

文章编号: 2096-1618(2020)06-0594-05

# 多普勒雷达风场的拟合补盲

胡诗朋<sup>1</sup>, 洁拉曲铁<sup>1</sup>, 王海江<sup>1</sup>, 李静<sup>2</sup>, 王国强<sup>2</sup>, 徐自励<sup>2</sup>

(1. 成都信息工程大学电子工程学院, 四川 成都 610225; 2. 中国民航局第二研究所, 四川 成都 610041)

**摘要:**通过构造数学模型,模拟3种缺测风场,根据缺测区域周围有数值的点,用最小二乘法确定最佳拟合曲线推测风场缺测区的值。该方法分别对速度大小方向都不变化的均匀风场、速度不断变小的辐散型风场及速度方向不断变化的龙卷风进行数值拟合,得到拟合后的风场矢量图,最后通过雷达体积扫描拟合的风场得到径向速度PPI图。该方法区别于传统的反演方式,无须假设风场为线性分布,而是直接对风场有数值的点进行非线性的拟合,适用于小范围风场缺测区的拟合补盲。

**关键词:**最小二乘法; 拟合; 缺测

**中图分类号:** TN958.2

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.002

## 0 引言

多普勒天气雷达是目前气象探测的重要工具,不仅能够探测降水回波的强度,而且还能够对风场的分布和结构进行分析,将风矢量映射到雷达径向上,通过分析多普勒速度提高天气预报的精度和临近预报的准确率。但是在多普勒雷达实际探测大面积的降水回波时,经常会因为地面障碍物的阻挡、距离折叠、无回波区造成的风场缺测<sup>[1-2]</sup>。

风场缺测成了影响多普勒雷达反演的重要因素,为此研究人员在多普勒雷达回波补盲的技术上展开了一系列的研究工作, Lhermitt<sup>[3]</sup>提出了单部多普勒雷达测量风场的方法,即 VAD(velocity azimuth display)技术,这种方法,只需用一部多普勒雷达就能得到降水区域里每个高度上的风场信息。Thomas<sup>[4]</sup>在速度方位显示(VAD)方法的基础上先后提出了速度面积显示(VARD)和速度体积处理(VVP)三维风场反演技术; VVP技术对径向速度进行线性分析来反演该区域的散度和形变量,但该方法不能确定唯一的的风场和涡度场。Srivastava等<sup>[5]</sup>将VAD方法加以改良,得到推广速度方位显示方法(extended VAD),该方法有助于获得大范围降水中水平散度、垂直风速和降水终端速度的垂直分布;并对EVAD技术进行改进,总结处理速度数据和从数据集中剔除异常值的步骤,并提出收集雷达数据用于EVAD分析的建议。陶祖钰<sup>[6]</sup>提出了单普勒天气雷达的PPI资料反演水平风场的VAP方法,但是该方法需要假定相邻方位角风矢量相同,反演

结果有一定的误差。Feliks等<sup>[7]</sup>提出一种矢量场最优插值方法,结果表明矢量估计器及其相关误差与风场坐标系的选择无关,利用该方法确定最佳观测站数目和地点表示给定区域内的风。向量相关系数由回归矩阵类似于标量的方式定义,它独立于坐标系,并且在参数上是对称的。与常用的风场插值比较,该方法在量级和方向上都有明显的改进。

邱崇践<sup>[8]</sup>改进了Qiu等<sup>[9]</sup>提出的由单个Doppler雷达探测的资料反演水平风场的简单共轭方法,做法是将控制方程中的状态变量改用其时间距平量代替,并加入待反演的方程误差项。胡明宝等<sup>[10]</sup>采用拉格朗日插值的数值算法补缺测点,梁海河等<sup>[11]</sup>提出k-邻域频数法来消除速度模糊和填补缺测区域。

