

文章编号 :1006-7639(2004)-02-0006-05

多普勒雷达资料格点化方案的比较研究

杨 毅 ,邱崇践

(兰州大学大气科学系 ,甘肃 兰州 730000)

摘 要 利用高阶多项式拟合实际雷达速度观测的方法生成模拟资料 ,据此比较了 3 种雷达资料格点化的插值方案 ,它们是先锥面后垂直内插方案(CVI)、3 维 Barnes 插值方案(3D-Barnes)和变分分析方案(VAR)。结果表明 ,3D-Barnes 方案明显优于其它两种 ,特别是在中层 ,CVI 方案的误差略高于前者 ,但是光滑性较差 ,在高层和低层空缺区较大 ,VAR 方案的误差最大。

关键词 :多普勒雷达 格点化 插值

中图分类号 :P412.25

文献标识码 :A

引 言

多普勒雷达观测在时间和空间上均具有较高分辨率 ,是目前大气中尺度分析的最重要的资料来源。但是雷达资料位于以雷达为中心的球坐标内 ,为便于分析运用 ,往往需要将雷达资料插值到直角坐标网格点上(格点化)。多普勒雷达在探测中受雷达硬件设备的精度和地物回波、大气折射与衰减等因素的影响 ,会产生很大的噪音 ,同时雷达扫描仰角一般不均匀 ,还往往有许多缺测区 ,这给资料的格点化带来困难。因此如何根据数据的特点 ,选择适合的插值方案是一个值得研究的问题。目前提出的插值算法有多种 ,采用较多的是双线性插值方法(Miller L J ,1974)^[1]、Barnes 插值方法(Barnes L ,1964 ,以下简称 3D-Barnes)^[2]、先锥面后垂直内插的方法(Sun and Crook ,2001 ,简称 CVI)^[3]和基于变分分析的插值方法(简称 VAR)。双线性插值方法在资料空缺区域较大时会有困难 ,本文不对其进行研究。在远离雷达的地区 ,相邻两个观测资料点的法向距离较大 ,但径向速度不是一个标量 ,插值间隔过大是不适宜的 ,而 VAR 方法可以避免对矢量进行插值产生的问题而被认为有一定优越性^[4]。3D-Barnes 和 CVI 方案较为简单 ,运用比较普遍。本文的目的是对这 3 种方法的插值效果做一个比较。为了尽可能客观和定量比较不同方法的效果 ,本文基于实际雷达资料的分布特征设计了一种产生“理想

资料”的技术 ,用以给出直角坐标网格点上的“真值”。

1 雷达资料插值方案

1.1 3 维 Barnes 插值方法(3D-Barnes)^[2]

3 维 Barnes 插值的基本公式是 :

$$f(r_k) = \frac{\sum_i \omega_i f(r_i)}{\sum_i \omega_i} \tag{1.1}$$

这里的函数 f 现在是雷达回波强度或者是雷达径向速度 ,上标 a 和 o 分别表示分析量和观测量 , r_k 是分析网格点 k 的坐标 , r_i 是观测点 i 上的坐标 , ω_i 是权重系数 ,由下式定义 :

$$\omega_i = \exp[-(r_h^2/2R_h^2 + r_v^2/2R_v^2)] \tag{1.2}$$

其中 r_h 是观测点 i 与分析网格点 k 之间的水平距离 , r_v 是垂直距离 , R_h 、 R_v 分别是预先规定的水平和垂直影响半径。3D-Barnes 方案是一种加权平均算法 ,有外延功能 ,可以滤除部分观测噪音 ,而且计算简便。不过插值结果和周围观测点的均匀度以及影响半径的选择有较大关系。

1.2 先锥面后垂直内插方法(CVI)

首先固定仰角 ,在每个锥面上将资料用二维 Barnes 方法插值到给定的水平网格坐标上 ,权重系数定义如下 :

$$\omega = \exp(-r^2/2R_h^2) \tag{1.3}$$

其中 r 是观测点与分析网格点的水平距离 , R_h 是影响半径。经过插值的资料水平坐标已经和网格坐

收稿日期 2004-04-05 ;改回日期 2004-05-11
基金项目 本项目研究得到国家自然科学基金(40175010)和甘肃人影(2002-1-04)项目资助
作者简介 杨毅(1980-) ,男 ,江苏盱眙县人 ,兰州大学大气科学系在读硕士研究生。

标相同,但它仍然位于锥面上,垂直坐标和网格坐标不同。然后在垂直方向上用一个线性内插得到直角坐标网格资料。这一方法在锥面进行 Barnes 插值,和前一种方法相比影响半径内的资料分布较为均匀,这一步也有外延和滤噪功能。垂直内插时如果资料间距过大会较大误差。

