测 160°及以上出现频率比起小误差要大,并且均会出现,但出现次数很少。

3.3.2 显著性检验

为了表征填补数据的质量,并考虑数据的大样本特性,还讨论了平均值的统计量  $U$  与相关系数的显著性检验。根据文献(沈恒范,2000),计算了随机非连续缺口累积 10°—180°填补数据和原数据的统计量  $U$ ,查表可知  $U_{0.01} = 2.8$ ,而所计算  $U$  值最大 2.47,所以随机 10°—180°的填补数据与原数据均通过了显著性水平为 0.01 的平均值检验,其平均值无显著性差异。根据文献(沈恒范,2000),当自由度为

200,相关系数大于 0.181 时通过显著性水平为 0.01 的检验,表 2 所计算数据的自由度均大于 200,最小的相关系数也达 0.89,所以随机非连续累积缺口 10°—180°的填补数据与原数据也均通过了显著性水平检验。

3.3.3 填补效果分析

从随机不连续缺口累积方位角达 90°的迭代法填补效果(图 4)看,尽管累积的缺测方位角达到了 90°,但填补后的图像(图 4c)与原图 4a 几乎一致,为了更清晰地看出填补数据和原数据的差异,对比第 200 个距离圈的两组数据(图 4d)可见,两组数据几乎重合,只在 253°和 307°方位角出现了较明显差异。

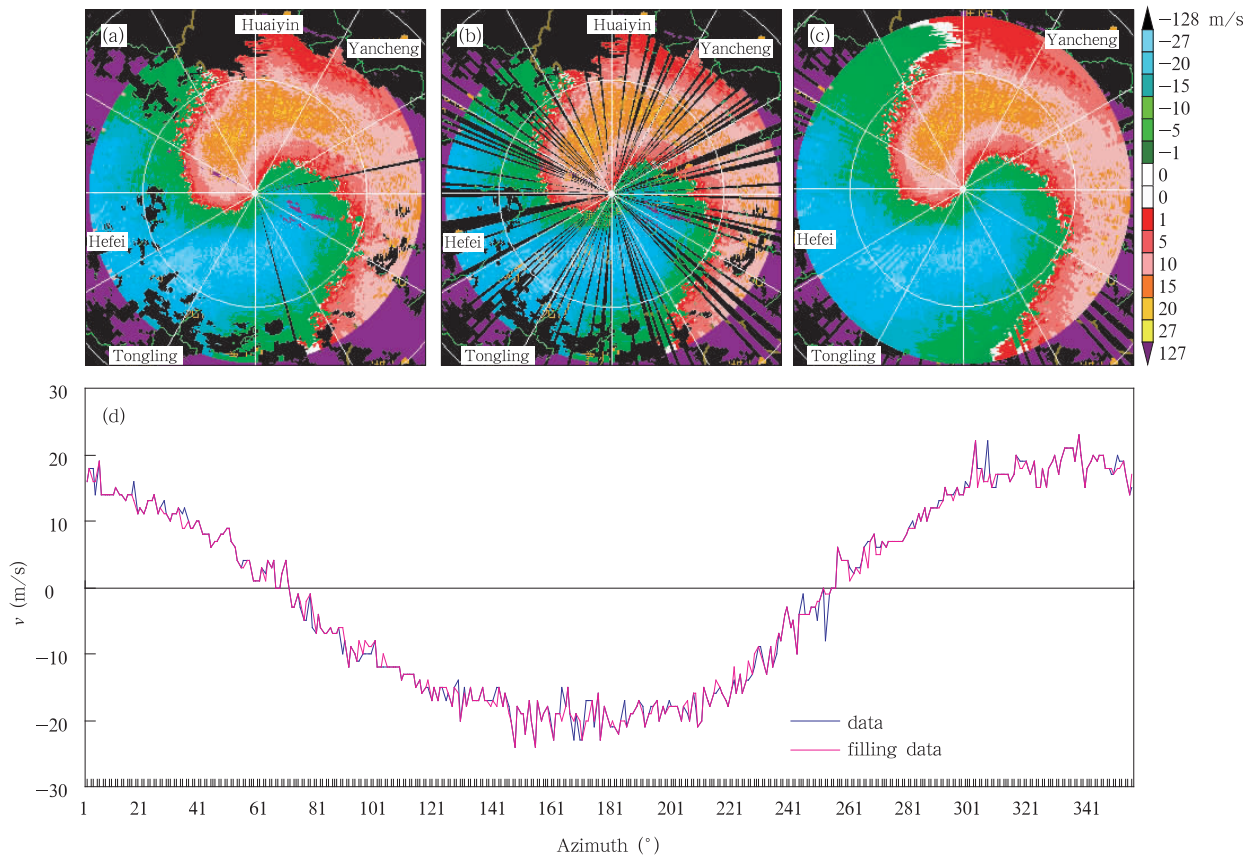


图 4 随机不连续累积缺测方位角 90°填补效果

(a. 速度场原图, b. 随机累积缺测 90°方位角, c. 迭代填补图, d. 第 200 个距离圈原数据和填补数据曲线)