在风场速度补盲方面,王凌震等<sup>[12]</sup>使用高仰角的速度对低仰角的无回波的区域进行填补,但这种方法只适用于风场高低层一致的情况;沃伟峰<sup>[13]</sup>采用线性方法对缺测区域相邻的数值插值达到补盲,该方法只适合方位角低于8°的情况。Kun等<sup>[14]</sup>提出一种以非线性理论为基础的反演方法,考虑雷达的径向风场数据和风场分片光滑的特点,反演较高分辨率和准确性的二维风场,且垂直风场的反演比较合理。徐芬等<sup>[15]</sup>基于VAD技术的迭代填补方法处理较多无回波区的实测多普勒速度场,此方法未对小尺度非线性速度场进行补盲。方德贤等<sup>[16]</sup>根据风场连续性和局部分片光滑的特点,在假设风场矢量是线性变化的条件下,提出了EVPP方法。

对数学模型构造的缺测区进行最小二乘法<sup>[17]</sup>拟合,通过缺测区附近有数值的点拟合一条误差最小的拟合曲线,使该拟合曲线与真实的风场矢量轨迹基本

收稿日期: 2020-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1733103), 四川省科技厅资助项目(2019JZ0030)

重合,外推得到缺测点的位置,最后利用雷达体积扫描得到处理后的径向 PPI 图,为分析多普勒回波提供方便。补盲结果表明,基于曲线拟合的最小二乘法能够较好地应用于非线性的风场小范围缺测区域,且此方法不需要复杂的假设条件,具有较好的应用价值。

## 1 算法介绍

### 1.1 曲线拟合最小二乘法

假设  $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$  是  $n$  个线性无关的连续函数,  $\varphi_n$  是由  $\varphi_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$  的所有线性组合构成的函数组合,记  $\varphi_n = \text{span}\{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ ,任取  $\varphi(x) \in \Phi_n(x)$ ,则

$$\varphi(x) = \sum_{k=0}^n a_k \Phi_k(x) \quad (1)$$

对已知点  $(x_i, y_i) (i=0, 1, 2, \dots, m)$ ,在  $\Phi_n(x)$  中求函数  $\varphi(x)$ ,使

$$P\delta P_2^2 = \sum_{i=0}^m (\varphi(x_i) - y_i)^2 = \sum_{i=0}^m \left( \sum_{k=0}^n a_k \varphi_i(x_i) - y_i \right)^2 \quad (2)$$

让  $P\delta P_2^2$  达到最小,这就是曲线最小二乘法拟合问题,实质是离散点的最佳平方逼近。

### 1.2 风场矢量模式拟合的基本概念

基于曲线拟合的最小二乘法的原理,对公式(2)进行变量修改处理风场的数据。假设实际的风场为  $V(\mathbf{r}_n)$ ,其中  $\mathbf{r}$  表示位置矢量。用一个假想的场  $W(\mathbf{r}, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k)$  去逼近真实风场,其中  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k$  是  $k$  个待定参数。

假设在  $N$  个已知的点  $\mathbf{r}_n$  上测得风场矢量  $V(\mathbf{r}_n)$ ,调整这些参数使误差的平方和最小,通过式(3)就能得到拟合的理想风场。

$$E(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) = \sum_{n=1}^N |W(\mathbf{r}_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_k) - V(\mathbf{r}_n)|^2 \quad (3)$$

### 1.3 拟合次数比较

为方便阐述本拟合原理,从实际的风场中选择 15 个相邻的点,分析最小二乘法拟合次数对风场补盲效果的影响,选择与真实风场误差最小的曲线。通过 SSE (误差的平方和) 权衡拟合效果, SSE 越小,说明数据预测更为成功。图 1 为拟合 4 次的效果 (SSE=48.25),可以看出该曲线拟合效果不佳,拟合曲线并没有与多数数据点重合。图 2 为拟合 8 次的效果 (SSE=3.315),通过拟合工具箱的计算,拟合 4 次的函数为

$$F1(x) = -0.0000528x^4 + 0.002073x^3 - 0.3086x^2 + 20.72x - 381.1$$

拟合 8 次的函数为

$$F2(x) = -0.00000000003488x^8 + 0.00000002765x^7 - 0.000009458x^6 + 0.0001822x^5 - 0.02162x^4 + 1.618x^3 - 74.57x^2 + 1938x - 2165$$