1.3 变分分析方法(VAR)

考虑到雷达观测的径向速度具有向量性质,在切向方向资料空缺较多和接近雷达的地区直接插值并不适合,因此我们提出可以用变分分析方法进行插值。前面的两种方法可以看作是在资料空间进行插值,而变分分析方法是在分析空间进行插值。具体做法如下。

定义下面的目标泛函:

$$J = \frac{1}{2} \sum_m (V_{r,m}^a - V_{r,m}^{ob})^2 + \frac{1}{2} \sum_k [W_{su} (\nabla^2 u^a)_k^2 + W_{sv} (\nabla^2 v^a)_k^2 + W_{sw} (\nabla^2 w^a)_k^2] \quad (1.4)$$

上式右端第一项表示径向速度的分析 $V_{r,m}^a$ 场和观测场 $V_{r,m}^{ob}$ 间的距离。下标 k 是网格点标号, m 是观测点标号,在该点的分析值 $V_{r,m}^a$ 是由周围网格点上的速度分量的分析值 u^a, v^a 和 w^a 分别线性内插到观测点后按下面的公式合成的:

$$V_{r,m}^a = \frac{u_m^a(x_m - x_0) + v_m^a(y_m - y_0) + w_m^a(z_m - z_0)}{\sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_m - z_0)^2}} \quad (1.5)$$

这里 (x_m, y_m, z_m) 和 (x_0, y_0, z_0) 分别是观测点的坐标和雷达的坐标。目标函数的第二部分起平滑作用, ∇^2 表示 Laplace 算子。

W_{su}, W_{sv} 和 W_{sw} 是权重系数,它的大小对插值结果有一定影响,设定 $W_{sw} = 100, W_{su} = 100, W_{sv}$, W_{sw} 的具体取值在后面说明。

2 “真值”和“观测资料”生成方法

Zhang 等^[5]曾经比较过多种雷达资料插值方法的分析结果,其基本的评判手段是对分析场的图像特征进行比较,可以发现一些方法会存在明显的间断现象,不过对插值误差不能进行定量分析。周海光等^[6-7]用中尺度模式的模拟值作为“真值”,这样可以对插值误差进行定量分析,缺点是现有的模式输出值在空间特征上和实际观测会有很大的差异。本文提出一种由高阶正交多项式拟合实际雷达速度观测的方法来构造“真值”的技术,它可以较好的模拟雷达实际观测的情况。具体方法如下:

设定分析空间是以雷达为中心 $150\text{km} \times 150\text{km} \times 10\text{km}$ 的区域,水平格距 $d_h = 1\text{km}$,垂直格距 $d_z = 0.5\text{km}$ 。按照目前 WSR-98D 雷达业务运行的体扫描方式,有 14 个扫描仰角,依次是 $0.5^\circ, 1.5^\circ, 2.4^\circ, 3.4^\circ, 4.3^\circ, 5.3^\circ, 6.2^\circ, 7.5^\circ, 8.7^\circ, 10.0^\circ, 12.0^\circ, 14.0^\circ, 16.7^\circ$ 和 19.5° ,方位角间隔为 1° ,径向库长 250m。实际风场 (u, v, w) 可以按勒让德多项式展开:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= \sum_{nx=0}^N \sum_{ny=0}^N \sum_{nz=0}^N a_{nx, ny, nz} P_{nx}(x) Q_{ny}(y) R_{nz}(z) \\ v(x, y, z) &= \sum_{nx=0}^N \sum_{ny=0}^N \sum_{nz=0}^N b_{nx, ny, nz} P_{nx}(x) Q_{ny}(y) R_{nz}(z) \\ w(x, y, z) &= \sum_{nx=0}^N \sum_{ny=0}^N \sum_{nz=0}^N c_{nx, ny, nz} P_{nx}(x) Q_{ny}(y) R_{nz}(z) \end{aligned} \quad (2.1)$$

