

基于 Matlab 平台的多普勒雷达 强度资料三维可视化

管 理, 魏 鸣, 韦凯华, 王金虎

(南京信息工程大学 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

摘 要:多普勒天气雷达是天气预报与科研应用中监测小尺度天气重要的观测手段. 本文以 CINRAD-SA 型多普勒天气雷达为例, 简要介绍了雷达的工作原理及其基数据结构. 通过 Matlab 平台实现天气雷达资料数据的读取, 并选用 8 点插值法(EPI 插值)和 Cressman 插值, 实现了将雷达极坐标数据内插到笛卡尔坐标系的三维可视化显示, 并且可获取空间内任一切面或剖面的雷达回波强度. 对比显示结果发现: Cressman 插值后的结果对三维整体呈现的更好, 8 点插值(EPI)对于平面细节的显示更突出.

关键词:多普勒雷达; 三维可视化; 8 点插值; Cressman 插值

中图分类号:P415.2; O45

文献标志码:A

自然界中所发生的气象灾害大部分是由中尺度过程引起, 监测、预报和研究中尺度天气系统一直是气象工作者的重要任务. 天气雷达以其在时空分辨率和主动遥感探测能力方面的优势, 成为监测、预警中小尺度灾害性天气极为有效的工具^[1-4]. 我国自 1998 年开始布设新一代天气雷达网, 现已建成 160 余部新一代天气雷达, 强对流天气短时预报的时效性和准确性大为提升. 天气雷达可以用于探测大气环境场的三维结构, 但目前我国大部分雷达气象产品仍集中于二维信息的平面显示, 观测和分析雷暴云三维结构的产品较少, 因而对天气雷达探测的回波数据进行三维可视化实现, 是业务应用与科研分析中迫切需要实现的.

科学计算三维可视化是发达国家 20 世纪 80 年代后期提出并发展起来的一个新研究领域, 主要是指运用计算机图形学和图像处理技术, 将科学计算过程及计算结果的数据转换为三维图形及图像在屏幕上显示出来并进行交互处理的理论、方法和技术. 随着科学技术的发展, 科学计算三维可视化已被应用于几乎所有的自然科学及工程技术领域^[5-6]. 在气象领域, 美国威斯康星-麦迪逊大学空间科学工程中(SSEC)率先研发了 McIDAS 人机交互气象可视化系统, 之后又发展了基于 Unix 平台的 Vis5D 和 VisAD 可视化系统^[7]. 国内学者也对该领域作了进一步探究, 北京大学建立了 Windows 平台下的气象可视化环境 PC-Vis5D^[8]. 以上的气象科学可视化环境都因功能和操作的复杂性, 不便于业务中的快速推广和应用.

本文以 Matlab 平台为开发环境, 采用 8 点插值(EPI)和 Cressman 逐步订正插值两种方法进行极坐标系雷达资料到笛卡尔坐标系的数据转化, 并借助 Matlab 集成的 OpenGL 模块实现雷达数据三维可视化显示. 同时将 EPI 和 Cressman 插值的可视化结果进行对照, 比较两种插值算法在雷达数据三维整体显示和平面细节处理方面的优劣.

收稿日期:2014-09-03; **修回日期:**2014-10-21.

基金项目:国家重点基础研究发展计划 973 项目(2013CB430102); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(10KJA170030); 国家高技术研究发展计划 863 项目(2007AA061901, 2012AA091801); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206038, GYHY201306040); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2013LASW-B16); 北极阁基金(BJG201208); 航空科学基金项目(201320R2001); 中国气象局 2014 年关键技术项目(CMAGJ2014M21); 水利部公益性行业科研专项(201201063).

作者简介:魏 鸣(1957-), 女, 天津人, 南京信息工程大学教授, 博士生导师, 研究方向为大气探测和灾害性天气分析.

通信作者:管 理(1989-), 男, 江苏扬州人, 研究方向为大气遥感与气象信息计算机处理, E-mail: glion2005@163.com.