分析图 1 和图 2 的拟合效果,拟合 8 次后的曲线更为平滑,误差的平方和也更小。

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

其中  $y_i$  为原始数据,  $\hat{y}_i$  为拟合数据, SSE 为误差的平方和。

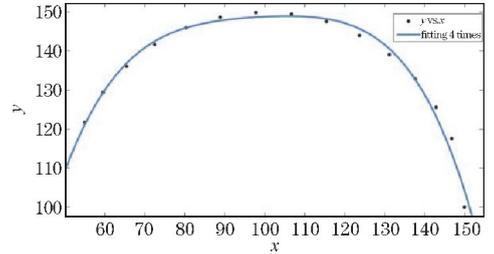


图 1 拟合 4 次曲线

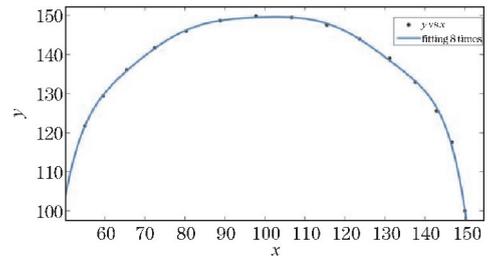


图 2 拟合 8 次曲线

## 2 风场的拟合补盲

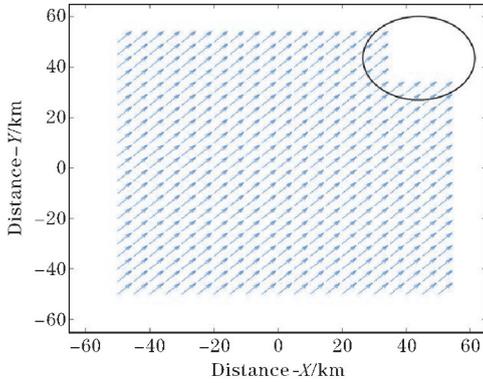
### 2.1 均匀风场补盲

为方便分析风场补盲的效果,首先用数学模型构造了一个速度方向和大小都不随时间变化的均匀风场,对图 3(a) 进行风场缺测处理,使图 3(a) 右上方圈出的范围没有风场数据,表 1 是设置的雷达参数。

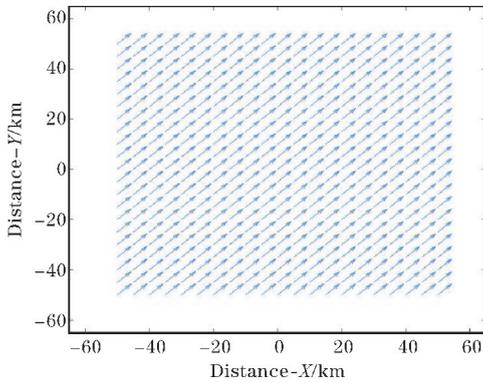
表 1 雷达参数

波束宽度/ $^{\circ}$	距离分辨率/m	最大探测距离/km
1	250	50

因为构造的风场是均匀的,所以通过周围相邻的数据点,就能拟合缺测区域  $4 \times 4$  点的值,效果如图 3(b) 所示。规定远离的雷达探测中心的方向为正方向,靠近雷达中心的方向为负方向。反演拟合后的风场,得到了多普勒径向速度 PPI 图。观察图 4,风场从西南方向向东北方发展,其特征与风场图 3(b) 的反演情况大体一致。



