

基于改进 Marching Cubes 算法的雷达气象数据三维重建

魏敏¹, 李足镇¹, 李旭²

(1. 成都信息工程大学 计算机学院; 2. 成都信息工程大学 光电工程学院, 四川 成都 610225)

摘要: 在气象领域中, 多普勒天气雷达探测到的气象数据采用以雷达站点为原点的三维极坐标系进行存储, 具有形状不规则、数据量大等特征。Marching Cubes (MC) 算法是三维重建中的经典算法, 但应用于气象领域时存在重建效率低下和不能直接处理气象数据的缺点。为了实现气象数据的三维重建, 基于 MC 算法提出雷达数据归一化处理与状态标记判别算法 NBV-MC。该算法根据雷达基数据文件的特点对其进行归一化预处理, 使用雷达基数据构建拟梯形六面体体素, 对每一个六面体体素进行状态标记, 在遍历六面体体素时动态判别其是否需要处理。实验结果表明, NBV-MC 算法不仅解决了由于气象数据具有不规则性而不能直接用于 MC 算法的问题, 而且可以在保证数据真实性和重建效果的情况下有效减少绘制等值面所需要的三角面片数量, 提高重建速度。与 MC 算法相比, NBV-MC 算法的重建效率提升了 77.70% 以上, 有利于实时场景交互, 便于气象研究人员直接分析雷达数据。

关键词: 多普勒天气雷达数据; 三维重建; Marching Cubes 算法

DOI: 10.11907/rjtk.231834

中图分类号: TP391

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1672-7800(2024)009-0181-06



Three-Dimensional Reconstruction of Radar Weather Data Based on Improved Marching Cubes Algorithm

WEI Min¹, LI Zuzhen¹, LI Xu²

(1. School of Computer Science, Chengdu University of Information Technology;

2. College of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In the field of meteorology, the meteorological data detected by Doppler weather radar is stored in a three-dimensional polar coordinate system with the radar station as the origin, which has characteristics such as irregular shape and large data volume. The Marching Cubes (MC) algorithm is a classic algorithm in 3D reconstruction, but it has the disadvantages of low reconstruction efficiency and inability to directly process meteorological data when applied in the meteorological field. In order to achieve three-dimensional reconstruction of meteorological data, a radar data normalization and state labeling discrimination algorithm NBV-MC is proposed based on the MC algorithm. This algorithm normalizes and preprocesses radar based data files based on their characteristics, constructs trapezoidal hexahedral voxels using radar based data, marks the state of each hexahedral voxel, and dynamically determines whether it needs to be processed when traversing hexahedral voxels. The experimental results show that the NBV-MC algorithm not only solves the problem of being unable to be directly used in the MC algorithm due to the irregularity of meteorological data, but also effectively reduces the number of triangles required to draw contour surfaces while ensuring data authenticity and reconstruction efficiency, and improves reconstruction speed. Compared with the MC algorithm, the reconstruction efficiency of NBV-MC algorithm has increased by more than 77.70%, which is conducive to real-time scene interaction and facilitates meteorological researchers to directly analyze radar data.

Key Words: Doppler weather radar data; three-dimensional reconstruction; Marching Cubes algorithm

收稿日期: 2023-07-28

扫描二维码阅读全文:



基金项目: 四川省科技厅项目(2022YFS0568); 四川省科技计划项目(2023YFQ0072)

作者简介: 魏敏(1978-), 男, 博士, 成都信息工程大学计算机学院教授, 研究方向为图像处理与目标检测技术、3D仿真技术和虚拟现实应用技术; 李足镇(1999-), 男, CCF会员, 成都信息工程大学计算机学院硕士研究生, 研究方向为天气雷达数据的三维可视化; 李旭(1979-), 女, 成都信息工程大学光电工程学院讲师, 研究方向为发光材料。本文通讯作者: 魏敏。

