

邓勇,尹丽云,许迎杰,等. 多普勒雷达速度场缺测区域填补技术的数值模拟[J]. 气象,2010,36(5):1-12.

# 多普勒雷达速度场缺测区域填补技术的数值模拟<sup>\*1</sup>

邓 勇<sup>1</sup> 尹丽云<sup>2</sup> 许迎杰<sup>2</sup> 张腾飞<sup>2</sup> 刘雪涛<sup>2</sup> 汤达章<sup>3</sup>

1 中国气象局,北京 100081

2 云南省气象台,昆明 650034

3 南京信息工程大学电子工程系,南京 210044

**提 要:** 针对多普勒天气雷达探测风场时,常因大面积无回波区的存在,对提取平均散度和平均形变信息的精度有较大影响。利用 Sirmans 建议的技术来模拟降水回波信号,得到含有 0、1、2 阶谐波的平面线性速度场并进行加噪处理,得到近乎真实的多普勒速度场。对模拟的平面线性速度场人为设定无回波区,利用 VAD 技术和迭代法对平面线性速度场做连续性缺口和非连续性缺口的迭代法填补。数值模拟结果表明:对于模拟的无噪声平面线性速度场,迭代法可以基本无误差填补连续性累积缺口在 10°到 180°的速度场无回波区;对连续性累积缺口,在  $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{SNR} \geq 5 \text{ dB}$  和  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ ,  $\sigma_v \leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的情况下,连续性累积缺口在 120°以内,迭代法能较高精度地填补速度场无回波区,填补后 0、1、2 阶谐波误差绝对值基本能控制在 15%以内,80 km 距离圈上缺口处迭代前后速度相对误差均在 30%以内;对非连续性累积缺口为 0°~180°的平面线性速度场,在附加不同噪声条件下,迭代法均可较好地填补累积缺口在 180°以内的平面速度场,且 80 km 距离圈上缺口处迭代前后速度值误差均能控制在 15%以内。说明利用迭代法填补多普勒速度场无回波区,填补效果较好,精度较高,这对改善从多普勒速度场中提取平均散度和平均形变信息的精度有极大的帮助作用。

**关键词:** 多普勒,速度场,无回波区,迭代法,填补

## Numerical Simulation of Filling Doppler Velocity Field in Non-Echo Areas

DENG Yong<sup>1</sup> YIN Liyun<sup>2</sup> XU Yingjie<sup>2</sup> ZHANG Tengfei<sup>2</sup> LIU Xuetao<sup>2</sup> TANG Dazhang<sup>3</sup>

1 China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034

3 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** When wind field is detected with Doppler weather radar, there are some different size non-echo areas in large-scale radar echoes, which lead to great errors when average divergence and average deformation information are extracted. With the technique suggested by Sirmans to simulate the precipitation-echo signal, we obtain a plane linear velocity field which includes 0, 1, 2 step overtones and carry on adds-chirp processing, and then a near-real Doppler velocity field is generated. Supposing that the special non-echo area exists in the plane linear velocity field and by the use of VAD technology and the repetitive processing, the continuous gap and the non-continuous gap in the plane linear velocity field would be filled with repetitive processing. The simulation results indicate that for the simulation of non-noise plane linear velocity field, the non-echo area of continuity accumulation gap from 10° to 180° can be filled inerrably with the repetitive processing in the velocity field. For continuous accumulation gap, under the conditions of  $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{SNR} \geq 5 \text{ dB}$  and  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ ,  $\sigma_v \leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the continuous accumulation gap less than 120°, the non-echo area with the repetitive processing in the velocity field can be filled inerrably. After filling, the absolute errors of 0, 1, 2 step overtones may be controlled to be less than 15%, and the absolute errors of speed controlled less than 30% which is 80 km away from the circle around the gap place iteration. For the plane linear velocity field of non-continuous accumulation gap from 0° to 180°, under the condition of addi-

\* 国家自然科学基金(40665001)资助

2008 年 10 月 6 日收稿; 2009 年 10 月 12 日收修定稿

第一作者:邓勇,主要从事多普勒雷达资料的分析与应用方面的研究. Email:radsat@sina.com

tional different noise, not only the accumulation gap less than  $180^\circ$  in the plane velocity field can be filled, but also the speed errors can be controlled to be less than 15% which is 80 km away from the circle around the gap place iteration. This shows that the effect and precision are very good when non-echo areas in Doppler wind field are filled with the repetitive processing, and will have a great help for improving the precision of average divergence and average deformation information extracted from the Doppler wind field.

**Key words:** Doppler weather radar, velocity field, non-echo area, repetitive processing, filling

## 引言

多普勒天气雷达可以得到目标物沿雷达射线方向的运动速度(即径向速度),有常规测雨雷达不可比拟的优点,但多普勒天气雷达不能测量目标物垂直于雷达射线方向的运动速度(即切向速度),所以发展从单部多普勒雷达所获取的资料中反演风场信息的方法就具有特别重要的实际意义,从多普勒天气雷达测量的径向速度资料中提取风场信息已经提出了不少有实际应用价值的方法,但对散度繁衍方法的研究并不令人满意,特别是多普勒天气雷达所探测到的风场信息存在缺测问题成为了多年一直影响风场信息应用的棘手问题。

20 世纪 60 年代初期, Lhermitt 和 Atlas<sup>[1]</sup> 提出了单部多普勒天气雷达测量风场的一种方法,称为 VAD(Velocity Azimuth Display)技术,应用这种方法,单部多普勒天气雷达可以得到降水区中各高度上的平均风向风速和平均散度等。Srivastava 等<sup>[2]</sup> 将 VAD 方法加以改进推广,称之为推广速度方位显示方法(Extended VAD),简称 EVAD 方法。然而无论是 VAD 方法还是 EVAD 方法,都是在某一固定距离圈上对  $V_r(\theta)$  作谐波分析的基础上得到的,因此必须考虑  $V_r(\theta)$  本身的测量误差和距离圈上的局部缺测  $V_r(\theta)$ (无回波区)资料产生的误差,数值试验证明当无回波区缺口大于  $30^\circ$  或者累积缺测区大于  $60^\circ$  时,对计算的水平散度有明显的影响,为了减少这种误差,就必须对资料进行处理。最简单常用的方法是插值法,如胡明宝等<sup>[3]</sup> 采用拉格朗日插值公式补缺测点,梁海河等<sup>[4]</sup> 提出了 k-邻域频数法来消除风场中的“噪声”和填补缺测,王凌震等<sup>[5]</sup> 探讨了一种遮挡范围内进行数据插补的技术方法,以弥补雷达产品生成中的缺陷问题,尤其是解决雷达定量测量面降雨量场的补缺问题,但此方法只是很简单地用较高仰角的资料对相应的低仰角无回波区进行填补,万蓉等、汤达章等、忻翎艳等<sup>[6-9]</sup> 提出了对原始的多普勒速度资料进行中值滤波处理,但在某距离圈上连续的方位缺测区大于  $30^\circ$  或者总方

位缺测值大于  $60^\circ$  时,误差偏大。就目前来说,由于挡角造成无回波区和降水回波区实测无回波区中的多普勒速度资料填补技术,目前国内外均无有效的方法。本文在线性风场的条件下,利用迭代法对模拟的多普勒速度场无回波区进行填补,分析迭代法填补的精度和适用范围。数值模拟的试验表明,迭代法填补速度场无回波区能极大的改善从多普勒速度场中提取平均散度和平均形变信息的精度。

## 1 迭代法原理介绍

在线性风场条件下,假定雷达低仰角扫描某一距离圈存在无回波区,定义该距离圈上  $V_r$  随方位角的分布为  $V_{r0}(\theta)$  [ $V_{r0}(\theta)$  包括有回波区部分  $V_{r0}(\theta)'$  和无回波区部分  $V_{r0}(\theta)''$ ], 具体方法如下:

①由 VAD 理论<sup>[3]</sup>

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

式(1)中的  $\theta$  和  $\alpha$  分别是方位角和仰角,  $r$  为等距离圈的半径。当雷达低仰角扫描时,由于垂直速度对  $V_f$  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

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

将  $V_r(\theta)$  代入式(1)和式(2),可以得到一组平均风向风速、散度项和形变项,即  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y,$