(a) 缺测区的辐散场



(b) 拟合后的辐散场

图3 辐散型风场补盲对比

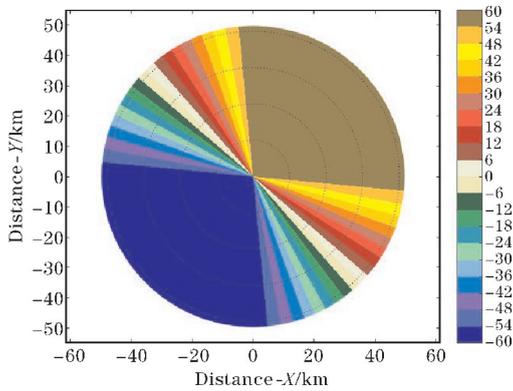


图4 径向速度PPI

### 2.2 辐散风场补盲

风场存在速度相同而方向不同,也有方向和速度均异的情况。图5(a)构造了一个辐散型的风场,其特点是分布在不同位置上空气移动方向和速度是不一致的,因此会引起空气在局部区域聚集,而在一些区域向外辐散。表2为设置的雷达参数。

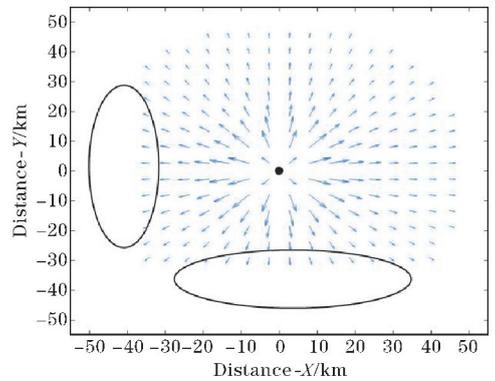
表2 雷达参数

波束宽度/°	距离分辨率/m	最大探测距离/km
1	250	100

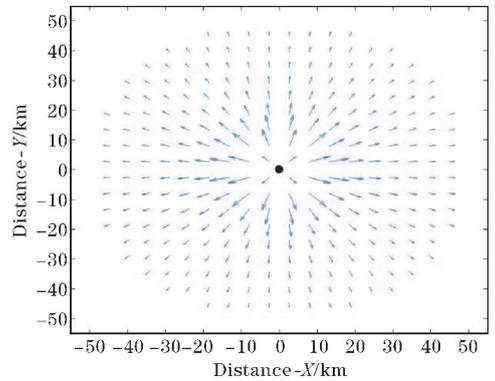
为了分析最小乘法对辐散型风场的补盲效果,对辐散区域进行缺测处理,考虑到该风场的速度也在随着距离衰减,所以此风场并不能只考虑速度方向的变化,而是将速度场衰减的系数同算法结合。设风场的辐散核半径为  $N_R$ ,辐散速度峰值为  $V_{max}$ ,缺测点距离辐散中心(坐标原点)的距离为  $r$ ,公式(5)表示缺测区的速度大小。

$$\begin{aligned} \text{令:} \quad C &= V_{max} N_R \\ v &= C/r \end{aligned} \quad (5)$$

风场缺测区的速度大小  $v$  与距离  $r$  呈反比,说明缺测风场的速度大小随着辐散的距离增加而呈线性衰减,该拟合特征正好与图5(b)的衰减趋势一致。通过分析图6,风场速度在辐散中心不断地变大,且向四周扩散,当速度达到巅峰值后,速度不断地衰减至零。