1 新一代多普勒天气雷达技术特点

我国新一代天气雷达(CINRAD)是基于美国 WSR-88D 多普勒天气雷达的改进型,目前布点的雷达主要是 S 波段和 C 波段雷达.在东部沿海地区和强降水多发地区布置波长较长的 S 波段雷达,其余地区考虑到实际情况暂布置 C 波段雷达,各种天气雷达的波段和主要探测目的如表 1 所示. S 波段多普勒天气雷达根据国内生产厂商的不同,又分为 CINRAD SA/SB/SC 三种型号.现以 CINRAD-SA 型雷达为例说明其探测方式和数据结构.

表 1 天气雷达的波段和主要探测目的

f/MHz	λ/cm	波段	探测对象
30 000	1	K	非降水的云
10 000	3	X	小雨和雪
6 000	5	C	中雨和雪
3 000	10	S	大雨、强风暴、天气预警
1 500	20	L	探空

1.1 CINRAD-SA 型多普勒天气雷达探测方式

CINRAD-SA 雷达发射电磁波探测气象目标物是以体积扫描(Volume Coverage Pattern,简称体扫,下同)的方式进行的,即雷达预先定义一系列固定仰角,在一定时间内完成各个仰角的扫描.扫描时最先从最低仰角开始,在这个仰角上做一次 PPI 扫描(Plane Position Indicator,平面位置显示),接着抬高到下一个仰角做一次 PPI 扫描,以此类推直到扫描至最高仰角,这样一个完整过程即称为一个体积扫描.除了特别的业务要求,设定的体扫模式一般不能中断或改变.

CINRAD-SA 雷达定义了四种体积扫描模式,分别为 VCP11, VCP21, VCP31, VCP32,其中前两种属于降水模式,后两种属于晴空模式.降水模式采用短脉冲,仰角范围为 $0.5^\circ \sim 19.5^\circ$,晴空模式采用长脉冲,仰角范围为 $0.5^\circ \sim 4.5^\circ$,实际业务中多采用 VCP21 模式^[10].

以 VCP21 工作模式为例(图 1),该模式下雷达在 6 分钟内扫描如下 9 个仰角: $0.5^\circ, 1.45^\circ, 2.4^\circ, 3.35^\circ, 4.3^\circ, 6.0^\circ, 9.9^\circ, 14.6^\circ, 19.5^\circ$.其中雷达在 0.5° 和 1.45° 这 2 个仰角上分别做两次扫描,在其他仰角上只做一次扫描,在同一仰角扫描 2 次是为了消除距离模糊和速度模糊.雷达首先发射脉冲重复频率(Pulse Repetition Frequency, PRF)较低的脉冲,在此半径范围内雷达可正确测定回波位置.此后再发射 PRF 较高的脉冲,以提高最大不模糊速度,此时可参考低 PRF 脉冲确定的位置,确定多普勒速度资料的真实位置.

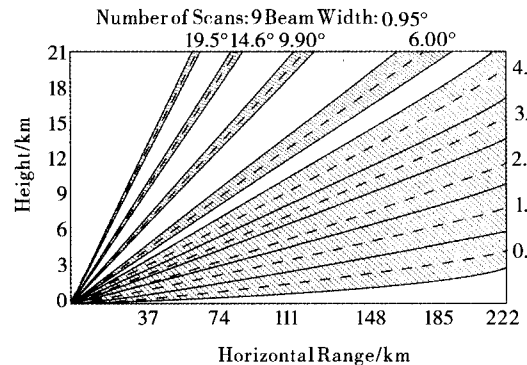


图 1 VCP21 体扫模式示意图^[11]

1.2 CINRAD-SA 型多普勒天气雷达的基数据结构和读取

由 1.1 节可知,雷达波束在各个仰角层上做锥面扫描,因此采用球面坐标系(仰角、方位和斜距)来存储雷达观测数据. CINRAD-SA 型多普勒天气雷达将每个体扫数据存储为一个单独的文件,体扫数据的排列自低仰角开始,至高仰角结束,每个仰角层上的数据按径向数据的方式顺序排列.每个体扫文件一般包含 9 层仰角的回波数据,每层仰角下包括 361~380 个径向数据单元.每一条径向上的数据以“库”的方式存储,即类似一个个从雷达天线处由近到远依次排列的、具有一定长度的数据单元.其中,反射率距离库长为 1 km,速度和谱宽距离库长为 0.25 km.径向数据的长度固定为 2 432 B,主要由 3 部分构成:径向文件标识(34 B)、径向头文件信息(98 B)和径向距离库数据记录(2 300 B)^[12].径向头文件包括体扫模式、天线仰角、径向数据状态等一系列雷达工作机的运行状态信息.径向距离库信息以单字节的方式存储,一个距离库的反射率、速度和谱宽信息存储为一个单元字节.通过头文件的读取获取雷达实时运行的状态信息,进而结合径向距离库数据记录对雷达信息进行提取.本文在数据读取过程中,首先使用 Matlab 指针运算提取径向头文件信息,获