$u_y + v_x$ , 也称为 0、1、2 阶谐波分量。

②将步骤①中所求得的  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$  代入公式(1)得到一组新的  $V_r$  随方位角的分布, 定义其为  $V_{r1}(\theta)$ 。[ $V_{r1}(\theta)$  中对应于  $V_{r0}(\theta)$  中有回波的部分称为  $V_{r1}(\theta)'$ , 对应于  $V_{r0}(\theta)$  中无回波的部分称为  $V_{r1}(\theta)''$ ]。

③由于距离圈存在无回波区, 因此步骤①、②中计算  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$  时的结果是有误差的, 无回波区越大, 误差越大, 为了减小误差, 用  $V_{r1}(\theta)''$  对  $V_{r0}(\theta)$  进行填补。具体做法是: 保留  $V_{r0}(\theta)$  中有回波的点, 无回波的部分  $V_{r0}(\theta)''$  用  $V_{r1}(\theta)''$  替代, 最后得到一组新的  $V_r(\theta)$  随方位角的分布, 定义其为  $V_{r2}(\theta)$ 。

④经过上面的处理之后, 相对于理想的径向速度资料还是有误差的, 对该距离圈计算一个速度均方根误差 RMS

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [V_{r1}(\theta) - V_{r1}(\theta)']^2} \quad (3)$$

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

⑤为了能使误差降低到最小, 利用步骤③所求得的新的  $V_r(\theta)$  随方位角的分布  $V_{r2}(\theta)$ 。重复上述①、②、③、④步骤, 计算得到一系列的 RMS, 当 RMS 达到最小时, 步骤③通过迭代得到的  $V_{r2}(\theta)$  即是所要得到的径向速度场。

这里提出的方法是根据 VAD 理论, 考虑 0、1、2 阶谐波项(区别于最小二乘法), 利用迭代法对无回波区不断填补, 不断缩小误差到最小而实现, 能有效解决正负速度区缺测问题。

## 2 回波信号模拟的基本理论

由于实测多普勒雷达的线性风场是存在噪声干扰的, 为了更好地验证迭代法填补多普勒速度场无回波区的可行性, 需要对模拟的回波信号进行加噪处理, 使模拟的附加了一定噪声的回波信号在性质上与实测雷达的降水回波信号保持一致, 即模拟的降水回波信号在时域和频域要与实际情况相符。具体做法是: 首先对模拟信号进行采样, 然后附加一定信噪比的白噪声, 得到降水回波的离散功率谱密度函数, 再通过反傅立叶变换法将降水回波的功率谱密度函数转变为回波的时域信号。由于在迭代法和

VAD 填补试验中只需要模拟的多普勒速度场, 因此本文利用脉冲对处理法(PPP 法)对时变函数进行处理, 最后得到多普勒速度谱的零阶距(回波功率)、1 阶距(平均多普勒速度)和 2 阶距(多普勒速度谱宽)。

### 2.1 模拟信号的采样及加噪处理

相对于大多数降水回波信号, 功率谱密度函数为

$$G_n = \frac{1}{\sigma_f(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \exp\left[-\frac{(f_n - \bar{f})^2}{2\sigma_f^2}\right] \quad (4)$$

$G_n$  是与  $f_n$  相对应的离散的谱密度函数,  $\bar{f}$  是功率加权的中间频率, 即多普勒频率,  $\bar{f}$  总是正的且小于  $f_N$  (Nyquist 频率) 并且存在这样的不等式  $-f_N < f_n < f_N$  [3]。

降水回波的功率谱密度通常呈高斯谱分布, 而谱分析的信号是离散的谱信号, 必须对原谱进行离散化 [10-11], 用采样公式可得到离散谱函数  $S_n$ 。为使模拟信号尽可能符合实际情况, 需对模拟的谱函数附加一定信噪比的白噪声, 用加噪公式可得到加噪后的离散功率函数  $P_N$ 。加噪后模拟信号的离散功率谱密度函数为

$$S_n = -\ln(x_n) [KG_n + \frac{P_N}{N}] \quad (5)$$

式中  $0 < x_n < 1$ , 是一个在 (0, 1) 之间呈均匀分布的随机数,  $K$  是信噪系数,

$$K = \frac{P_N 10^{\text{SNR}/10}}{\sum_n G_n} \quad (6)$$

$P_N$  是噪声功率,  $\text{SNR} = 10 \lg \frac{P_r}{P_N}$  为信噪比,  $P_r$  为信号功率,  $N$  是谱系数个数。以  $V_r = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 即径向速度  $V_r$  所对应的多普勒频率  $f_0 = 100 \text{ Hz}$  ( $f_0 = 2 V_r / \lambda$ , 波长  $\lambda = 10 \text{ cm}$ ), 频率谱宽  $\sigma_f = 40$  (或速度谱宽  $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), Nyquist 频率  $f_N = 512 \text{ Hz}$  为例, 图 1a 是在无噪声情况下的离散功率谱密度图, 图 1b 是原谱的基础上取信噪比  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$  时得到的离散功率谱密度图。

### 2.2 附加相位谱

对式(4)、式(5)中所求得的实谱序列附加上相位谱, 考虑到噪声的随机性, 附加  $0 \sim 2\pi$  概率分布均匀的随机相位谱分布, 得到复谱序列 [10], 即由

$$A_n = S_n^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi y_n) \quad (7)$$

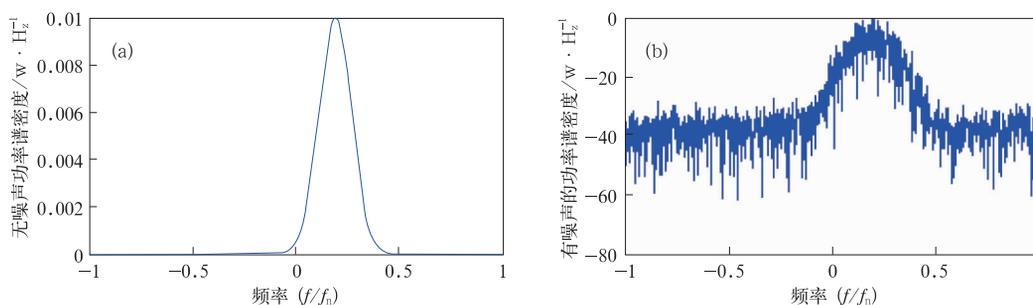


图 1 径向速度为  $V_r = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (对应的多普勒频率为  $f_d = 100 \text{ Hz}$ ) 无噪声和附加 20 dB 信噪比 (SNR=20 dB) 白噪声后的离散功率谱密度图  
(a) 无噪声; (b) 附加 SNR=20 dB 白噪声

Fig. 1 The discrete power spectral density chart of non-noise and white noise of 20 signal-to-noise ratios (SNR=20 dB) when the radial velocity  $V_r = 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (corresponding to Doppler frequency of 100 Hz)  
(a) non-noise, (b) white noise of 20 dB

$$B_n = S_n^{\frac{1}{2}} \sin(2\pi y_n) \quad (8)$$

$y_n$  是 (0, 1) 区间上概率均匀分布的随机数, 随后通过傅里叶反变换<sup>[3]</sup>得到时域信号。

### 2.3 利用脉冲对处理法 (PPP 法) 得到加噪的径向速度

由于本文在进行数值模拟时仅需要多普勒速度谱的 0 阶距 (回波功率)、1 阶距 (平均多普勒速度) 和 2 阶距 (多普勒速度谱宽), 而不需要知道整个谱的详细结构, 因此利用脉冲对处理法 (PPP 法) 对采样信号进行处理。PPP 法的特点是在假定雷达照射体积内每一个粒子的径向速度脉动具有偶函数的分布密度条件下, 可以不对信号进行谱分析, 而是采用相继的二个取样值成对的进行处理, 直接得到平均多普勒频率和速度。

设  $Z_n$  和  $Z_{n+1}$  是  $\{Z_n\}$  回波信号序列中相继取样的两个信号值<sup>[3]</sup>, 两个信号之间的时间间隔为  $T_s$ , 且一系列的回波信号的总数  $N$ , 则根据自相关函数的定义<sup>[12]</sup>有:

$$R(T_s) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} Z_{j+1} Z_j \quad (9)$$