其中 $P_{nx}(x), Q_{ny}(y)$ 和 $R_{nz}(z)$ 分别是空间 3 个方向的勒让德多项式, a, b, c 是相应的系数,可以通过拟合实际的雷达径向速度观测 $V_{r,i}^{ob}$ 的方式来确定,即求下面目标函数的最小二乘解:

$$J(a, b, c) = \frac{1}{2} \sum_i (V_{r,i}^a - V_{r,i}^{ob})^2 \quad (2.2)$$

这里 $V_{r,i}^a$ 是通过公式 (2.1) 和 (1.5) 计算得到的观测点(标号 i)的径向速度。极小化 (2.2) 得到系数 a, b, c 后可以按照 (2.1) 式计算网格点和观测点上的 u, v 和 w , 然后分别合成得到网格点上径向速度(作为“真值” $V_{r,k}^t$)和观测点上的径向速度(作为“观测值”)。为了使“观测值”更加接近实际,在原来的资料缺测点仍然设定为缺测。在我们的试验中将勒让德多项式展开的截断阶数 N 设为 6, 实际的观测资料取自 2002 年 6 月 27 日 23:36(北京时),湖南常德雷达的一次径向速度的观测资料,当时常德位于梅雨锋暴雨带上。按照上面方法给出的模拟观测值和实际观测值比较,均方根误差为 3.38ms^{-1} 。

3 插值方法比较

由上节所述方法产生的“观测值”利用 3 种插值方法给出直角坐标网格点(标号 k)上的径向速度 $V_{r,k}^a$, 将它和“真值” $V_{r,k}^t$ 比较。用如下定义的均方根误差(rms)作为评判标准:

$$rms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (V_{r,k}^a - V_{r,k}^t)^2} \quad (3.1)$$

3 种插值方法的结果都与插值公式中的一些参数有关,在 3D-Barnes 中是 2 个尺度因子 R_h 和

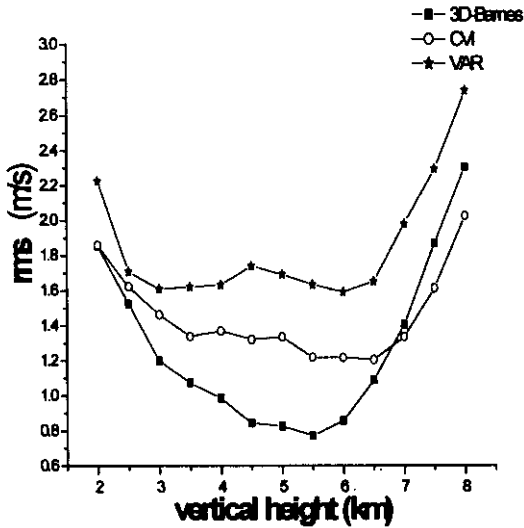
R_v ,CVI 方法中是尺度因子 R_h ,VAR 方法中是权重系数 w_{sv} 。选取不同的参数值计算各种方法的插值误差,所得结果见表 1。3D-Barnes 和 CVI 中, R_h 取值为 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 5.0km(表 1 中依次表示为 1-5 类,下同),对于 3D-Barnes 方法固定 $R_v=500m$,在 VAR 方法中, w_{sv} 的取值依次为 0.005d²、0.05d²、0.2d²、0.35d²、0.5d²(d=1 000m 是水平网格距)。从表中可看出,3D-Barnes 方法和 CVI 方法对尺度因子的变化不敏感,但是权重系数

的改变对 VAR 方法的影响明显。3D-Barnes 方法的误差最小,CVI 方法稍差,而 VAR 方法误差较大。

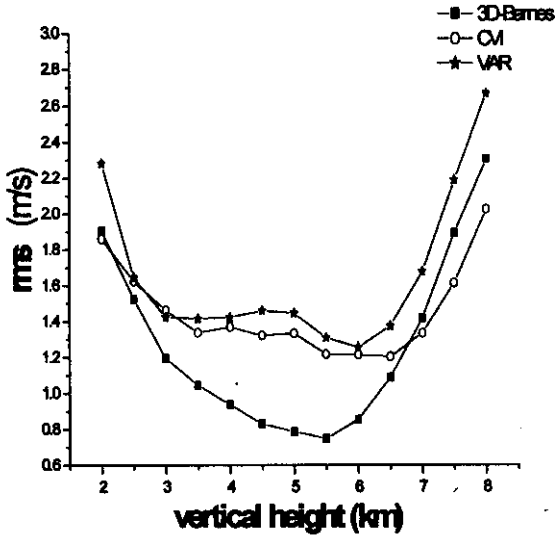
表 1 不同参数下 3 种插值方案的误差统计(单位: $m s^{-1}$)

Tab.1 Rms errors of the three interpolation schemes with different parameters(unit: $m \cdot s^{-1}$)

参数类别	1	2	3	4	5
3D-Barnes	1.36	1.28	1.28	1.28	1.28
CVI	1.46	1.47	1.47	1.47	1.47
VAR	2.50	2.36	1.96	1.97	2.10