取体扫模式、天线仰角、径向数据状态等必要信息,然后单字节读取雷达数据记录信息,将雷达反射率、速度和谱宽信息以三维数组(径向方位角数×距离库数×仰角层数)的形式单独存放。

1.3 反射率资料空间分辨率

雷达探测的回波信息是一个有效照射体积(抽样体积)内所有散射粒子返回的后向散射能量之和,由于雷达抽样体积为一个锥状体,抽样体积的大小随着距离的增加而增大,造成雷达资料空间分辨率的不均匀性.通过对雷达资料空间分辨率进行总结和归纳^[13],即用相邻2个资料库的中心距离来定义雷达空间分辨率,主要涉及雷达径向分辨率、方位分辨率和仰角分辨率3个方面.径向分辨率,CINRAD-SA型雷达在径向方向上相邻反射率资料库的中心距离总是1 km.方位分辨率,CINRAD-SA型雷达的方位相邻资料库的方位间距均匀分布,两个方位相邻资料库的中心距离 Δd 是天气雷达探测斜距的函数,表示为: $\Delta d = r \sqrt{2(1 - \cos(\Delta\theta))}$, $\Delta\theta$ 为相邻径向的方位角之差,为 $\Delta\theta = 2\pi/N$, N 为一个体扫内的径向数据单元个数. r 为雷达探测目标物的斜距.仰角分辨率,在前文已知相邻仰角间隔不均匀,所以资料的仰角分辨率不仅随距离变化而且随仰角变化,表示为: $\Delta d = r \sqrt{2(1 - \cos(\Delta\varphi))}$, $\Delta\varphi$ 是相邻仰角差, r 为天气雷达至探测目标物的斜距。

2 极坐标雷达资料三维格点化

为了能够显示雷达回波在三维空间上的具体结构,需要把极坐标系下的空间分辨率不均匀的雷达资料插值到统一的笛卡尔坐标系下,形成空间分辨率均匀的网格点资料.设定一个 $250 \text{ km} \times 250 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 的三维立方体显示区域, X 轴和 Y 轴方向的分辨率选取为1 km, Z 轴方向的分辨率选取为0.1 km.本文采用了8点插值法(EPI)和逐步订正 Cressman 插值2种方法将极坐标下的雷达反射率数据内插到笛卡尔坐标系的规则网格点上。

2.1 8点插值法(EPI)

肖艳娇在前人工作的基础上发展了^[12]8点插值算法(EPI, dual linear interpolation using data from eight points around grid cell). EPI的原理如图2所示,笛卡尔坐标系下的规则格点 $x(r_x, \theta_x, \phi_x)$ 落在由 a, b, c, d, e, f, g, h 8点围成的锥状体内,8个格点的具体数值分别为: $f^a(r-r_0, \theta-\theta_0, \phi_2)$, $f^b(r-r_0, \theta-\theta_0, \phi_1)$, $f^c(r+r_0, \theta+\theta_0, \phi_2)$, $f^d(r+r_0, \theta-\theta_0, \phi_2)$, $f^e(r-r_0, \theta-\theta_0, \phi_1)$, $f^f(r-r_0, \theta+\theta_0, \phi_1)$, $f^g(r+r_0, \theta+\theta_0, \phi_1)$, $f^h(r+r_0, \theta-\theta_0, \phi_1)$.其中 r_0 为径向单位距离库长, θ_0 为单位方位角弧度数, ϕ_1 和 ϕ_2 为实际仰角, ϕ_0 介于 ϕ_1, ϕ_2 之间.则该规则网络格点的分析值可由其周围8个点的观测值进行双线性内插得到,其基本思路为:

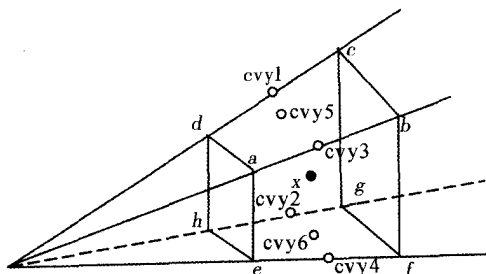


图2 8点插值法(EPI)原理示意图

$$\begin{cases} f^{cxy1} = f^c \times (\theta_x - \theta) + f^d \times (\theta + \theta_0 - \theta_x), \\ f^{cxy2} = f^g \times (\theta_x - \theta) + f^h \times (\theta + \theta_0 - \theta_x), \\ f^{cxy3} = f^b \times (\theta_x - \theta) + f^a \times (\theta + \theta_0 - \theta_x), \\ f^{cxy4} = f^f \times (\theta_x - \theta) + f^e \times (\theta + \theta_0 - \theta_x), \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} f^{cxy5} = [f^{cxy1} \times (r_x - r) + f^{cxy3} \times (r + r_0 - r_x)] / r_0, \\ f^{cxy6} = [f^{cxy2} \times (r_x - r) + f^{cxy4} \times (r + r_0 - r_x)] / r_0, \end{cases} \quad (2)$$

$$f^x = f^{cxy5} \times (\phi_0 - \phi_1) / (\phi_2 - \phi_1) + f^{cxy6} \times (\phi_1 - \phi_0) / (\phi_2 - \phi_1). \quad (3)$$

2.2 Cressman 逐步订正法插值

Bergthorsson 和 Doo 在 1955 年提出了逐步订正法^[14],该方法的基本思想是:首先根据实际分析尺度确定一个影响半径,某一格点的订正值是以格点为中心,影响半径为半径的圆域内观测值与预备值之差的加权平均值. Cressman(1959)在对预备场进行订正的基础上增加了迭代订正步骤^[15],即事先给定一个允许误差值进行迭代运算,当观测值与预备场的差值超过允许误差值时结束迭代. Cressman 逐步订正插值算法相比

其他算法,极大地保证了内插结果在空间上的连续性,现已被广泛应用于各种气候诊断分析和数值模拟研究中^[16].陈飞^[17]等将 Cressman 插值算法推广至三维,用实际观测场修正三维初始场,使订正后的场逼近观测记录.本文应用三维 Cressman 插值算法将雷达极坐标数据内插到笛卡尔坐标系,其基本思路为:

$$\alpha' = \alpha_0 + \alpha_{ijk}, \quad (4)$$

$$\alpha_{ijkl} = \frac{\sum_{l=1}^L (W_{ijk}^2 \alpha_l)}{\sum_{l=1}^L W_{ijkl}}. \quad (5)$$

α 为雷达反射率因子, α_0 为雷达反射率因子背景场初值, α' 为 Cressman 插值之后雷达反射率因子在格点 (i, j, k) 上的值; α_l 为观测点 l 上的观测值与背景场初值 α_0 之差; L 为以 R 为半径的球面内的所有观测点总数;影响半径 R 需要根据分析场的尺度进行选取. W_{ijkl} 为权重函数,在 $0 \sim 1$ 之间变化;其一般形式

$$W_{ijkl} = \begin{cases} \frac{R^2 - d_{ijkl}^2}{R^2} & (d_{ijkl} < R), \\ 0 & (d_{ijkl} \geq R), \end{cases} \quad (6)$$

其中 d_{ijkl} 是网格点 (i, j, k) 到观测点 l 的距离.在综合考虑样本数量对原始数据的修正效果、计算误差的基础上,结合天气雷达实际探测距离和中小尺度天气现象尺度半径,本文取 R 为 6 km 进行逐步订正.

2.3 EPI 插值和 Cressman 插值效果对比

极坐标形式的雷达资料进行插值处理是为了获取细网格的三维反射率格点数据.鉴于雷暴云在空间上的连续性和细尺度结构,本研究将插值后的反射率场在空间上的连续性和能否最大限度保留雷达资料中的原始回波特征,作为插值效果检验的评判依据.