信号的复数形式为

$$Z(t) = X(t) + jY(t),$$

且有

$$X(t) = a \cos \phi(t), Y(t) = a \sin \phi(t)$$

于是式 (9) 就可写成

$$R(T_s) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} Z_{j+1} Z_j = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} Q_{n+1} Q_n + I_{n+1} I_n + j(Q_{n+1} Q_n - I_{n+1} I_n) \quad (10)$$

结合式 (7)、式 (8), 则加噪后的径向速度为:

$$V_r = \frac{\lambda}{2} \bar{f}_0 = \frac{\lambda}{4\pi T_s} \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[R(T_s)]}{\text{Re}[R(T_s)]} \right\}$$

$\text{Re}[R(T_s)]$ 、 $\text{Im}[R(T_s)]$  分别为复数的实部和虚部。

模拟风场的每一个径向速度所对应的多普勒频率  $f_d (f_d = \frac{2V_r}{\lambda})$  为模拟回波信号的平均多普勒频率  $\bar{f}$ , 按照上述步骤对模拟的风场的每一个径向速度加不同信噪比和不同谱宽的噪声, 模拟出每一个径向速度带噪声的回波信号, 最后根据 PPP 法将模拟的回波信号还原成径向速度, 从而得到带噪声的径向速度。

## 3 数值模拟试验及结果分析

### 3.1 数值模拟试验

为验证迭代法填补径向速度场无回波区的精度, 本文进行数值模拟试验。首先考虑 VAD 算法中径向速度展开的傅氏级数中包含 0、1、2 阶谐波, 模拟平面线性风场的特征参数如表 1 所示, 根据公式 (1), 再由表 1 的特征参量得到全方位上二维径向速度模拟场, 模拟中用到的假设为: 雷达探测距离 150 km; 雷达仰角  $0.5^\circ$ ; 脉冲重复频率 PRF 为 1024 Hz; 雷达发射的波长 10 cm; 信噪比的取值范围  $0 \sim 40 \text{ dB}$ ; PPP 法中取 32 个脉冲对; 方位角采样间隔为  $1^\circ$ ; 每条径向上每隔 150 m 模拟一个径向速度资料库, 共模拟 1000 条等距离圈的径向速度资料库。

本文设计的线性风场是通过在某一固定距离圈上对  $V_r(\theta)$  作谐波分析的基础上得到的, 所以此模拟风场上的每一个径向速度都在 VAD 显示的速度方位曲线上, 此径向速度不含有雷达的机内噪声, 为了使模拟风场更加接近实际风场, 对上述模拟风场

的每一个径向速度附加不同信噪比和不同速度谱宽的噪声,模拟得到带噪声的径向速度场,模拟过程中存在速度模糊的地方均做了退模糊预处理。

在模拟得到  $V_r(\theta)$  的基础上,人为设定无回波区,利用前面介绍的迭代法对缺口进行填补,得到填补后的径向速度场资料,通过比较不同缺口在不同噪声情况下迭代填补的平均 RMS 值、平均迭代次数、0、1、2 阶谐波分量相对误差  $\epsilon$  的平均值(其中  $\epsilon = \sum | \frac{D' - D}{D} | \times 100\%$ ,  $D$  为表 1 中模拟的  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x, u_y - v_x$ ,  $D'$  为与之对应的人为设定无回波区后,通过迭代法求得的散度、平均风向风速和形变项),同时选取 80 km 距离圈上的径向速度场,对缺口区域迭代填补前后的速度值进行比较分析,计算相对误差  $\epsilon = \frac{\sum |V_1 - V_0|}{\sum |V_0|}$  (其中  $V_1$  为迭代后 80 km 距离圈上缺口处的迭代填补速度值,  $V_0$  为 80 km

距离圈上缺口处迭代前的速度值),由此来检验本文建议的迭代法填补速度场无回波区的精度。

### 3.2 无噪声情况下迭代法填补无回波区结果分析

首先检验模拟的多普勒径向速度场在无噪声情况下,用迭代法填补的精度。本文选取随机连续性缺口累积值为  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 180^\circ$ , 用迭代法填补结果见表 2, 可见在模拟的一个平面线性速度场无噪声情况下,随着连续累积缺口的不断增大,终止迭代的次数不断增多,终止迭代时 RMS 平均值、0、1、2 阶谐波的平均相对误差值也逐渐增大但增长幅度较小,所有相对误差值均接近 0, 说明迭代填补后平面径向速度场的 0、1、2 阶谐波分量几乎不变,从而验证了迭代法填补多普勒速度场无回波区在无噪声情况下的精确性。从表 2 还可看出,80 km 距离圈上缺口处迭代前后速度相对误差值均为 0, 说明填补前后速度场均能保持原有的特征。从连续缺口  $180^\circ$  的迭代前后填补效果图看出(图 2), 即使是在较大缺口的情况下,迭代法填补前后缺口处的径向速度场仍然没有任何改变。显然,迭代法能非常精确地填补无噪声情况下缺口值在  $180^\circ$  以内的速度场。

表 1 模拟含 0、1、2 阶谐波的线性风场特征参量(单位:  $m \cdot s^{-1}$ )

Table 1 The characteristic parameters of simulated linear wind field containing 0, 1, 2 step overtones

模拟风场	$u_0$	$v_0$	$u_x$	$v_y$	$u_y$	$v_x$
	12	10	8	10	12	6

表 2 迭代法填补平面无噪声速度场无回波区结果

Table 2 The result of filling non-echo area of plane non-noise velocity field with repetitive processing

累积缺口	迭代次数	RMS 平均值	$\epsilon_{u_0}/\%$	$\epsilon_{v_0}/\%$	$\epsilon_{u_x}/\%$	$\epsilon_{v_y}/\%$	$\epsilon_{u_y+v_x}/\%$	80 km 缺口速度 $\epsilon/\%$
$10^\circ$	21	1.22E-16	2.62E-16	2.63E-16	1.6E-15	9.98E-16	9.69E-16	0
$20^\circ$	30	2.76E-16	2.85E-16	2.65E-16	2.01E-15	1E-15	1.03E-15	0
$30^\circ$	41	5.91E-16	3.22E-16	2.74E-16	2.31E-15	8.88E-16	1.09E-15	0
$40^\circ$	55	1.17E-15	3.76E-16	2.91E-16	2.82E-15	9.21E-16	1.37E-15	0
$50^\circ$	73	1.95E-15	4.72E-16	3.43E-16	3.56E-15	9.54E-16	1.86E-15	0
$60^\circ$	97	2.63E-15	6.69E-16	4.91E-16	4.7E-15	9.98E-16	3.17E-15	0
$70^\circ$	130	3.39E-15	1.12E-15	9.22E-16	6.83E-15	1.73E-15	5.62E-15	0
$80^\circ$	176	4.03E-15	2.21E-15	2.17E-15	1.18E-14	5.22E-15	1.16E-14	0
$90^\circ$	242	4.91E-15	4.76E-15	5.58E-15	2.34E-14	1.73E-14	2.74E-14	0
$100^\circ$	335	6.27E-15	1.07E-14	1.5E-14	4.37E-14	5.14E-14	6.04E-14	0
$110^\circ$	471	8.35E-15	2.44E-14	4.1E-14	9.8E-14	1.76E-13	1.57E-13	0
$120^\circ$	681	1.18E-14	5.81E-14	1.18E-13	2E-13	5.12E-13	3.53E-13	0
$130^\circ$	1003	1.73E-14	1.41E-13	3.54E-13	4.34E-13	1.51E-12	8E-13	0
$140^\circ$	1500	2.68E-14	3.5E-13	1.12E-12	1.24E-12	5.44E-12	2.15E-12	0
$150^\circ$	2277	4.45E-14	8.94E-13	3.87E-12	3.71E-12	1.85E-11	5.18E-12	0
$160^\circ$	3510	7.63E-14	2.17E-12	1.4E-11	1.39E-11	7.03E-11	1.26E-11	0
$170^\circ$	5500	1.37E-13	4.36E-12	5.44E-11	5.86E-11	2.72E-10	2.43E-11	0
$180^\circ$	8779	2.47E-13	1.59E-12	2.19E-10	2.85E-10	1.14E-09	8.83E-12	0