(a) 缺测区的辐散场



(b) 拟合后的辐散场

图5 辐散型风场补盲对比

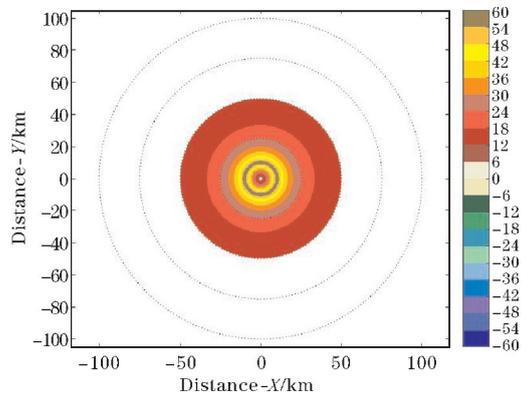


图6 径向速度PPI

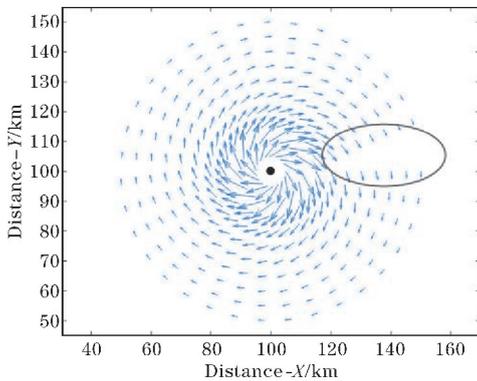
### 2.3 龙卷风场补盲

多普勒天气雷达对于龙卷这一类极端天气现象较难准确探测到,并且龙卷发生的位置距离雷达中心较远,从雷达回波图上常常不能得到完整的多普勒速度图。这是因为龙卷产生的高度较大,雷达通过体扫得到的径向速度 PPI 的范围反而较小。因此构造了小范围的龙卷风缺测区,模拟实际探测龙卷时多普勒速度无回波区的情况。表 3 设置雷达最大探测距离为 200 km,有利于反演多普勒径向速度 PPI。

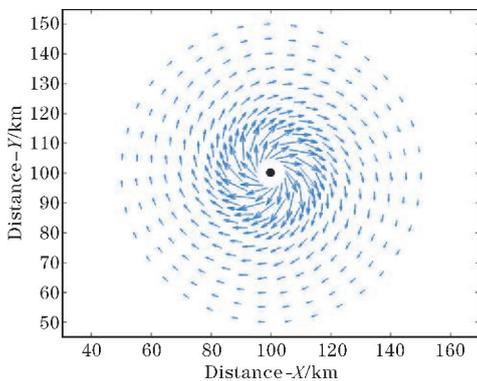
表 3 雷达参数

波束宽度/°	距离分辨率/m	最大探测距离/km
1	250	200

拟合图 7(a) 这种小范围的缺测风场,根据同一条轨迹上的点,通过曲线拟合最小二乘法,使拟合曲线无限逼近真实的风场轨迹,得到图 7(b) 的拟合结果。同时反演得到多普勒径向 PPI 图,观察图 8 颜色,气旋中心的速度方向改变很大,多普勒零值与水平方向呈 45°,零值点上方是正值区,下方为负值区,该龙卷从中心顺时针方向发展。



(a) 缺测区的龙卷



(b) 拟合后的龙卷

图 7 龙卷风场补盲对比

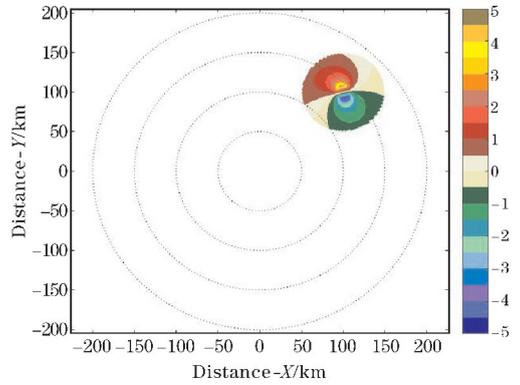


图 8 径向速度 PPI

### 3 结束语

研究最小二乘法对缺测风场的拟合补盲及拟合风场在多普勒径向速度图上的反演特征。首先介绍算法的基本原理,将算法与风场的变量相结合,得到风场矢量模式拟合概念。然后构造风场,使 3 种风场存在无数值的缺测区域,根据风场上已知的点数据,对缺测风场区进行补盲,得到拟合后的完整风场,同时雷达体扫得到径向速度 PPI 图。结果表明,拟合后的风场与缺测风场相比,该算法成功补盲了风场无值区域,且风场的方向和速度大小与已知风场的发展趋势一致。值得注意的是,该拟合方法适用于小尺度的非线性风场,对于一些风场信息缺失较多的风场,该方法并不适用。