在程序运行耗时方面, Cressman 插值算法由于要搜寻规则格点半径阈值内的最邻近点进行插值需要耗费比 EPI 算法更多的时间.若不考虑插值耗时因素,结果表明两种插值算法分别在雷暴云三维整体显示和平面细节展示方面具有各自优势.

选取南京 2009 年 7 月 7 日一次强雷暴天气过程的雷达回波个例数据,利用 EPI 插值和 Cressman 插值对该个例雷达资料的反射率场进行三维可视化显示.

极坐标形式的雷达资料进行插值处理是为了获取细网格的三维反射率格点数据.鉴于雷暴云在空间上的连续性和细尺度结构,本研究将插值后的反射率场在空间上的连续性和能否最大限度保留雷达资料中的原始回波特征,作为插值效果检验的评判依据.

在程序运行耗时方面, Cressman 插值算法由于要搜寻规则格点半径阈值内的最邻近点进行插值需要耗费比 EPI 算法更多的时间.若不考虑插值耗时因素,结果表明两种插值算法分别在雷暴云三维整体显示和平面细节展示方面具有各自优势.

对比天气雷达三维显示结果(图 4(a)和图 4(b))可知, Cressman 插值算法能够保留更多雷达数据的信息,分析其原因是: EPI 插值算法选取位于 2 层仰角间的规则格点通过反距离权重进行插值,对最低层仰角以下的格点未进行插值运算;而 Cressman 插值算法是从规则网格的角度出发,选取距离规则格点一定距离阈值内的点求取权重并作多次迭代操作,使得规则网格点上的数据保留更多的雷达极坐标实测信息,因而得到的雷达三维显示结果能够更接近真实雷暴云主体的三维结构.同时 Cressman 插值算法对于距离阈值内的格点进行了多次取样迭代,使得雷达三维显示结果在空间上更加连贯.在天气雷达实际业务应用中,雷暴云主体三维结构的获取是提高业务预报时效性和准确性的一个重要方面,在此方面 Cressman 插值算法相较于 EPI 点插值算法具有更强的实用性.

现阶段业务应用中的等高度平面位置显示 CAPPI(Constant Altitude Plan Position Indicator),主要集中在单一固定高度上的平面显示,不利于多个高度上平面位置信息的综合分析.本文中的可视化软件可以叠加任意高度的平面位置显示信息,图 4(c)和图 4(d)分别选取自地面到 12 km 高度处间隔 3 km 的 4 层切面

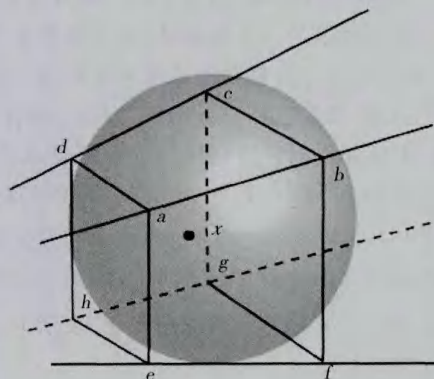


图3 三维 Cressman 插值原理示意图

来显示平面位置的信息.前文已经指出 EPI 插值会损失雷达最低层仰角以下的数据,因此较之图 4(d),图 4(c)缺少了地面层的回波信息,考虑到天气现象通常发生在近地面层以上,地面层回波信息的缺失对业务应用的影响不大.通过上下几层的平面位置显示对照,在获取各个高度上雷达回波信息的同时,更能直观的显示上下高度的回波强度变化.在插值方法选取方面,Cressman 插值由于采用了逐步订正的过程,对于整个切面的强中心有一个突出显示的作用,但同时也会面临丢失强中心边缘以及一些中小尺度天气现象的问题,而利用 EPI 插值法则能够突出显示小尺度天气现象的细节变化,对于细节的把握更有优势.图 4(c)和图 4(d)圈注部分处,EPI 插值结果显示 40 dBZ 左右的黄色团块夹在 30 dBZ 左右的红色团块之中,而在 Cressman 插值结果中由于迭代平滑的原因形成了值为 40 dBZ 和 30 dBZ 左右的中心团块,在实际业务应用中,一些中小尺度天气现象可能会因此而被忽视,导致预报准确率的下降,因此在等高面位置显示的细节把握上,EPI 插值算法显示结果更具备优势.