### 3.3 不同信噪比 SNR、不同速度谱宽 $\sigma_v$ 条件下,迭代法填补速度场无回波区结果分析

模拟回波信号由平均多普勒频率、速度谱宽  $\sigma_v$

(或频率谱宽  $\sigma_f$ )、信噪比 SNR 这 3 个参数决定,故速度谱宽、信噪比 SNR 的变化将引起径向速度以及用 VAD 方法得到的水平散度的变化。为进一步验证迭代法填补速度场无回波区的精度,取 SNR 值

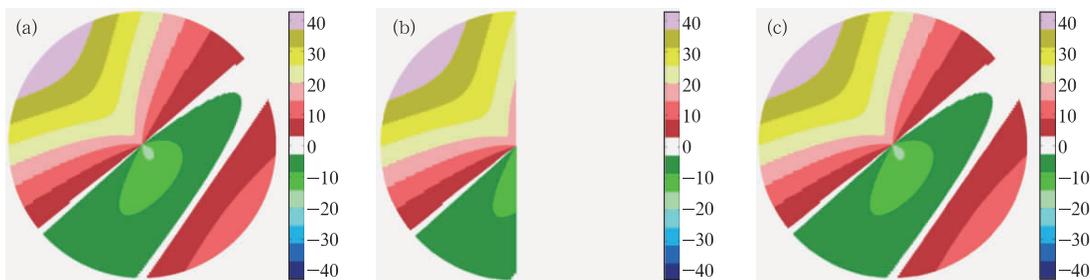


图 2 无噪声连续累积缺口  $180^\circ$  平面线性速度场迭代填补前后图

(a) 模拟图; (b)  $180^\circ$  缺口图; (c) 迭代填补图

Fig. 2 The comparison images of the simulated and non-noise velocity field that filled continuously gap  $180^\circ$  iteration non-echo areas with repetitive processing

(a) simulation image, (b) the  $180^\circ$  gap image, (c) filled image

分别为 0、5、15、20、30、40 和  $\sigma_v$  值分别为 1、2、3、4、5、6 来填补速度场无回波区, 并验证填补的精度和效果。

### 3.3.1 速度谱宽 $\sigma_v$ 一定 ( $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 信噪比 SNR 变化

分别对模拟的带有 SNR 分别为 0、5、15、20、30、40 噪声的平面径向速度场进行连续性缺口  $10^\circ \sim 180^\circ$  的迭代填补, 结果见图 3 和表 3, 在信噪比不变的情况下, 随着累积缺测区的增大, 迭代次数也逐渐增多, 终止迭代时平均 RMS 值也呈线性增大但

增长幅度较小, 迭代法填补径向速度场缺测区所得的  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$  的相对误差  $\epsilon_{u_0}, \epsilon_{v_0}, \epsilon_{u_x}, \epsilon_{v_y}, \epsilon_{u_x + v_y}, \epsilon_{u_x - v_y}$  都相应的增大; 一个距离圈上迭代填补前后速度值相对误差  $\epsilon$  也呈线性增长趋势,  $\epsilon$  值在  $180^\circ$  累积缺口时最大可达 52.56%; 当 SNR 不同时, 在累积缺口  $\leq 120^\circ$  条件下, 随着 SNR 的减小,  $\epsilon_{u_0}, \epsilon_{v_0}, \epsilon_{u_x}, \epsilon_{v_y}, \epsilon_{u_x + v_y}, \epsilon_{u_x - v_y}$ 、80 km 距离圈上  $\epsilon$  值基本呈缓慢线性增加趋势, 0、1、2 阶谐波的总体误差能控制在 15% 以内, 缺口处速度场迭代填补前后的  $\epsilon$  值也基本能控制在 30% 左右; 当累积缺口  $\geq 120^\circ$  时,

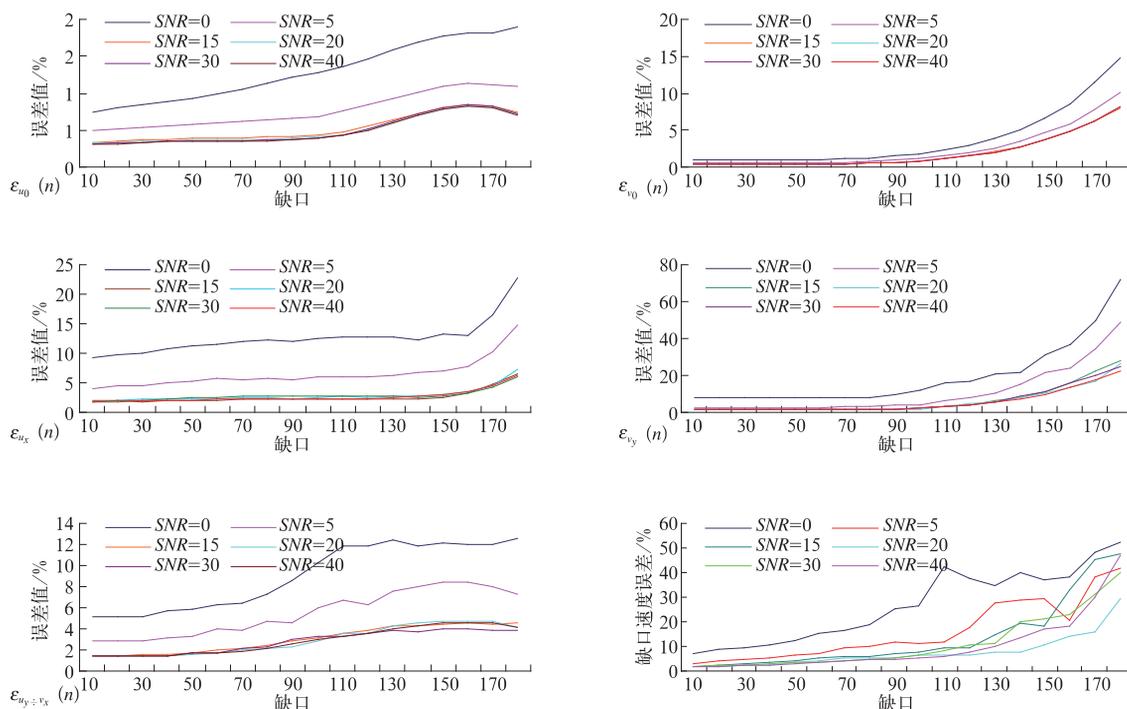


图 3 不同 SNR 条件下, 迭代法填补径向速度场无回波区误差分析图

Fig. 3 Under different SNR conditions, the error analysis of filling velocity field non-echo area with repetitive processing

表 3 不同 SNR 条件下迭代法填补 10°~180°缺测区域的平均值

Table 3 Under different SNR conditions, the average RMS analysis result of filling continuously gap from 10° to 180° iteration radial velocity field non-echo area with repetitive processing

累积 缺口	SNR=40		SNR=30		SNR=20		SNR=15		SNR=5		SNR=0	
	迭代次数	RMS	迭代次数	RMS	迭代次数	RMS	迭代次数	RMS	迭代次数	RMS	迭代次数	RMS
10°	21	5.6E-16	21	1.36E-16	21	1.6E-16	21	1.36E-16	21	1.35E-16	21	1.5E-16
20°	31	2.89E-16	31	3.32E-16	31	3.02E-16	31	3.74E-16	31	3.75E-16	31	3.14E-16
30°	42	5.62E-16	42	6.06E-16	42	6.81E-16	42	6.97E-16	42	6.71E-16	42	7.36E-16
40°	55	1.25E-15	55	1.08E-15	55	1.2E-15	55	1.22E-15	55	1.16E-15	55	1.3E-15
50°	73	1.84E-15	73	1.91E-15	73	1.89E-15	73	1.92E-15	73	1.89E-15	73	1.99E-15
60°	97	2.64E-15	97	2.69E-15	97	2.68E-15	97	2.69E-15	97	2.65E-15	97	2.76E-15
70°	130	3.37E-15	130	3.39E-15	130	3.42E-15	130	3.35E-15	130	3.36E-15	130	3.46E-15
80°	177	3.99E-15	177	4.06E-15	177	4.04E-15	177	3.97E-15	177	4.03E-15	177	4.08E-15
90°	242	4.96E-15	242	4.89E-15	242	4.86E-15	242	4.98E-15	243	4.78E-15	242	5.02E-15
100°	336	6.3E-15	336	6.28E-15	336	6.27E-15	336	6.29E-15	336	6.16E-15	335	6.49E-15
110°	472	8.19E-15	472	8.31E-15	472	8.36E-15	472	8.36E-15	472	8.22E-15	473	8.46E-15
120°	682	1.15E-14	681	1.17E-14	681	1.16E-14	681	1.18E-14	681	1.17E-14	681	1.2E-14
130°	997	1.74E-14	999	1.71E-14	999	1.68E-14	998	1.71E-14	998	1.71E-14	1001	1.76E-14
140°	1496	2.66E-14	1495	2.64E-14	1495	2.68E-14	1495	2.69E-14	1496	2.66E-14	1497	2.78E-14
150°	2274	4.41E-14	2272	4.44E-14	2274	4.43E-14	2272	4.42E-14	2273	4.39E-14	2274	4.62E-14
160°	3505	7.63E-14	3504	7.61E-14	3505	7.67E-14	3503	7.53E-14	3502	7.68E-14	3510	8.07E-14
170°	5496	1.38E-13	5496	1.38E-13	5495	1.37E-13	5493	1.37E-13	5482	1.39E-13	5505	1.43E-13
180°	8756	2.55E-13	8753	2.55E-13	8754	2.55E-13	8761	2.53E-13	8755	2.56E-13	8808	2.63E-13