(a)对所有分析点的统计



(b)对公共点的统计

图 1 3 种插值方法均方根误差($m s^{-1}$)随高度变化

Fig.1 Rms errors($m s^{-1}$)vertical profiles of the three interpolation schemes (a)for all points (b)for common points

图 1(a)是插值误差随垂直高度的变化。可看出误差在高层和低层比较大,这应该和这些层附近观测资料不够密有关。在中层 3D-Barnes 方案明显优于其它两种方案,在高层(7km 以上)CVI 方案误差较小。

表 2 3 种插值方法有效点数的统计

Tab.2 Numbers of valid grid points at different height

高度(km)	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.5	8.0
3D-Barnes	22301	22398	22398	22206	21945	21567	21330	21166
CVI	19407	20295	20314	19659	19945	19499	17659	17602
VAR	22801	22801	22801	22801	22801	22801	22801	22801

在观测资料有缺测的情况下,不同的方法给出的有效分析点数是不同的。表 2 给出不同高度上 3 种方法得到的有效资料点数。用 VAR 方案得到的有效点数最多,而 CVI 得到的有效点数就明显比另两种方法少,特别是在高层,这是因为 CVI 方案在垂直方向采用内插方式,而 3D-Barnes 和 VAR 方法都有一定的外推能力。如果只在 3 种方法均有值的公共点上来比较误差(见图 1(b)),再将它和图 1

(a)比较可以看出,3D-Barnes 和 CVI 方案的误差大小没有明显变化,但在中层 VAR 方案的均方根误差明显变小了,说明 VAR 方案的外推会造成较大误差。

图 2 是在 5.5km 高度上径向风的“真值”和 3 种插值方案得到的分析场。从图中可以看到,3D-Barnes 除了在上部一些地方不够连续外,其它地方与“真值”相当接近。VAR 方案得到的值偏小,特别是在分析区的边缘处特别偏小,也说明他的外推作用会造成较大误差。虽然 CVI 方案的误差比 VAR 小,但是在一些地方会出现很强的不连续现象。

4 结 论

本文提出的通过高阶正交多项式拟合实际雷达径向风资料来产生格点上的径向风场的方法可以较好地模拟实际雷达观测的环境,利用这种模拟资料可以方便地比较各种插值方案的误差。在我们进行比较的 3 种方法中,3D-Barnes 方案的误差最小,光滑性也较好,CVI 方案误差比 3D-Barnes 方案稍