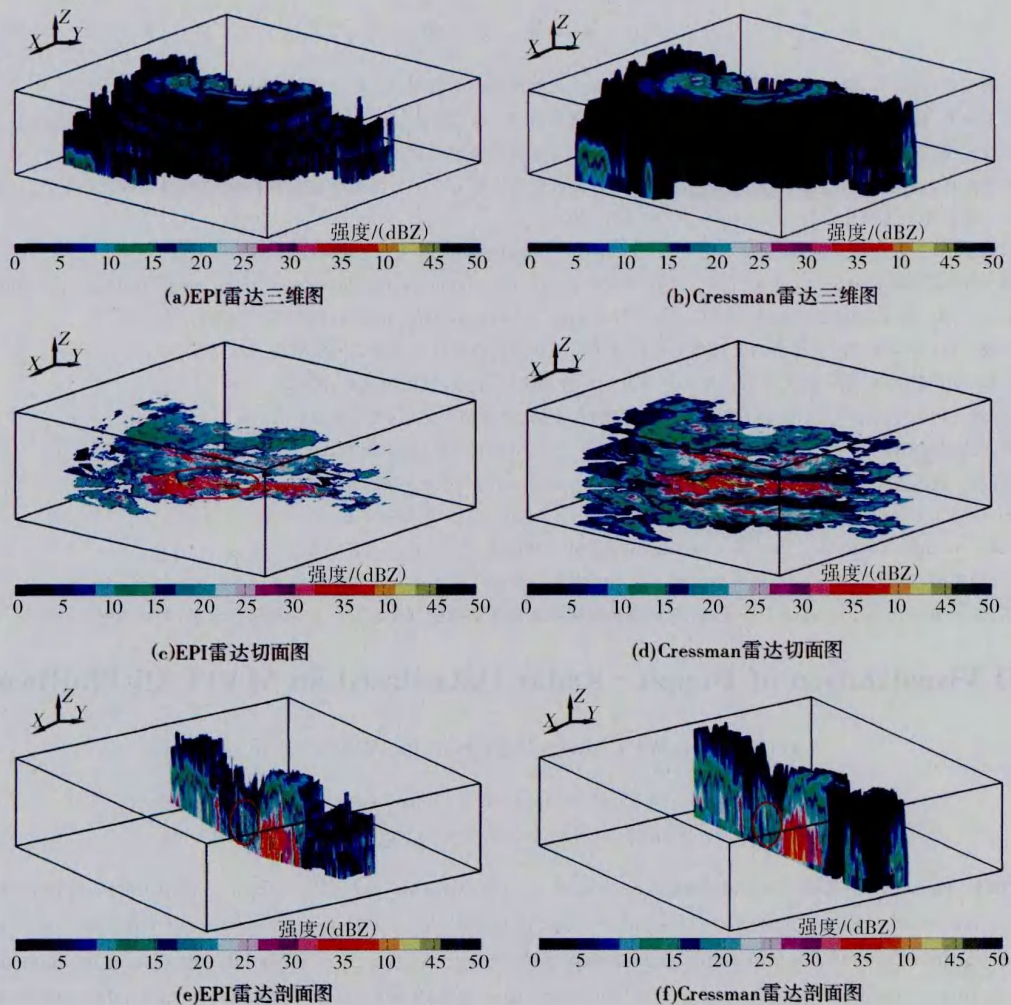


图4 2种插值方式下的可视化结果对比

天气雷达垂直剖面图可以反映固定位置处天气状况的垂直结构(图 4(e)和图 4(f)),本研究可以对任一固定 X, Y 数值的雷达数据进行一次或多个剖面显示.与雷达等高面位置显示存在的问题类似,Cressman 插值得到的剖面图对于剖面的整体有一个更好的呈现,而 EPI 插值方法更能突出天气现象的细节结构.对比图 4(e)和图 4(f)红色圈注部分可以发现:图 4(e)上有几个 30 dBZ 左右的红色团块夹在 15 dBZ 左右的绿色团块中,但在图 4(f)上,红色团块被平滑为一个 25 dBZ 左右的窄带状团块,损失了雷达原始数据的真实信息,因此在剖面显示方面,EPI 插值算法的插值效果优于 Cressman 插值算法.