$\epsilon_{v_0}$ 、 $\epsilon_{u_x}$ 、 $\epsilon_{v_y}$  呈显著性线性增加趋势,  $\epsilon_{u_0}$ 、 $\epsilon_{u_y \div v_x}$  呈先增大、后减小的变化趋势, 80 km 距离圈上  $\epsilon$  呈现先增大、后减小, 再增大的变化趋势, 这可能是由于随着累积缺口增加, 噪声功率对迭代填补求取平均  $\epsilon$  的影响也逐渐减小的缘故, 说明迭代法填补在累积缺口  $\geq 120^\circ$  时效果不好; 当  $SNR \leq 5$  时, 由于噪声功率较大,  $\epsilon_{u_0}$ 、 $\epsilon_{v_0}$ 、 $\epsilon_{u_x}$ 、 $\epsilon_{v_y}$ 、 $\epsilon_{u_y \div v_x}$  和 80 km 距离圈上  $\epsilon$  值增加很快, 迭代法填补速度场无回波区的效果不明显, 说明迭代法填补多普勒速度场无回波区受信噪比  $SNR$  和

累积缺口的影响较大, 在  $SNR \geq 5$ 、累积缺口  $\leq 120^\circ$  时迭代填补的误差能满足实际业务需求。

以  $SNR=15$  dB、 $\sigma_v=2$  m·s<sup>-1</sup> 随机取连续性累积缺口为  $120^\circ$  为例(图 4), 图 4a 为模拟的带  $SNR=15$ 、 $\sigma_v=2$  m·s<sup>-1</sup> 噪声的平面径向速度场图, 图 4b 为人为设计的  $120^\circ$  连续性缺口, 图 4c 为迭代填补后的速度图, 可以看到填补效果较好。因此本文建议的迭代法在信噪比  $SNR \geq 5$ 、连续累积缺口  $\leq 120^\circ$  的情况下, 能较高精度地填补平面径向速度场无回波区。

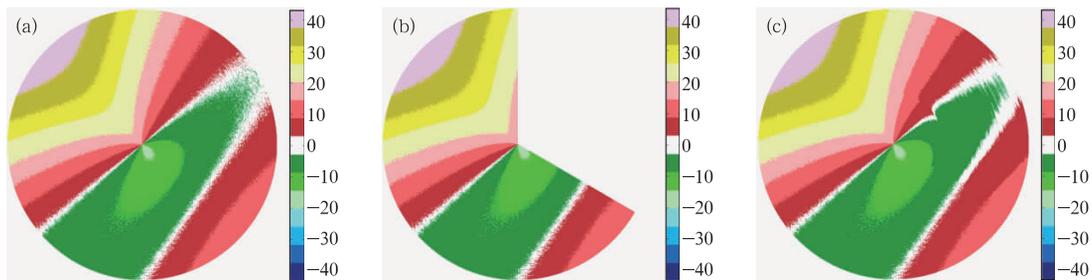


图 4 SNR=15 dB、 $\sigma_v=2$  m·s<sup>-1</sup> 连续累积缺口  $120^\circ$  时迭代填补前后平面速度图

(a) 模拟图; (b) 缺口图; (c) 填补图

Fig. 4 When  $SNR=15$  dB,  $\sigma_v=2$  m·s<sup>-1</sup>, the comparison images of the simulated velocity field that filled continuously gap non-echo areas with repetitive processing

(a) simulation image, (b) the  $120^\circ$  gap image, (c) filled image

3.3.2 信噪比  $SNR$  一定, 速度谱宽  $\sigma_v$  变化  
在  $SNR=20$  dB、 $\sigma_v=1, 2, 3, 4, 5, 6$  m·s<sup>-1</sup> 条

件下, 模拟的 6 个带噪声的平面径向速度场, 分别进行连续性缺口  $10^\circ \sim 180^\circ$  迭代填补, 结果如表 4 和

图 5 所示,在谱宽一定的条件下,随着累积缺测区的增大,迭代次数也逐渐增多,终止迭代时平均 RMS 值也呈线性增大但增长幅度较小,迭代法填补径向速度场缺测区所得的  $u_0, v_0, u_x + v_y, u_x - v_y, u_y + v_x$

的相对误差  $\epsilon_{u_0}, \epsilon_{v_0}, \epsilon_{u_x}, \epsilon_{v_y}, \epsilon_{u_y + v_x}$  都相应的增大;一个距离圈上迭代填补前后速度值相对误差  $\epsilon$  也呈线性增长趋势;当  $\sigma_v$  不同时,随着  $\sigma_v$  的增大  $\epsilon_{u_0}, \epsilon_{v_0}, \epsilon_{u_x}, \epsilon_{v_y}, \epsilon_{u_y + v_x}$  及 80 km 距离圈上迭代法填补缺测区

表 4 不同  $\sigma_v$  条件下迭代法填补  $10^\circ \sim 180^\circ$  缺测区域的平均值

Table 4 Under different  $\sigma_v$  conditions, the average RMS analysis result of filling continuously gap from  $10^\circ$  to  $180^\circ$  iteration radial velocity field non-echo area with repetitive processing

累积 缺口	$\sigma_v=1$		$\sigma_v=2$		$\sigma_v=3$		$\sigma_v=4$		$\sigma_v=5$		$\sigma_v=6$	
迭代次数	RMS											
10°	21	1.18E-16	21	1.6E-16	21	1.30E-16	21	1.18E-16	21	1.18E-16	21	1.31E-16
20°	31	3.85E-16	31	3.02E-16	31	3.74E-16	31	3.7E-16	31	3.6E-16	31	3.49E-16
30°	42	7.3E-16	42	6.81E-16	42	6.75E-16	42	6.53E-16	42	5.71E-16	42	6.8E-16
40°	55	1.26E-15	55	1.2E-15	55	1.17E-15	55	1.21E-15	55	1.21E-15	55	1.21E-15
50°	73	1.95E-15	73	1.89E-15	73	1.84E-15	73	1.86E-15	73	1.82E-15	73	1.94E-15
60°	97	2.64E-15	97	2.63E-15	97	2.68E-15	97	2.72E-15	97	2.68E-15	97	2.6E-15
70°	130	3.34E-15	130	3.42E-15	130	3.32E-15	130	3.37E-15	130	3.42E-15	130	3.37E-15
80°	177	4.06E-15	177	4.04E-15	176	4.11E-15	177	3.98E-15	176	4.06E-15	176	4.04E-15
90°	242	4.89E-15	242	4.86E-15	242	4.98E-15	242	4.87E-15	242	4.94E-15	241	4.97E-15
100°	336	6.25E-15	336	6.27E-15	335	6.23E-15	335	6.29E-15	334	6.13E-15	331	6.22E-15
110°	472	8.34E-15	472	8.36E-15	471	8.24E-15	467	8.35E-15	467	8.29E-15	468	8.16E-15
120°	682	1.17E-14	681	1.16E-14	675	1.18E-14	677	1.18E-14	680	1.15E-14	682	1.16E-14
130°	1001	1.73E-14	999	1.68E-14	999	1.71E-14	1001	1.75E-14	1006	1.74E-14	1010	1.74E-14
140°	1498	2.69E-14	1495	2.67E-14	1496	2.69E-14	1503	2.69E-14	1510	2.74E-14	1514	2.85E-14
150°	2276	4.43E-14	2274	4.43E-14	2277	4.43E-14	2287	4.5E-14	2299	4.73E-14	2309	4.91E-14
160°	3509	7.56E-14	3505	7.67E-14	3514	7.8E-14	3533	8.14E-14	3557	8.38E-14	3572	8.87E-14
170°	5499	1.35E-13	5495	1.37E-13	5510	1.43E-13	5560	1.47E-13	5596	1.55E-13	5637	1.59E-13
180°	8772	2.46E-13	8754	2.55E-13	8819	2.62E-13	8914	2.67E-13	9003	2.67E-13	9074	2.76E-13