Fig. 4 Filling image for the random discontinuous lacking region with the accumulated gap of 90°

(a. the original velocity field, b. the random discontinuous field with the accumulated lacking of 90°,

c. the filling image, d. the curves of the original data and the filling data at No. 200 range)

3.4 连续累积缺口速度缺测区域填补

仍旧首先制造了连续方位角缺测区域的 18 组

数据,每组连续累积缺测方位角从 10°开始,以 10°递增至 180°。同样计算了平均绝对误差、误差频

率、相关系数、 $U$  统计量和迭代的机器耗时(表 3), 通过这几种数据的统计分析来表征填补法实测速度数据在连续累积缺测方位角情况下的填补效果。

### 3.4.1 填补误差

从表 3 的平均绝对误差  $\Delta$  项来看, 连续累积缺测区域填补的误差随着累积缺口的增大总体呈现增大趋势, 尤其在连续缺口超过  $160^\circ$  时, 误差明显增大,  $180^\circ$  时误差达到了  $8.35 \text{ m/s}$ ; 误差频率也出现

同样的趋势, 小误差频率随着缺口的增大逐步递减, 缺口在  $160^\circ$  及以上时小误差频率迅速下降, 相应的大误差率( $\Delta > 10 \text{ m/s}$ )出现的频率在  $100^\circ$  以下为 0, 不出现超过  $160^\circ$  出现频率猛增,  $180^\circ$  时达到了  $26.1\%$ , 这说明约有  $1/4$  的填补数据误差超过  $10 \text{ m/s}$ , 填补结果不能代表真实的风场, 迭代填补法在连续累积缺测区域的应用上不适于方位角连续缺测超过  $160^\circ$  的情况。

表 3 累积缺测  $10^\circ$ — $180^\circ$  缺口填补的平均绝对误差  $\Delta$ 、误差频率及相关系数和统计量  $U$

Table 3 As in Table 2 but for the continuous lacking case

缺口( $^\circ$ )	平均绝对 误差 $\Delta(\text{m/s})$	0—2 m/s 误差频率(%)	3—5 m/s 误差频率(%)	6—10 m/s 误差频率(%)	>10 m/s 误差频率(%)	相关系数	$U$ 统计量	耗时(s)
10	1.48	77.5	19.9	2.6	0	0.95	2.09	3
20	1.33	81.2	16.9	1.9	0	0.95	2.34	4
30	1.27	82.1	16.5	1.4	0	0.96	0.10	4
40	1.29	81.9	16.3	1.8	0	0.96	0.91	5
50	1.34	81.1	16.6	3.3	0	0.96	1.58	6
60	1.34	80.7	17.0	2.3	0	0.96	0.59	8
70	1.40	79.5	17.9	2.6	0	0.97	0.08	10
80	1.50	77.3	19.2	3.5	0	0.97	0.29	12
90	1.59	75.1	20.9	4.0	0	0.97	0.42	16
100	1.53	69.7	24.5	5.7	0.1	0.96	0.43	22
110	1.90	69.6	23.3	6.7	0.4	0.96	0.43	30
120	1.76	72.8	21.0	5.7	0.5	0.96	0.33	40
130	1.88	71.1	21.6	6.4	0.9	0.96	0.29	55
140	1.97	68.3	23.3	8.0	0.4	0.96	0.30	79
150	2.06	67.8	22.3	9.2	0.7	0.96	0.21	102
160	3.42	58.5	19.0	14.1	8.4	0.92	0.29	153
170	5.97	54.9	13.2	9.0	22.9	0.86	0.24	242
180	8.35	55.0	12.1	6.8	26.1	0.79	0.27	325

### 3.4.2 显著性检验

尽管迭代填补法在连续累积方位角缺口达  $160^\circ$  及以上时有明显的误差, 但基于统计的大样本(样本对在  $1000$ — $15000$ ), 相关系数和  $U$  统计量均通过了  $0.01$  的显著检验, 从另一方面也说明, 尽管大的累积缺口有  $1/4$  的数据已经失真, 但另  $3/4$  的数据与原数据保持有较高的相关性和统一性。