0 引言

多普勒天气雷达是一种非常有效的探测中小尺度对流天气系统的手段,其探测到的雷达回波数据具有很高的应用价值和实用性^[1-3]。目前大部分天气雷达数据的显示还停留在二维平面上^[4-6]。然而,二维显示方式仅能单一地反映特定层的回波分布情况,难以真实反映出云体的空间结构。相比之下,三维可视化可以全方位展示雷达数据所有仰角回波的分布情况,直观地呈现出雷达回波轮廓和云体内部特征,为气象研究人员进行数据分析提供了更加方便的手段。

1 相关研究

近年来,天气雷达数据的三维可视化受到了广泛研究^[7-12]。三维可视化中最常使用的是面绘制技术。Marching Cubes(MC)算法是由 Lorensen 等^[13]于 1987 年提出的一种基于面绘制的三维重建算法,其核心是找出体素与等值面相交的交点,并将所有交点连接成等值面。国内外学者对 MC 算法进行了相关研究。在国外,Custodio 等^[14]扩展了顶点与边的查找表,提高了网格中三角形的质量,同时也尽可能地保持了网格的拓扑结构;Cirne 等^[15]使用 CUDA(Compute Unified Device Architecture)加速查找三角面片。在国内,毕硕本等^[16]采用三等分体元边界的方法代替 MC 算法的线性插值来获得与体元的交点,解决了线性插值不适用于气象数据的问题;周筠等^[17]采用 CUDA 加速等值面的提取,同时加入中点法,改善了三角网格的质量。以上研究均采用规则的三维网格对雷达数据进行三维重建,这不可避免地要进行大量插值运算,需占用大量内存,插值还可能会降低数据的真实性,虽然可以使用硬件设备进行加速,但当面对硬件设备较差、数据真实性和实时性要求高的场景时难以实现实时交互,不能真实地重建气象数据。

此外,MC 算法还存在重建效率低下、易产生回波盲区和无回波区、不能直接处理气象数据等问题。有学者对天气雷达数据的三维建模进行了研究,Lu 等^[18]根据雷达数据的获取模式提出一种建模方法,即以雷达数据点为最小单位依次组合成雷达数据线、雷达扇区、雷达簇。在构建雷达数据体时在雷达基数据中首先选取相邻两扇区,分别在扇区上选取相邻的两数据线,然后分别在数据线上选取两点共 8 个数据点构建连续的六面体单元,在相邻上下扇区数据点个数不相等时构建三棱柱。使用该建模方法虽然能避免大量插值,但是也不能直接应用于 MC 算法。

本文提出的雷达数据归一化处理与状态标记判别算法(Normalization Processing and Radar Base Data Value State Discrimination Algorithm,简称 NBV-MC 算法)对文献

[18]提出的算法进行了改进:①当相邻上下扇区数据点个数不相等时,将扇区数据归一化处理为规则数据;②在处理体素时加入状态标记—动态判别;③拟合雷达探测数据路径。NBV-MC 算法将气象数据处理为规则数据,使用雷达基数据构建拟梯形六面体体素,在处理构建好的体素时加入状态标记—动态判别,找出三角面片进行重建。实验结果表明,该算法能够直接利用气象数据构建雷达数据体,真实直观地展示云层轮廓,避免了回波盲区和无回波区的重建,规避了插值可能会降低数据真实性的情况,提高了重建速度,适用于实时交互场景;同时对雷达探测路径进行了拟合,减小了大气折射给探测路径结果带来的影响,使得重建效果更加真实可信。

2 雷达数据特征

多普勒天气雷达预先定义一系列固定的仰角,从低仰角开始,雷达的天线绕垂直轴进行一周(360°)的扫描,得到扫描锥面上的回波数据,然后抬高仰角再一次旋转扫描,依次类推直至扫描到最高仰角,这个过程为体积扫描(简称体扫)。图 1 为一次完整的体扫。多普勒天气雷达在完成一次体扫后存储了设定仰角上的数据,存储方式为以仰角、方位角、径向距离为空间坐标参数,雷达站点为原点的极坐标系存储。每个仰角包含多个方位角的数据,一个方位角的数据称为一个径向数据,一个径向数据包含从雷达站点开始由近到远不同径向距离的多个回波数据^[19]。