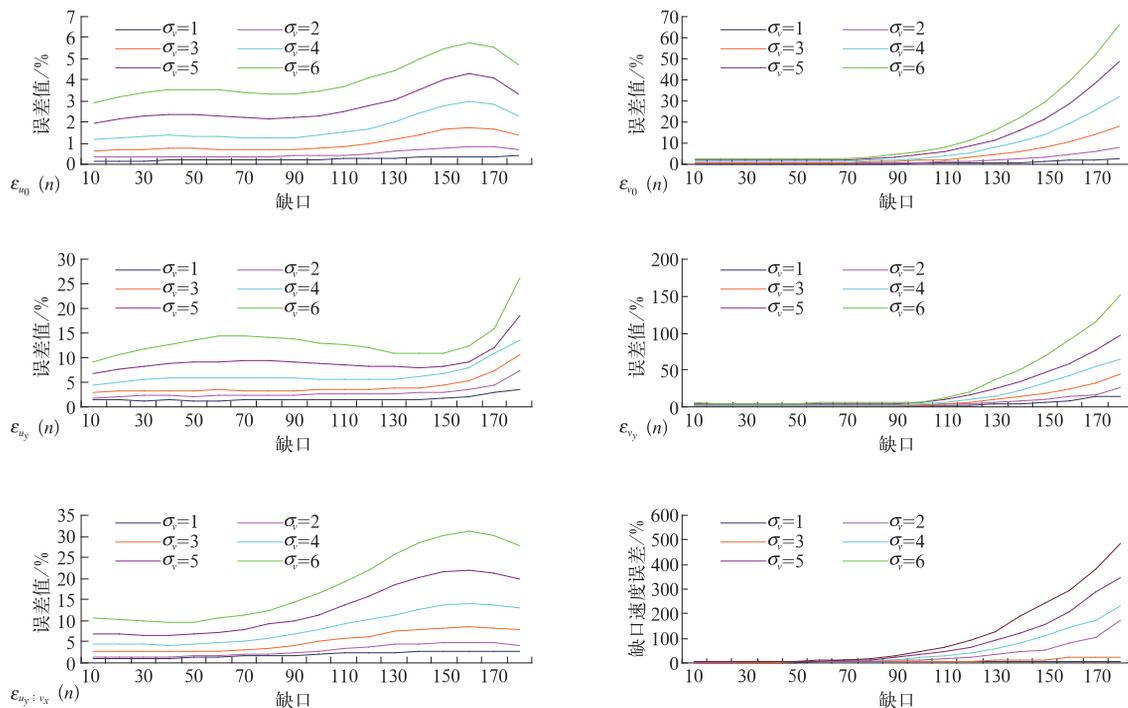


图 5 不同  $\sigma_v$  条件下,迭代法填补径向速度场无回波区误差分析图  
Fig. 5 Under different  $\sigma_v$  conditions, the error analysis chart of filling radial velocity field non-echo area with repetitive processing

的速度值相对误差  $\epsilon$  增大非常明显,尤其在缺测区  $>120^\circ$  时,0、1、2 阶谐波相对误差基本上都在 15% 以上, $\epsilon$  值则达到了 100% 以上,迭代填补效果并不明显;当  $\sigma_v < 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、缺测区域  $<120^\circ$  时,0、1、2 阶谐波相对误差均在 10% 以内变化,80 km 距离圈迭代法填补缺测区速度值相对误差  $\epsilon$  在 1% 到 20% 之间变动,说明在此缺测区范围迭代法填补精度较高,效果较好; $\sigma_v > 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,缺测区域  $>120^\circ$  以上的迭代法填补效果并不理想,0、1、2 阶谐波相对误差均大于 10%,80 km 距离圈的速度  $\epsilon$  值均大于 30%,特别是  $\sigma_v = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,100° 缺测区的  $\epsilon_{u_y \div v_x}$  值已达到 19%、80 km 距离圈的速度  $\epsilon$  已达到 30.5%,填补效果不好。由此可见,速度谱宽的大小

对迭代法填补平面速度场无回波区有较大影响,本文建议,在用迭代法填补速度场缺测区域时,累积连续缺口最好在  $120^\circ$  以内,速度谱宽  $\sigma_v$  最好在  $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下填补效果和精度才能达到满意效果。

以  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 、 $\sigma_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  随机取连续性累积缺口为  $120^\circ$  为例(图 6),图 6a 为模拟的带  $\text{SNR} = 20$ 、 $\sigma_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  噪声的平面径向速度场图,图 6b 为人为设计的  $120^\circ$  连续性缺口,图 6c 为迭代填补后的速度图,可以看到填补效果较好。因此本文建议的迭代法在信噪比  $\sigma_v \leq 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、连续累积缺口  $\leq 120^\circ$  的情况下,能较高精度地填补平面径向速度场无回波区。

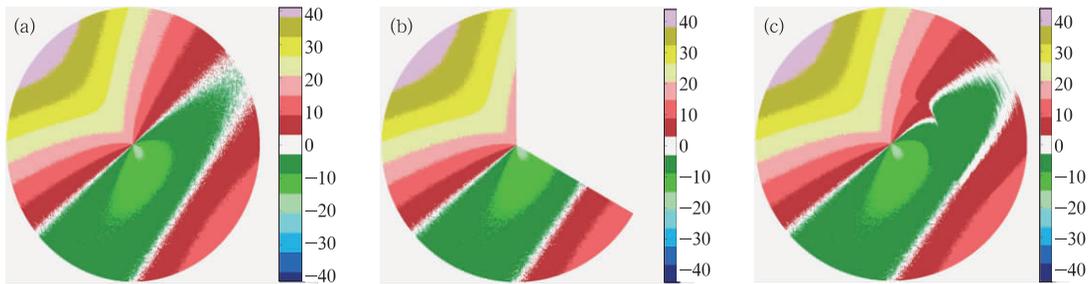


图 6  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 、 $\sigma_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  连续累积缺口  $120^\circ$  时迭代填补前后平面速度图

(a) 模拟图; (b) 缺口图; (c) 填补图

Fig. 6 When  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ 、 $\sigma_v = 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the comparison images of the simulated radar velocity field that filled continuously gap  $120^\circ$  iteration non-echo areas with repetitive processing

(a) simulated image, (b) the  $120^\circ$  gap image, (c) filled image

### 3.4 非全方位不均匀采样的条件下,迭代法填补速度场无回波区结果分析

在实际情况下,测站周围的降水回波分布不均匀,同一距离圈上存在着不同的缺测数;另外在资料使用前必须做质量检验、剔除奇异点,这样也会出现一些空隙和缺测区域。为此,模拟了随机取的非连续性缺口(代表积累的  $V_r(\theta)$  缺测区)即非全方位不均匀采样,从而使模拟回波的速度资料更加接近真实情况。

本文分别对模拟的带有  $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{SNR} = 40, 30, 20, 15, 5, 0 \text{ dB}$  和  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ ,  $\sigma_v = 6, 5, 4, 3, 2, 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  噪声的 12 个平面线性速度场随机取非连续性缺口  $0^\circ \sim 180^\circ$ , 并用迭代法进行无回波区填补,结果如图 7、图 8 所示,在同一个噪声情况下,随着累积缺测区的增大,迭代次数也逐渐增大但增