4 结 论

1) Matlab 平台能够很好的应用于天气雷达三维可视化的显示工作,从而在最大限度上挖掘雷达数据的潜力,为气象科研和业务应用提供直观的显示. 2) EPI 和 Cressman 逐步订正插值法作为 2 种不同的三维内插方法,均可用于多普勒雷达三维可视化研究中,从而实现将多普勒天气雷达(CINRAD)极坐标下的雷达反射率数据内插转换成笛卡尔坐标系下规则网格数据的功能. 3)通过比对 EPI 和 Cressman 逐步订正插值法在雷达三维数据插值中的效果可以得知:Cressman 插值算法得到的雷达三维数据较之 EPI 插值算法的运算结果,插值数据更为连贯,更能反映雷达探测到的雷暴云主体的三维结构,但是在天气雷达反射率数据的切面和剖面二维显示方面,EPI 插值算法能够更好地保留中小尺度系统的细微特征,对于天气现象的细节监测更有优势.

参 考 文 献

- [1] 刘黎平,曹俊武,莫月琴,等. 雷达遥感新技术及其在灾害性天气探测中的应用[J]. 热带气象学报,2006,22(1):1-10.
- [2] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象,2005,24(3):456-464
- [3] 韩 丰,魏 鸣,李 南,等. 反射率因子和径向速度共同约束反演多普勒雷达风场[J]. 遥感学报,2013,17(3):578-590.
- [4] 王金虎,葛俊祥,魏鸣,等. 等效球理论计算冰晶粒子毫米波散射的误差分析[J]. 河南师范大学学报:自然科学版,2014,42(5):40-44.
- [5] 唐泽圣. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [6] 张志强,刘黎平,王红艳. 三维可视化技术在雷达三维组网产品显示中的运用[J]. 气象科技,2010,10(5):605-610.
- [7] Wang Hongqing, Lau Kaihon, Chan Waiman, et al. A PC-based visualization system for coastal ocean and atmospheric modeling[C]. Proceeding of 6th International Estuarine and Coastal Modeling Conference, New Orleans, 1999.
- [8] 王洪庆,张 焱,陶祖钰,等. 五维大型复杂数据集计算机可视化[J]. 自然科学进展,1998,8(6):724-747.
- [9] 刘志澄,李 柏,翟武全. 新一代天气雷达系统环境及运行管理[M]. 北京:气象出版社,2002.
- [10] 潘新民. 新一代天气雷达(CINRAD/SB)技术特点和维修、维修方法[M]. 北京:气象出版社,2009.
- [11] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [12] 肖艳娇. 新一代天气雷达三维组网技术及其应用研究[D]. 北京:中国气象科学研究院,2007.
- [13] Bergthorsson P Doos. Numerical weather map analysis[J]. Tellus,1955,7:329-340.
- [14] Cressman. An operational objective analysis system[J]. Mon Wea Rev,1959,87:367-374.
- [15] 冯锦明,赵天保,张英娟. 基于台站降水资料对不同空间内插方法的比较[J]. 气候与环境研究,2004,9(2):261-276.
- [16] 陈 飞,施 平,杜 岩,等. 基于 Cressman 客观分析的南海北部海区数据同化实验[J]. 热带海洋学报,2010,29(4):1-7.

3D Visualization of Doppler Radar Data Based on MATLAB Platform

GUAN Li, WEI Ming, WEI Kaihua, WANG Jinhu

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,
Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: On weather forecast and science research, Doppler weather radar has become one of the most important means on monitoring mesoscale weather systems. This paper takes the CINRAD-SA Doppler weather radar for example, which first briefly describes the radar's working principle and its base data structure, then utilize Matlab software programming to realize the reading and displaying function. Choose interpolation algorithm of EPI and Cressman to interpolate polar coordinates data to cartesian coordinate thus realizing the 3D Visualization of Doppler weather radar reflection data. The 3D Visualization has greater advantages in analyzing the space structure of radar echo and the 3D slice provides a more comprehensive way for radar echo analysis. The combination of EPI and Cressman interpolation concludes: the Cressman interpolation has advantages in 3D structure of radar echo, while the EPI shows better in detail section.

Keywords: Doppler radar; 3D visualization; EPI; Cressman interpolation