### 参考文献:

- [1] 伍荣生. 现代天气学原理[M]. 北京:高等教育出版社,1999.
- [2] Doviak R J, Zrníc D S, Schotland R M. Doppler Radar and Weather Observations[J]. Applied Optics, 1994, 33(21):4531.
- [3] Lhermitte R M. Probing of Atmospheric Motion by Airborne Pulse-Doppler Radar Techniques[J]. Journal of Applied Meteorology, 1971, 10(2):234-246.
- [4] Thomas Matejka Srivastava. An improved version of the extended velocity azimuth display analysis of single-Doppler radar data [J]. Atmos Oceanic Technol, 1991, 8(4):453-466.
- [5] Matejka T, Srivastava R C. An Improved Version of the Extended Velocity-Azimuth Display Analysis of Single-Doppler Radar Data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1991, 8(4):453-466.
- [6] 陶祖钰. 从单 Doppler 速度场反演风矢量场的

- VAP方法[J]. 气象学报, 1992(1):81-90.
- [7] Feliks Y, Gavze E, Givati R. Optimal Vector Interpolation of Wind Fields [J]. Journal of Applied Meteorology, 1996, 35(7):1153-1165.
- [8] 邱崇践. 由单 Doppler 雷达资料反演水平风场的简单共轭函数方法的改进方案[J]. 应用气象学报, 1996(4):421-430.
- [9] Qiu Chongjian, Xu Qin. A Simple Adjoint Method of Wind Analysis for Single-Doppler Data [J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 1992, 9(5):588-598.
- [10] 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: 77-78.
- [11] 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(5):591-599.
- [12] 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的技术方法[J]. 气象科学, 2005, 25(4):405-409.
- [13] 沃伟峰. 多普勒天气雷达二次产品开发平台的设计与实现[D]. 南京: 南京气象学院, 2003.
- [14] Kun Z, Guoqing L, Wenzhong G, et al. Retrieval of single-Doppler radar wind field by nonlinear approximation[J]. Advances in Atmospheric sciences, 2003, 20(2):195-204.
- [15] 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(11):23-131.
- [16] 方德贤, 刘国庆, 董新宁, 等. 单多普勒雷达二维风场反演——Extended VPP 方法[J]. 气象学报, 2007, 65(2):231-240.
- [17] 吕同富, 康兆敏, 方秀男. 数值计算方法. 第2版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

## Blind Fitting of Doppler Radar Wind Field

HU Shipeng<sup>1</sup>, JIELA Qutie<sup>1</sup>, WANG Haijiang<sup>1</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, WANG Guoqiang<sup>2</sup>, XU Zili<sup>2</sup>

(1. College of electronic engineering, Chengdu University of information technology, Chengdu 610225, China; 2. The Second Research Institute of CAAC, Chengdu, 610041, China)

**Abstract:** In this paper, three kinds of missing wind fields are simulated by constructing a mathematical model. According to the points around the missing measurement area, the best fitting curve is determined by the least square method to infer the value of the missing wind field. In this method, the uniform wind field with constant velocity and direction, the divergent wind field with decreasing velocity and tornado with changing velocity direction are numerically fitted to obtain the wind field vector map after fitting. Finally, the radial velocity PPI map is obtained by radar volume scanning. This method is different from the traditional wind field inversion method. It does not need to assume that the wind field is linear distribution, but directly carries on the nonlinear fitting to the wind field points with numerical value, which is suitable for blind fitting of small-scale wind field with missing measurement area.

**Keywords:** least square method; fitting; missing measurement