3 坐标转换

本文的可视化操作基于 VTK(Visualization Toolkit)图形库实现,不能直接读取和使用极坐标系下的坐标,需要将以雷达站点为原点的极坐标系转化为右手坐标系。由于受地球曲率的影响,电磁波会在大气中出现曲线传播的现象,这种现象称为大气折射,需要对其进行修正,以拟合电磁波沿直线传播的路径^[20]。

坐标转换分为以下 3 个步骤:

(1)将雷达极坐标系转换为以雷达站点为原点的笛卡尔坐标系。首先对传播路径进行拟合,然后转换为以雷达站点为原点的笛卡尔坐标系。转换公式如下:

$$gx = 2 \times R_n \times \sin(r \times 0.5 \div R_n) \times \cos(el - r \times 0.5 \div R_n) \times \sin(az) \quad (1)$$

$$gy = 2 \times R_n \times \sin(r \times 0.5 \div R_n) \times \cos(el - r \times 0.5 \div R_n) \times \cos(az) \quad (2)$$

$$gz = 2 \times R_n \times \sin(r \times 0.5 \div R_n) \times \sin(el - r \times 0.5 \div R_n) \quad (3)$$

式中:gx、gy、gz 为相对于雷达站点的坐标;R_n 为被拟合的雷达探测路径对应的圆半径,在标准大气情况下,R_n = 4R,R 为地球半径;r 为径向距离;el 为锥面仰角的弧

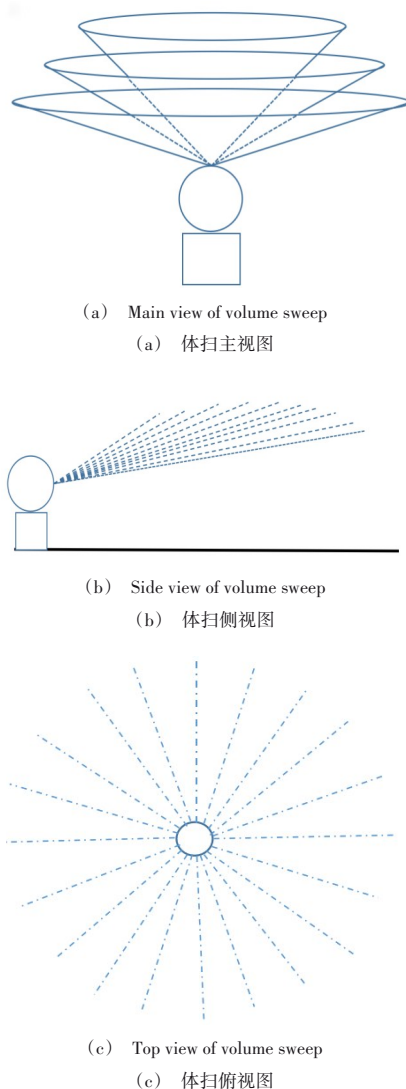


Fig. 1 Schematic diagram of a complete volume sweep
图1 一次完整的体扫示意图

度; az 为方位角的弧度^[20]。

(2)将以雷达站点为原点的坐标转换为经纬度。转换公式为:

$$lon = \arctan\left(\frac{gx}{((gz + elev + RE) \times \cos(slat) - gy \times \sin(slat))}\right) + slon \quad (4)$$

$$lat = \arctan\left(\frac{(gz + elev + RE) \times \sin(slat) + gy \times \cos(slat)}{\sqrt{gx^2 + ((gz + elev + RE) - gy \times \sin(slat))^2}}\right) \quad (5)$$