大幅度很小,0、1、2 阶谐波相对误差和 80 km 距离圈上迭代法填补缺测区的速度值相对误差  $\epsilon$  增幅几乎不变,说明对于非连续性缺口的平面速度场,缺口的大小对迭代次数和迭代效果的影响较小,迭代法填补的精度和效果能达到满意程度;在速度谱宽  $\sigma_v$  固定  $\text{SNR}$  改变的条件下,随着  $\text{SNR}$  减小即机内噪声逐渐增大,0、1、2 阶谐波相对误差和 80 km 距离圈上迭代法填补缺测区的速度值相对误差  $\epsilon$  有缓慢增加趋势但误差值均控制在 15% 以内,对  $\text{SNR}$  固定速度谱宽  $\sigma_v$  改变的条件下,随着  $\sigma_v$  的逐渐增大,误差值的变化趋势与上述基本一致,总体误差也都控制在 15% 以内,说明对模拟的附加不同噪声的平面径向速度场,用迭代法填补随机非连续性缺口时,噪声和缺口大小对迭代填补的效果影响较小,迭代法能较为精确地填补非连续缺口在  $180^\circ$  以内的附加不同噪声的平面径向速度场。

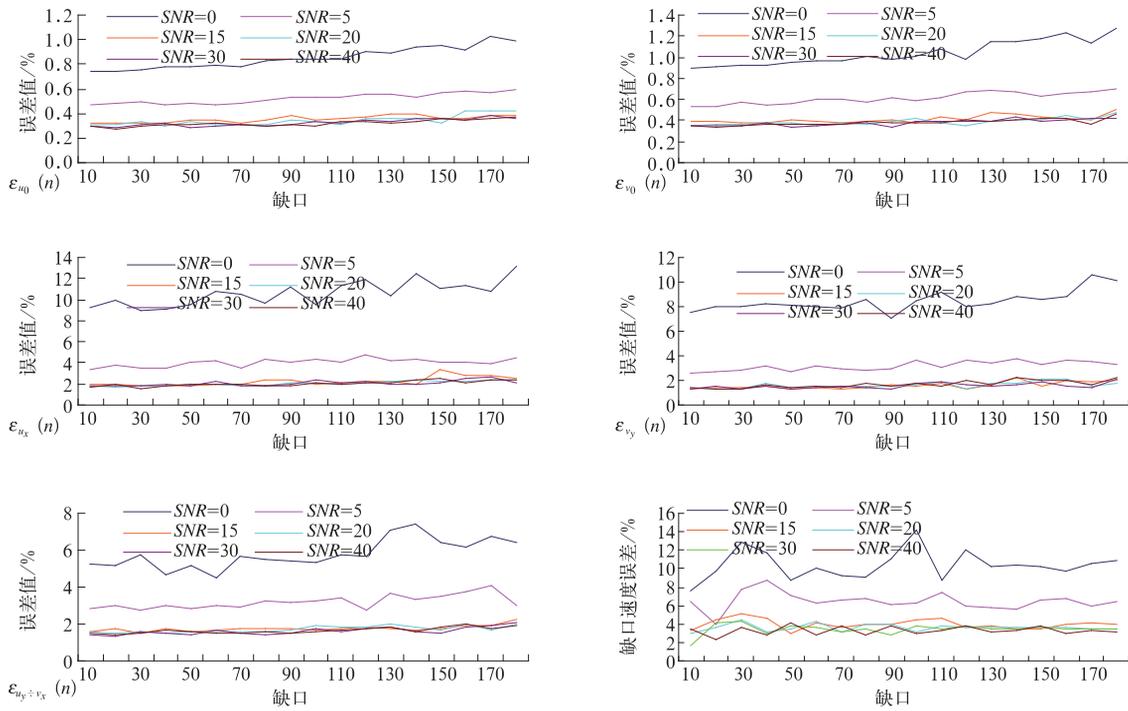


图 7 不同 SNR 条件下,迭代法填补随机缺口径向速度场无回波区误差分析图

Fig. 7 Under different SNR conditions, the error analysis chart of the random gap velocity field non-echo area filled with repetitive processing

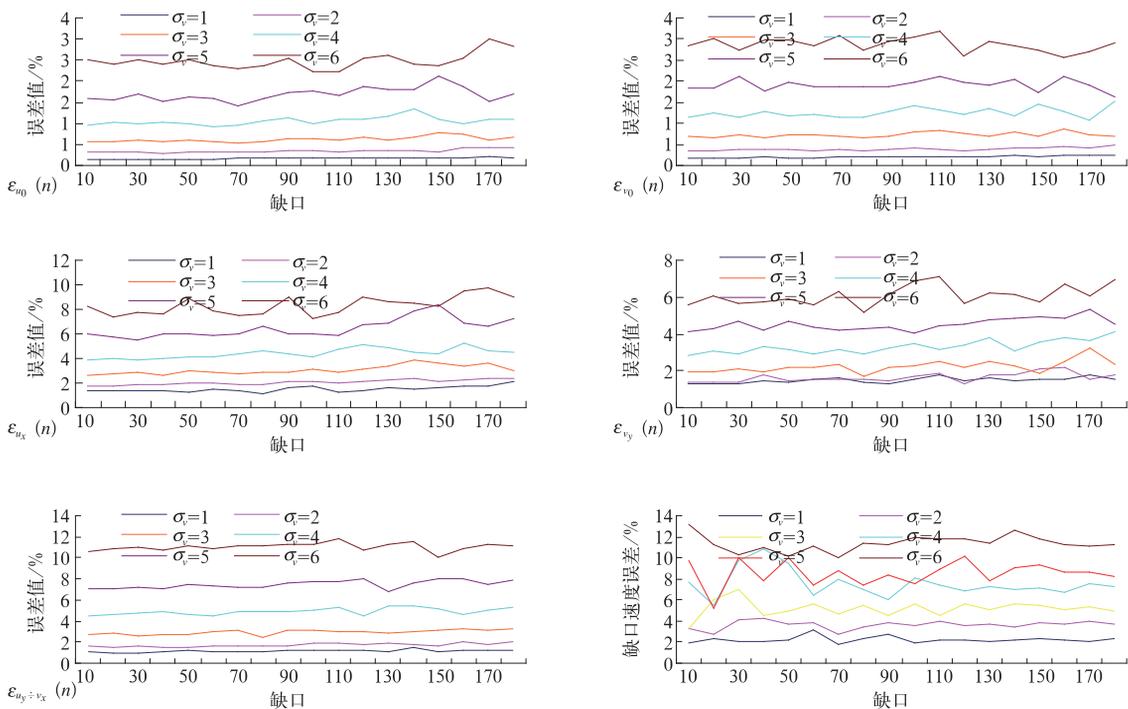


图 8 不同  $\sigma_v$  条件下,迭代法填补随机缺口径向速度场无回波区误差分析图

Fig. 8 Under different  $\sigma_v$  conditions, the error analysis chart of the random gap velocity field non-echo area filled with repetitive processing

### 3.5 实测多普勒速度场无回波区的迭代填补分析

在数值模拟的基础上,本文利用迭代法对实测多普勒速度场无回波区进行填补。云南的 6 部 CINRAD-CC 多普勒天气雷达在实际探测风场资料中常出现因地物阻挡造成缺测和实际观测两种无回波区。本文选取速度场资料比较完整的普洱雷达、存在实际无回波区的昆明雷达和因挡角造成无回波区的丽江雷达的探测资料,进行有代表性的迭代填补实验。

#### 3.5.1 实测多普勒雷达完整速度场人为缺口的无回波区迭代填补效果分析

选取 2007 年 7 月 19 日 10:48 速度场资料比较完整的普洱多普勒速度场探测资料( $0.5^\circ$ 仰角),人为做  $0^\circ\sim 110^\circ$  的连续缺口,然后用迭代法对无回波区进行填补。从填补效果分析(图 9),填补后的速度图不但能消除奇异点的影响,还能较好反映缺失的零速度线的走向,同时还能更清晰地反映出大范围辐合线性分场特征。