不过比起随机非连续累积方位角缺测区域的填补算法准实时来比, 连续累积方位角缺测区域的填补耗时随着缺口的增大成倍递增, 缺口达  $110^\circ$  时也需要耗时  $0.5 \text{ min}$  完成整个填补过程,  $180^\circ$  时更是达到了  $6 \text{ min}$ , 相对于现在  $6 \text{ min}$  一个体扫过程的雷达运行周期来讲, 无法用于数据质量控制。从保证填补数据的质量和算法执行效率两者综合考量, 迭代填补法适用于连续累积方位角缺口小于  $110^\circ$  的

情况。

### 3.4.3 填补效果分析

同样为了展示迭代填补法在连续累积方位角缺口缺测区域的填补效果, 图 5 也给出了连续累积缺口达  $90^\circ$  的图像。同样也给出了第 200 个距离圈真实数据和填补数据的对比曲线。从图 5c 可见填补后的数据很好地反映出了缺测的零速度线的走向, 尽管缺测角度达  $90^\circ$ , 仍旧填补出了速度的中心区域, 但比起原数据数值偏小。从图 5d 数据曲线也可看出, 填补的数据从正值到负值的过度与原数据基本保持一致, 但正值数值比原数据约小  $1$ — $2 \text{ m/s}$ 。而负值几乎保持一致。总的来看, 迭代填补法填补出的图像保持了很好的原速度图像特征, 尤其是零速度线走向也能得到很好的体现, 数值的填补上比起原数据略偏小。