大 ,但在部分地区会有强的间断 ;VAR 方案误差较大 ,特别是在分析区的边缘附近。

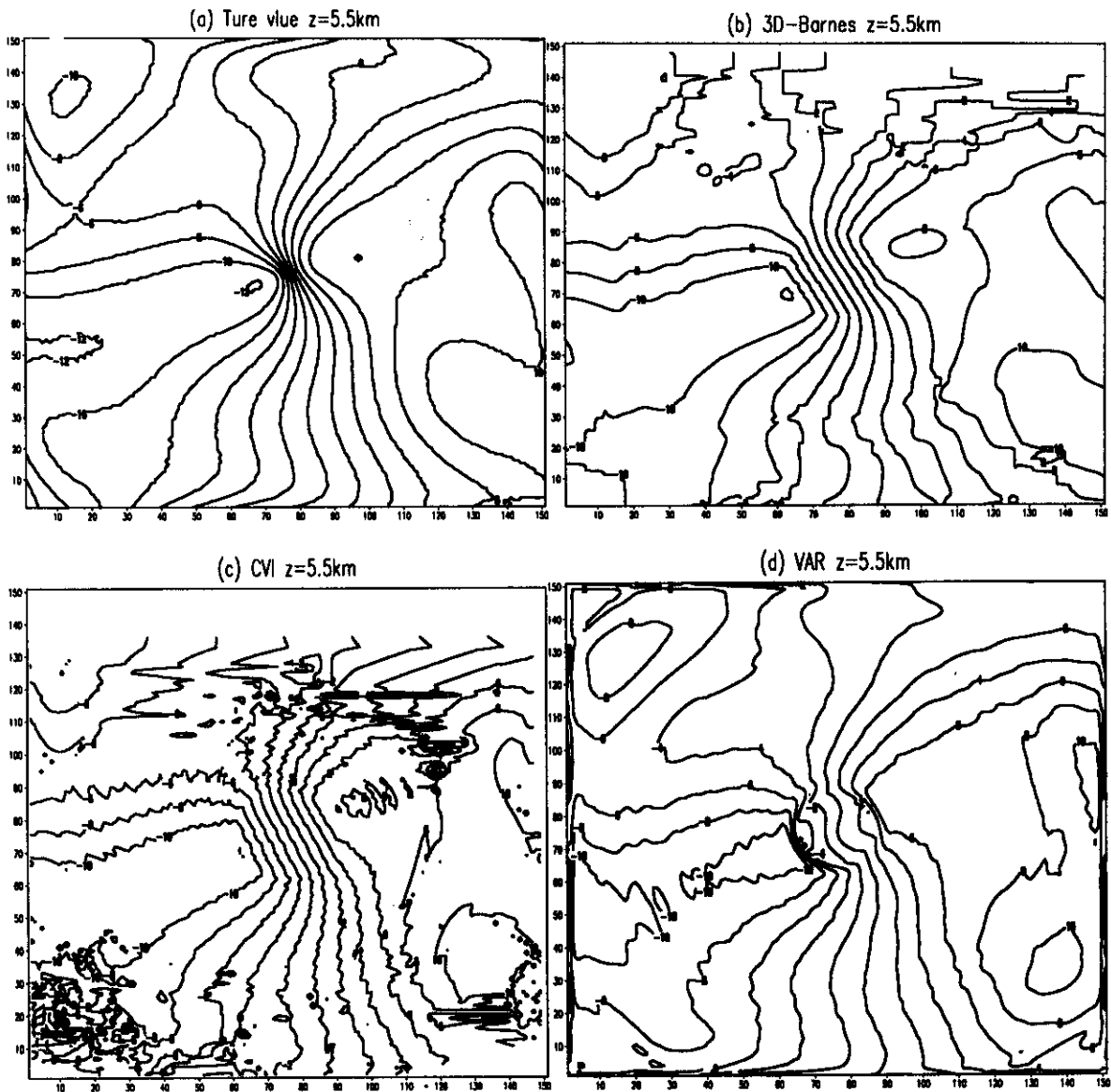


图 2 5.5km 高度上的径向风
(a) 真值 场 (b) 3D - Barnes 分析场 (c) CVI 分析场 (d) VAR 分析场
Fig.2 Radial velocity fields at 5.5km
(a) The “ true ” field (b) Analytic field of the 3D - Barnes scheme
(c) Analytic field of the CVI scheme (d) Analytic field of the VAR scheme

参考文献 :

[1] Miller L J , Strauch R G . A dual - Doppler radar method for the determination of wind velocities within precipitating weather systems[J] . Remote Sens Environ , 1974 , 3 (4) 219 - 235 .
[2] Barnes L . A technique for maximizing details in numerical weather map analysis[J] . J Appl Meteor , 1964 , 3 395 - 409 .
[3] Sun Juanzhen , Andrew Crook N . Real - Time Low - Level Wind and Temperature Analysis Using Single WSR - 88D Data[J] . Weather And Forecasting Volume 2001 , 21 (6) :117 - 132 .
[4] 邱崇践 ,余金香 . 多普勒雷达资料对中尺度系统短期预报的改进[J] . 气象学报 , 2000 , 58 (2) 244 - 248 .
[5] Jian Zhang , Ken Howard , Wenwu , et al . COMPARISON OF OBJECTIVE ANALYSIS SCHEMES FOR THE WSR - 88D RADAR DATA[C] . The 31st International Radar Conference , Seattle , Washington 2003 . 28 .
[6] 周海光 ,张沛源 . 笛卡尔坐标系的双多普勒天气雷达 3 维风场反演技术[J] . 气象学报 , 2002 , 60 (5) 585 - 592 .
[7] 周海光 ,张沛源 . 多种单多普勒雷达风场反演方法对比试验[J] . 气象 , 2000 , 26 (5) :13 - 16 .

Comparison of Gridding Schemes for the Doppler Radar Data

YANG Yi ,QIU Chong - jian

(Department of Atmospheric Science , Lanzhou University ,Lanzhou 730000 ,China)

Abstract :The simulanted radar data are produced by using high - order Lengendre polynomials to fit the real radar observed wind. Three interpolation schemes are tested with the simulated data. In first schem(CVI) ,the radar data are first interpolated to horizontal Cartesian grids but left on their original constant elevation surfaces in the vertical ,then the data are further interpolated to the Carte- sian grids with a linear interpolation in the vertical. The second scheme is the three - dimension Barnes interpolation techniqu(3D - Barnes). The third scheme is three - dimension variational analysis(VAR). The results show that the 3D - Barnes scheme obviously excels the others , especially at middle level ,the error of the CVI scheme is slightly larger than the former and its smoothness is poor , and it has biggish missing region at lower and upper level. The VAR scheme is not perfect.

Key words :Doppler radar ;gridding ;interpolation.