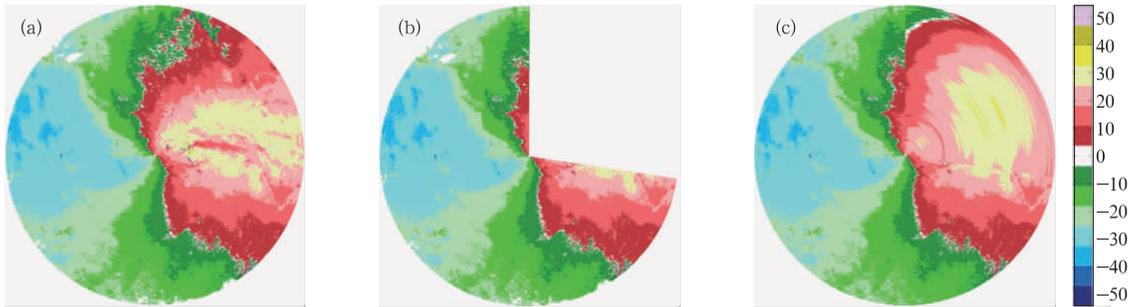


图 9 普洱实测速度图连续累积缺测方位角  $110^\circ$  填补效果  
(a) 原始图像; (b) 连续累积  $110^\circ$  缺口图; (c) 填补图

Fig. 9 The comparison images of the actual observed radar velocity field that filled continuously gap  $110^\circ$  iteration non-echo areas with repetitive processing in Pu'er radar station

(a) original image, (b) the  $110^\circ$  gap image, (c) filled image

#### 3.5.2 实测多普勒雷达速度场无回波区迭代填补效果分析

选取 2007 年 7 月 19 日 15:22 本身存在非连续无回波区较多的昆明雷达速度场资料( $0.5^\circ$ 仰角)和 2007 年 7 月 20 日 7:22 因地物阻挡造成的低仰角回波缺测区域较多的丽江多普勒速度场探测资料( $1.5^\circ$ 仰角),利用迭代法对无回波区进行填补。从填补前后图像(图 10)对比分析可看出,对昆明实测速度场资料,填补后的速度图能基本消除奇异点的

影响,迭代填补后的图像与原图几乎保持一致的零速度线特征。迭代填补后风场的分布特征更加明显,使填补后图像更适合于定量降水估算和风场散度与形变等信息的提取。对丽江实测多普勒速度场资料,当一个等距离圈上的累积缺口  $\leq 120^\circ$  时,迭代法填补效果比较满意,填补后的速度场能较清晰地显示出风场的零速度线走向、速度场中心区位置和风场辐合等特征。

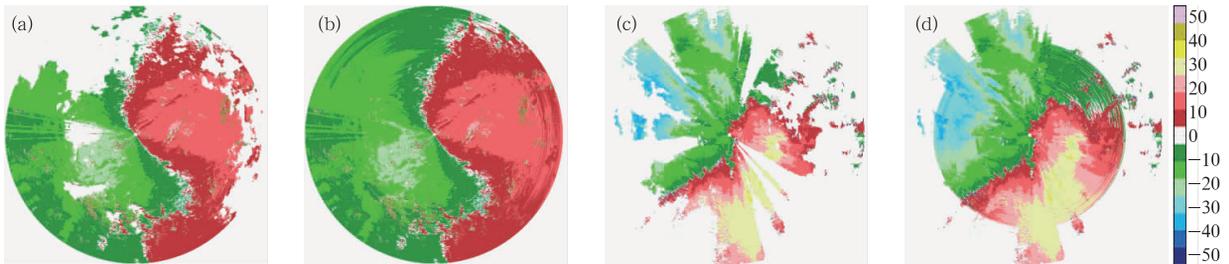


图 10 昆明、丽江雷达站实测多普勒速度场资料迭代填补前后图

(a) 昆明实测速度图; (b) 昆明填补图; (c) 丽江实测速度图; (d) 丽江填补图

Fig. 10 The comparison images of the actual observed Doppler velocity field that filled non-echo areas with repetitive processing in Kunming and Lijiang radar stations

(a) Original velocity image in Kunming, (b) filled velocity image in Kunming, (c) Original velocity image in Lijiang, (d) filled velocity image in Lijiang

## 4 结 论

通过理论分析和对模拟资料的计算分析以及实测多普勒速度场无回波区填补,结果表明:

(1) 对模拟的无噪声平面径向速度场,迭代法能基本无误差的填补连续累积缺口值在  $180^\circ$  以内的速度场,填补后 0、1、2 阶谐波误差绝对值及 80 km 距离圈上迭代填补缺测区速度误差均趋向 0。

(2) 对模拟的连续性累积缺口为  $0^\circ \sim 180^\circ$  的平面径向速度场,在  $\sigma_v = 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{SNR} = 40, 30, 20, 15, 5, 0 \text{ dB}$  的情况下,迭代法填补速度场无回波区在  $\text{SNR} \geq 5 \text{ dB}$ 、连续累积缺口  $\leq 120^\circ$  条件下填补精度和效果较好,填补后 0、1、2 阶谐波误差绝对值均控制在 15% 以内,80 km 距离圈上迭代填补缺测区的速度误差控制在 30% 以内。

(3) 对模拟的连续性累积缺口为  $0^\circ \sim 180^\circ$  的平面径向速度场,在  $\text{SNR} = 20 \text{ dB}$ ,  $\sigma_v = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  情况下,迭代法填补速度场无回波区在  $\sigma_v \leq 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 连续累积缺口  $\leq 120^\circ$  条件下填补精度和效果较好,填补后 0、1、2 阶谐波误差绝对值均控制在 15% 以内,80 km 距离圈上迭代填补缺测区的速度误差控制在 30% 以内。

(4) 对模拟的非连续性累积缺口为  $0^\circ \sim 180^\circ$  的平面径向速度场,在不同速度谱宽和不同  $\text{SNR}$  条件下,迭代法均能较为精确地填补速度场无回波区,填补后 0、1、2 阶谐波误差绝对值及 80 km 距离圈上迭代填补缺测区的速度误差均能控制在 15% 以内。

(5) 用迭代法对实测多普勒速度场进行填补,发现对人为缺口的无回波区和存在因挡角和本身无回波区的速度场资料,在连续累积缺口  $\leq 120^\circ$  情况

下,迭代法均能较好地填补无回波区,填补效果较好,填补后的速度图不但能消除奇异点的影响,较好地反映缺测的零速度线的走向,还能更清晰地反映出大范围辐合线性分场特征,使填补后图像更适合于计算机反演降水定量算法、风场散度、形变等信息的提取。

## 参 考 文 献

- [1] Lhermitte R H, Atlas D. Reception motion by pulse Doppler radar [A], Preprint 9th conference on Radar Meteorology [C]. Boston: Amer Meteor Soc, 1961: 218-223.
- [2] Thomas Matejks, Srivastava. An improved version of the extended velocity-azimuth display analysis of single-Doppler data [J]. J Atmos Oceanic Technol, 1991, 8(4): 453-456.
- [3] 胡明宝, 高太长, 汤达章. 多普勒天气雷达资料分析与应用 [M]. 北京: 解放军出版社, 2000.
- [4] 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.
- [5] 王凌震, 王啸华, 薛小宁, 等. 新一代天气雷达观测受遮挡范围内数据插补技术方法 [J]. 气象科学, 2005, 25(4): 405-409.
- [6] 万蓉, 汤达章, 张鹏, 等. 非线性风场的 VAD 分析初探 [J]. 气象科学, 2003, 23(3): 314-323.
- [7] 忻翎艳, 汤达章. 由 VVP 探测技术提取风场信息的方法 [J]. 气象科学, 1990, 10(4): 400-408.
- [8] 汤达章, 忻翎艳. VAD 和 VARD 速度资料获取风场信息的方法 [J]. 南京气象学院学报, 1989, 12(3): 66-73.
- [9] 徐芬, 夏文梅, 吴蕾, 等. 多普勒天气雷达速度 PPI 图散度分布信息提取 [J]. 气象, 2007, 33(11): 21-27.
- [10] Dale Sirmans, Bill Bungarner. Numerical Comparison of Five Mean Frequency Estimators [J]. Appl Meter, 1975, 14(9): 991-1003.
- [11] 杜晓勇, 张鹏, 胡明宝. VAD 技术反演平均风向风速的研究 [J]. 解放军理工大学学报, 2002, 3(3): 81-84.
- [12] 赵恒轩. 天气雷达及其信号处理 [M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1999.