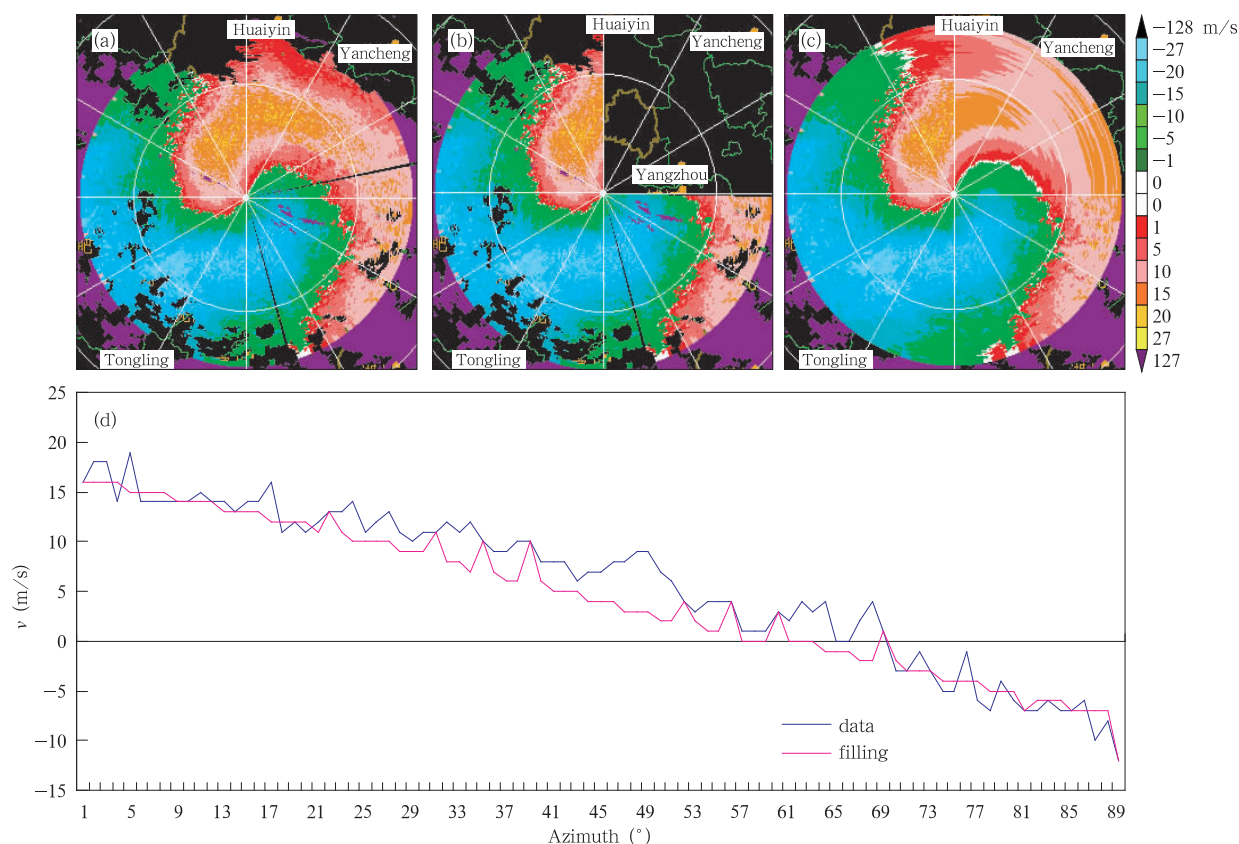


图5 连续累积缺测方位角90°填补效果

(a. 速度场原图, b. 随机累积缺测90°方位角图, c. 迭代填补图, d. 第200个距离圈原数据和填补数据曲线)

Fig. 5 As in Fig. 4 but for the continuous lacking case

## 4 结 论

本文在实际风场为线性分布的条件下,详细介绍了基于VAD技术的迭代填补方法,利用实际观测的雷达径向速度数据人为制造缺测区域进行填补并与原数据进行对比试验,结果表明该填补方法适用于江淮地区或江苏省梅汛期大面积降水天气过程的情况,通过数据填补将有效提高此类数据的再次利用;作为一种雷达数据预处理方法,具有较高的应用价值。

(1)在利用计算机实现填补算法过程中,采用连续多组 $S_{RM}$ 平均最小值的方式作为迭代终止约束条件,可防止偶尔的非正常迭代提前终止现象。

(2)在同时满足线性插值填补法和迭代填补法的前提条件下,两种方法填补结果精度均可信;在缺测区域速度数值符号一致的情况下填补效果相当,迭代法精度略高于插值法;当缺测区域速度数值符号有正负交替时,插值法大误差出现频率高于迭代

法,对数据符号有正负交替表现敏感,而迭代法对数据符号不敏感,适用范围更广。

(3)在人为制造随机不连续累积缺口 $10^{\circ}$ — $180^{\circ}$ 的缺测区域情况下,迭代填补精度与缺测缺口的累积大小无明显关系,平均绝对误差在 $2.2\text{ m/s}$ 以内,精度较高,填补数据通过了相关系数和平均值统计量 $U$ 的显著性检验,数据可信。迭代耗时均在 $4\text{ s}$ 以内,业务操作可行。

(4)在人为制造连续累积缺口 $10^{\circ}$ — $180^{\circ}$ 的缺测区域情况下,迭代填补法只适用于连续累积缺口在 $160^{\circ}$ 以内的缺测区域,在 $160^{\circ}$ 范围内,平均绝对误差在 $2\text{ m/s}$ 以内,精度较高,同样填补数据也通过了相关系数和平均值统计量 $U$ 的显著性检验。但结合迭代时间,该填补法在连续累积缺口 $110^{\circ}$ 以内达最佳。

## 参考文献

胡志群,刘黎平,楚荣忠等. 2008. X波段双线偏振雷达不同衰减订正方法对比及其对降水估测影响研究. 气象学报, 66(2): 251-261



- 胡志群,夏文梅,汤达章等. 2007. 多普勒雷达速度图像识别及散度提取方法研究. 高原气象, 26(4):821-829
- 梁海河,张沛源,葛润生. 2002. 多普勒天气雷达风场退模糊方法的研究. 应用气象学报, 13(5):591-599
- 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
- 沈恒范. 2005. 概率论与数理统计教程. 北京:高等教育出版社, 256pp
- 汪家慧. 2002. 应用单多普勒雷达观测进行台风涡旋初始化[D]. 台北:台湾大学
- 王叶红,赵玉春,崔春光. 2006. 多普勒雷达估算降水和反演风在不同初值方案下对降水预报影响的数值研究. 气象学报, 64(4):485-499
- 沃伟峰. 2003. 多普勒天气雷达二次产品开发平台的设计和实现[D]. 南京:南京气象学院
- 夏文梅,张亚萍,王凌震等. 2003. 复合风场的单多普勒速度特征. 气象科学, 23(2):209-216
- 徐芬,夏文梅,吴蕾等. 2007. 多普勒天气雷达速度 PPI 图散度分布信息提取. 气象, 33(11):22-27
- Paul R. Desrochers F. Ian Harris. 1996. Interpretation of mesocyclone vorticity and divergence structure from single-doppler radar. J Appl Meteor, 35(12):2191-2209
- Thomas Matejka, Diana L Bartels. 1998. The accuracy of vertical air velocities from doppler radar data. Mon Wea Rev, 126(1): 92-117