式中: lon 、 lat 分别为数据点经纬度的弧度; $slat$ 、 $slon$ 分别为雷达站点经纬度的弧度。

(3)将经纬度转为右手坐标系坐标。转换公式为:

$$x = RE \times \cos(lat) \times \sin(lon) \quad (6)$$

$$y = -1 \times RE \times \cos(lat) \times \cos(lon) \quad (7)$$

$$z = RE \times \sin(lat) \quad (8)$$

式中: x 、 y 、 z 为数据点在右手坐标系中的坐标。

4 MC算法

4.1 MC算法基本思想

MC算法是一种基于面绘制的三维重建算法,其基本思想为将三维空间的物体在笛卡尔直角坐标系下分解为若干立方体体素,每个体素由上下相邻两层的8个顶点组成,将每个体素的8个顶点与给定等值面阈值进行比较来构建体素的状态表;然后根据该表找出体素与等值面相交的边,通过线性插值计算相交边与等值面的交点和交点的法向量;最后使用三角形面片按照一定的拓扑结构将所有等值点连接成等值面。

4.2 MC算法应用于气象数据重建的缺陷

MC算法在三维空间场内对体素依次遍历寻找等值点,其要求网格数据必须是规则的,而气象数据具有不规则性。在原始雷达数据中,不同仰角包含的径向数不全是相同的,不同仰角径向上的数据点个数也不全是相同的,但是同一仰角每一根径向上包含的点数是相同的。例如,以某一仰角角度体扫一周后包含的径向数为365,每个径向上探测到的数据点为1 840;另一仰角角度体扫一周后扫描到的径向数为362,每个径向上探测到的点数为960。气象数据量庞大,将其插值到网格点构建体素需要消耗一定时间;构建好体素后,遍历这些体素寻找等值点也需要消耗大量时间。因此,MC算法不能直接应用于气象数据重建,会对实时性和交互性造成影响。

5 NBV-MC算法

为了克服MC算法应用于气象数据重建的不足,NBV-MC算法以MC算法为基础,着重从归一化气象数据、减少体素数量、加速遍历体素3个方面进行优化与改进。NBV-MC算法流程如图2所示。

5.1 数据归一化处理

针对雷达数据的不规则性导致其不能直接适用于MC算法这一问题,对原始雷达数据进行归一化处理,以保证每个仰角包含的径向数和每根径向上包含的数据点个数相同。一般来说,在原始雷达数据文件中,最低仰角探测到的径向数和每根径向上的数据点个数最多,因此以该点数为标准进行数据归一化处理。具体操作为从径向上最后一点开始,根据径向分辨率计算出该点的径向距离,并将该点的值记为0,直到该仰角上的径向数和径向上的点数与标准径向数和径向上的点数相等。归一化处理虽然会使原始雷达数据中增加许多值为0的点,但是这些点会在后续算法中被去掉,不会影响整体处理速度。

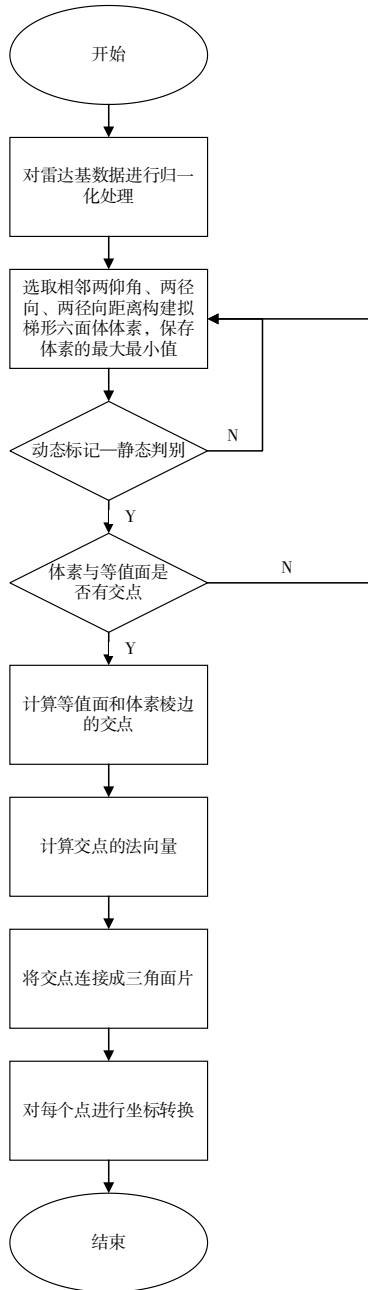


Fig. 2 NBV-MC algorithm flow
图2 NBV-MC算法流程

5.2 根据雷达数据特点构建拟梯形六面体体素

为避免大量插值、减少体素数量、提升重建速度,针对雷达基数据的存储特点,从三维极坐标角度构建拟梯形六面体作为体素^[18]。从最低仰角开始,选取与其相邻的仰角,分别在两个仰角上从第一个方位角开始选取与其相邻的方位角,再分别从两个方位角上的第一个径向距离开始,选取与其相邻的径向距离构建单位拟梯形六面体。每个仰角的最后一个方位角与第一个方位角相连接,每个方位角的最后一个径向距离与最后一个仰角不进行构建。

如图3所示,假设拟梯形六面体的某个顶点坐标为 $(\theta_i, \varphi_j, r_k)$,其中 θ_i 为第*i*个扫描锥面的仰角角度, φ_j 为仰角

上第*j*个方位角, r_k 为方位角上第*k*个径向距离,则剩余7个顶点的坐标分别为 $(\theta_i, \varphi_j, r_{k+1})$ 、 $(\theta_i, \varphi_{j+1}, r_k)$ 、 $(\theta_i, \varphi_{j+1}, r_{k+1})$ 、 $(\theta_{i+1}, \varphi_j, r_k)$ 、 $(\theta_{i+1}, \varphi_j, r_{k+1})$ 、 $(\theta_{i+1}, \varphi_{j+1}, r_k)$ 、 $(\theta_{i+1}, \varphi_{j+1}, r_{k+1})$ 。

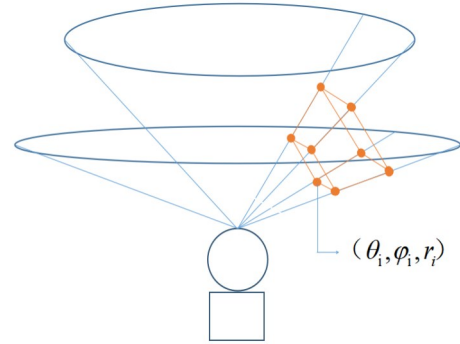


Fig. 3 Schematic of the proposed trapezoidal hexahedral voxel constructed from radar-based data
图3 雷达基数据构建拟梯形六面体体素示意图

5.3 状态标记—动态判别

在寻找构成等值面的三角面片时,MC算法需要遍历所有体素,但是能找出三角面片的体素只占一小部分,其中还存在许多不需要处理的无用体素,而处理这些无用体素往往需要花费大量时间和内存。为进一步提升重建速度,需要剔除无用体素。对每一个六面体进行状态标记,若六面体8个顶点中的最大值小于等值面值,或最小值大于等值面值,则六面体不包含构成等值面的三角面片,即六面体为无用体素,标记六面体状态为0,否则状态为1。在遍历寻找构成等值面三角面片的六面体时进行动态判别:依次遍历六面体,若六面体标记状态为0,则不再在六面体中寻找三角面片;反之,六面体状态标记为1,则进入该六面体依次判断与等值面的交点。

NBV-MC算法对完成坐标转换的雷达基数据进行归一化处理;从最低仰角开始,选取与其相邻的仰角,分别在两个仰角上从第一条径向开始选取与其相邻的径向,再分别从两条径向上从第一个径向距离开始选取与其相邻的径向距离构建单位拟梯形六面体体素,保存六面体体素的最大、最小值,标记六面体的状态;依次遍历每一个体素,通过体素状态动态判别其是否需要处理,若需要,则将体素的8个顶点值与给定阈值进行比较,构建体素状态表,根据状态表得到与等值面相交体素的棱边,通过线性插值计算体素棱边与等值面的交点,同时计算三角面片中各个顶点的法向量,将所有交点按照一定的拓扑结构连接成三角面片;若不需要,则该体素不进行处理。

6 实验方法与结果分析

6.1 实验数据及环境

以文件名为Z9592.20160914.133505.AR2的雷达基数据

据为研究对象,该文件为编号 Z9592 的厦门雷达站点在 2016-09-14 21:35:05 探测到的 10 个仰角的雷达数据。实验使用的电脑处理器为 Inter Core i5-7300HQ CPU @ 2.50GHz,内存为 8 GB。

6.2 实验结果

在构建体素时,MC 算法需要根据雷达分辨率将雷达数据插值到三维网格点上,实验使用到的雷达基数据覆盖了半径为 460 km,高度约 150 km 的数据点,径向上的分辨率为 250 m。考虑在实际应用中高度大于 20 km 的反射率因子几乎为 0,因此需要插值 3 680×3 680×80 个数据点以保证包含所有回波数据。而 NBV-MC 算法以雷达基数据构建拟梯形六面体,不论雷达实际探测半径和高度为多少,只需存储 1 840×365×9 个数据点即可,与 MC 算法相比体素数量降低了 99.44%。

在使用 MC 算法进行重建时,为了避免对回波盲区和无回波区的重建,若体素的 8 个顶点均处于回波盲区或无回波区域,则跳过该体素的三角面片搜索。MC 算法和 NBV-MC 算法的重建效果如图 4(彩图扫 OSID 码可见)所示。可以看出,两种方法在数据密集的区域差异并不明显,在数据较稀疏的区域差异较为明显。MC 算法在数据稀疏区域中云层间的连接比 NBV-MC 算法更加平滑。这是由于 MC 算法的体素个数多于 NBV-MC 算法,且 MC 算法每个体素上的点都是经过插值得到,而 NBV-MC 算法每个体素上的点为原始雷达基数据,没有进行插值,因此 MC 算法寻找连接等值面的点个数较多,云层间的连接就更加平滑。使用 NBV-MC 算法重建的雷达数据三维面绘制图像在细节上真实反映了雷达数据,云层间的连接也足够平滑,更加贴近真实的云层信息,还原了云层轮廓,便于气象研究人员分析天气数据。

分别选取回波强度值为 15 DBZ、25 DBZ、35 DBZ 作为三维重建等值面的阈值验证 NBV-MC 算法的性能,同时与 MC 算法和文献[18]中的算法进行比较,结果见表 1。可以看出,与 MC 算法相比,NBV-MC 算法进行三维重建所需的三角面片数量减少了 33.14% 以上,重建效率提升了 77.70% 以上;与文献[18]算法相比,NBV-MC 算法将重建效率提升了 69.22% 以上。NBV-MC 算法由于遍历的体素数量大幅减少,无需大量插值构建体素,进行三维重建的三角面片数量和时间均有一定程度的降低,加入的状态标记—动态判别进一步提升了重建速度。

7 结语

本文提出的 NBV-MC 算法首先对数据进行归一化处理,解决了气象数据不能直接适用于 MC 算法的缺点;然后在处理六面体时对其进行状态标记,在遍历六面体时对其状态进行动态判别,减少对无用体素的处理,加快了重建速度;同时对雷达数据点进行了拟合,提高了数据的真实

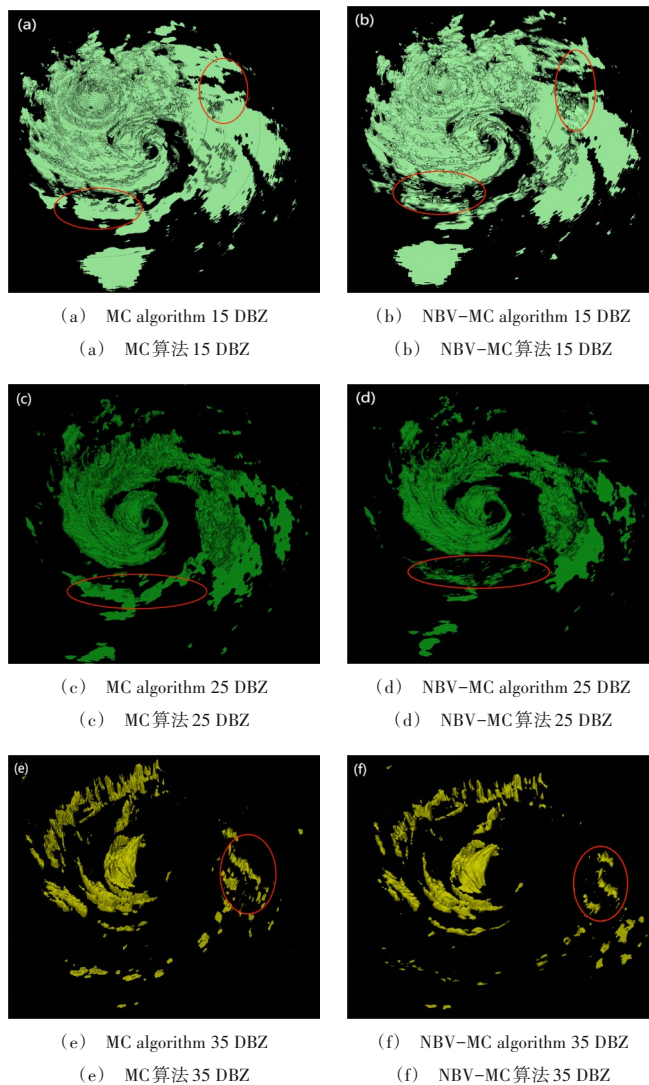


Fig. 4 Comparison of reconstruction effect between MC algorithm and NBV-MC algorithm with different echo intensity

图 4 MC 算法与 NBV-MC 算法在不同回波强度下的重建效果比较

Table 1 Performance comparison of reconstruction algorithms
表 1 重建算法性能比较

重建方法	当前阈值/DBZ	三角面片数量/个	重建时间/ms
MC 算法	15	1 459 832	11 684
	25	1 299 950	9 617
	35	775 752	8 565
文献[18]算法	15	976 054	8 464
	25	813 576	7 759
	35	288 676	6 713
NBV-MC 算法	15	976 054	2 605
	25	813 576	1 970
	35	288 676	668

性。将该算法应用于雷达数据的三维面绘制中效果较好,能将探测到的数据快速真实地展示出来,有利于雷达数据三维渲染实时场景的交互。然而该算法尚存在不足之处,例如在交互响应时间要求苛刻的场景下不能很好地满足要求;使用的建模方法在雷达数据细节展示方面虽然足够

真实,但没有对算法重建方式可能存在的面二义性进行验证。在后续工作中将加入八叉树或硬件设备进一步提升重建速度,同时采用渐近线消除面二义性。

参考文献:

- [1] WEN H, LIU L P, ZHANG Y. Improvements of ground clutter identification algorithm for Doppler weather radar[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(3):736-749.
文浩,刘黎平,张扬. 多普勒天气雷达地物回波识别算法改进[J]. 高原气象,2017,36(3):736-749.
- [2] HUANG X Y, PENG J, MAO Z Y, et al. Analysis of algorithm for identifying active jamming echo from Doppler weather radar[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(3):371-380.
黄小玉,彭浩,毛紫阳,等. 多普勒天气雷达有源干扰回波识别算法研究[J]. 气象,2019,45(3):371-380.
- [3] YU X D, ZHENG Y G. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(3):391-418.
俞小鼎,郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报,2020,78(3):391-418.
- [4] LIU S Y, SUN J, GUO W D, et al. A dealing and graphic system for Doppler radar data[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(7):2,44-46.
刘淑媛,孙健,郭卫东,等. 多普勒雷达数据处理显示系统[J]. 气象,2004,30(7):2,44-46.
- [5] LIU Z N, SHI Z Z, JIANG M R, et al. Using MC algorithm to implement 3d image reconstruction for Yunnan weather radar data [J]. Journal of Computer and Communications, 2017, 5(5):50-61.
- [6] ZHANG J, ZHANG S D, DAI H. Design of a severe weather monitoring and warning system for Doppler weather radar PUP products [J]. Torrential Rain and Disasters, 2018, 37(5):486-492.
张杰,张思豆,代华. 多普勒天气雷达PUP产品强天气监测预警系统设计[J]. 暴雨灾害,2018,37(5):486-492.
- [7] WANG X, QIAN D L, ZHU B, et al. Research on real-time rendering algorithm for three-dimensional echoes of weather radar[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2022, 41(2):94-99.
王兴,钱代丽,朱彬,等. 天气雷达三维回波实时渲染算法研究[J]. 实验室研究与探索,2022,41(2):94-99.
- [8] BAO T T, JIAO S M, YIN X R. Design and implementation of a 3d visualization analysis platform for Doppler weather radar[J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 48(4):490-495.
鲍婷婷,焦圣明,殷笑茹. 多普勒天气雷达三维可视化分析平台设计与实现[J]. 气象科技,2020,48(4):490-495.
- [9] MASAYUKI M, YURA K, TAKEHIKO K, et al. Analyses of three-dimensional weather radar data from volcanic eruption clouds [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2021, 412:107178.
- [10] LU M Y, WANG X H, LIU X T, et al. Web-based real-time visualization of large-scale weather radar data using 3D tiles[J]. Transactions in Gis, 2021, 25(1):25-43.
- [11] LU M Y, CHENG Z J, WANG J, et al. A topological framework for real-time 3D weather radar data processing[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1):813-831.
- [12] MA J C, JIANG M R, FANG S Q. Three-dimensional reconstruction of cone meteorological data based on improved MarchingTetrahedra algorithm[J]. Computer Science, 2021, 48(11A):644-647.
马俊成,姜慕容,方素琴. 基于改进MarchingTetrahedra算法的锥形气象数据三维重建[J]. 计算机科学,2021,48(11A):644-647.
- [13] LORENSEN W E, CLINE H E. Marching cubes: a high resolution 3D surface construction algorithm[J]. ACM Siggraph, 1987, 21(4):163-169.
- [14] CUSTODIO L, PESCO S, SILVA C. An extended triangulation to the Marching Cubes 33 algorithm[J]. Journal of the Brazilian Computer Society, 2019, 25(1):6-24.
- [15] CIRNE M V M, PEDRINI H. Marching cubes technique for volumetric visualization accelerated with graphics processing units [J]. Journal of the Brazilian Computer Society, 2013, 19(3):223-233.
- [16] BI S B, LU Y, ZENG X W, et al. Improved Marching Cubes algorithm and its three-dimensional meteorological simulation [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(7):1405-1411, 1418.
毕硕本,陆源,曾晓文,等. Marching Cubes改进算法及其气象三维模拟[J]. 系统仿真学报,2017,29(7):1405-1410, 1418.
- [17] ZHOU Y, JIANG F. Improved Marching Cubes based on CUDA[J]. Computer Science, 2018, 45(11A):573-575.
周筠,蒋富. 基于CUDA架构的改进Marching Cubes算法[J]. 计算机科学,2018,45(11A):573-575.
- [18] LU M Y, CHEN M, WANG X H, et al. 3D modelling strategy for weather radar data analysis [J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(24):1-10.
- [19] WANG Z K, YANG L, JING L M. Improved Marching Cubes algorithm for echo data of meteorology radar [J]. Computer Engineering and Design, 2007(17):4323-4325.
王中科,杨玲,敬腊梅. 基于气象雷达回波3D重建的Marching Cubes改进算法[J]. 计算机工程与设计,2007(17):4323-4325.
- [20] LIU Y, LIU J Z, SUN H Y. 3D visualization technology and application of weather radar data [J]. Meteorological Disaster Prevention, 2014, 21(4):41-43.
刘岩,刘建朝,孙海燕. 天气雷达数据三维可视化技术及应用[J]. 气象灾害防御,2014,21(4):41-43.

(责任编辑:尹晨茹)