



一种基于多普勒天气雷达基数据的三维建模算法

摘要

根据多普勒天气雷达基数据空间呈锥状分布的特点,提出了基于基数据的移动梯状多面体三维建模算法(MTPD).该方法采用梯状多面体作为体积单元,根据雷达三维建模空间范围选择六面体索引和四面体索引两种不同模式构建三维等值面,以平衡算法效率和建模结果精度.在该算法基础上利用 WebGL 技术开发了多普勒天气雷达三维可视化平台.结果表明:与传统三维建模算法相比,MTPD 在保证建模精度的条件下明显提升了算法效率,六面体索引模式和四面体索引模式计算效率分别提高 62.5%和 23.0%,四面体索引模式得到的回波三维结构更连续,基于 WebGL 的多普勒天气雷达三维可视化平台提供了跨平台的雷达三维展示,能够直观反映对流云的三维结构.

关键词

多普勒天气雷达;三维建模;移动梯状多面体;WebGL

中图分类号 P412

文献标志码 A

收稿日期 2021-12-06

资助项目 中国气象局小型基建项目(QJ-2017006);江苏省气象局重点项目(KZ201904)

作者简介

殷笑茹,女,主要从事气象信息系统研发工作.yxr_vicky@163.com

焦圣明(通信作者),男,学士,正研级高工,主要从事气象信息系统研发和可视化研究.jandyism@126.com

1 江苏省气象信息中心,南京,210008

2 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京,210008

3 江苏省气象台,南京,210008

0 引言

多普勒天气雷达是探测中小尺度对流天气系统及其强度、分布、发展和演变的主要手段之一,具有很高的时间和空间分辨率,为灾害性天气预警预报准确率的提高发挥了重要作用^[1-4].利用计算机图形学技术将天气雷达探测生成的基数据进行图像展示,是气象工作者观察雷达回波分布和发展状况、准确分析天气过程的直观有效手段.目前国内应用于气象业务的天气雷达数据展示仍以二维影像为主^[5-7],但二维显示方式仅反映某一层次的回波分布情况,难以真实反映云的空间结构.三维建模可以直观展示和分析雷达回波的内部特征,有助于理解天气系统的空间结构从而提高对天气系统的预测能力.因此,对天气雷达数据三维建模是气象数据应用的必然趋势,也是天气预报业务发展的迫切需求.

近年来国内外学者针对天气雷达三维建模进行了相关研究.Emvik^[8]用截面平面切片、表面提取和立体渲染三种算法对雷达回波进行三维建模研究;Kristof 等^[9]通过 CUDA 光线投射算法进行核心外立体渲染实现 NEXRADII 反射率数据三维显示;Moreno 等^[10]将雷达每个仰角的雷达反射率二维图像作为输入组合成三维雷达回波结构;肖艳姣等^[11]采用 NVI 算法将雷达反射率资料插值到经纬度高度的三维格点上,张志强等^[12]在此基础上采用移动立方体算法和光线投影算法实现雷达回波的三维重构,该产品在灾害性天气短时临近预报系统(SWAN)中得到应用;骆兴江^[13]通过 Proximity Clouds 算法改进光线投影算法实现雷达三维显示;韩春艳^[14]通过提取气象雷达 PPI 图像断层的轮廓线实现雷达回波三维建模.上述可视化算法将雷达回波显示从二维平面扩展到三维空间,有助于雷达数据深入分析,但仍存在一定的局限性:1)以上算法都使用规则网格数据作为雷达回波三维建模的数据源,要求把以极坐标形式存储的雷达基数据插值到笛卡尔坐标系下的三维格点上,这虽然提高了雷达数据的空间精度,但是一方面占用大量计算资源,另一方面使得可视化准确性依赖于插值算法的准确性;2)由于插值得到的三维格点数据量比原始雷达数据的数据量大得多,计算更加繁复,降低了算法效率,难以适应实时交互要求高的场景.

总体上,基于插值格点数据的传统雷达三维建模算法具有预处理环节多、计算复杂度高、渲染数据量大等缺陷,无法应用于要求快

速响应的实时业务中.目前国内外主流的雷达三维显示系统例如国内 SWAN 系统、国外的 Vis5D 和 GR2analyst 均采用 C/S 架构,此类系统因安装要求各异应用范围受到限制^[15-16].本文直接将多普勒天气雷达基数据作为数据源,根据其数据特点提出一种移动梯状多面体三维建模算法 (Marching Trapezoidal Polyhedrons 3D modeling algorithm, MTPD),并传统三维建模算法比较评估该算法的准确性和适用性.在 MTPD 算法基础上利用 WebGL 技术开发了基于 B/S 架构的多普勒天气雷达三维可视化平台,并对 2019 年 3 月 20 日南京地区出现的强对流天气进行分析.

1 多普勒天气雷达基数据介绍

多普勒天气雷达的观测方式首先是在一个仰角上以雷达站为原点从其正北方向顺时针进行 360° 扫描采样,得到扫描锥面上的数据,然后根据不同体积扫描方式对规定的仰角由低到高逐个扫描^[17].雷达在完成一次体扫后以雷达站为坐标原点采用仰角、方位角、径向距离存储雷达反射率、谱宽和径向速度,生成二进制的基数据文件^[18].由于多普勒天气雷达基数据中的反射率因子能够直观反映云内部降水粒子的尺度和密度分布,因此本文基于雷达基数据的反射率进行三维建模.图 1 是 SA 型多普勒天气雷达降水天气下 VCP21 扫描模式,规定了 9 个扫描仰角,每个仰角层上方位角采样间隔为 1°,沿径向方向的相邻采样间隔为 1 km,最大探测距离时 460 km,体扫时间间隔为 6 min.

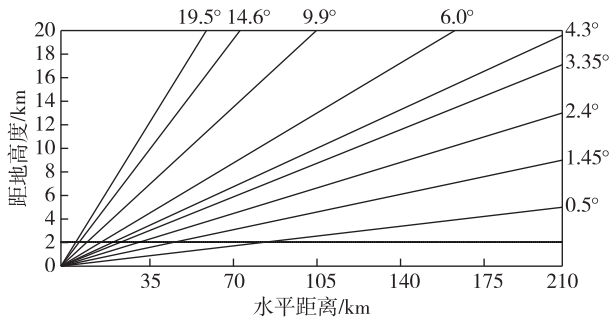


图 1 SA 型多普勒天气雷达 VCP21 探测模式
Fig. 1 Elevation angle detection of CINRAD/SA Doppler weather radar VCP21

2 三维建模算法 MTPD

MTPD 算法思路(图 2)如下:

1) 体素构建:三维建模理论中把最小处理体积单元称之为体素^[19],MTPD 采用梯形六面体作为体素来构造雷达基数据三维结构.

2) 适用模式判定:根据建模空间范围大小选择六面体索引和四面体索引其中一种进行三维等值面构建以平衡算法效率和结果精度.

3) 计算等值面与体素交点:通过插值方法计算等值面与体素的交点坐标.

4) 绘制三维等值面:把三角面片作为连接交点的基本几何图元逐个绘制体素中的等值面,最终得到雷达回波的三维模型.

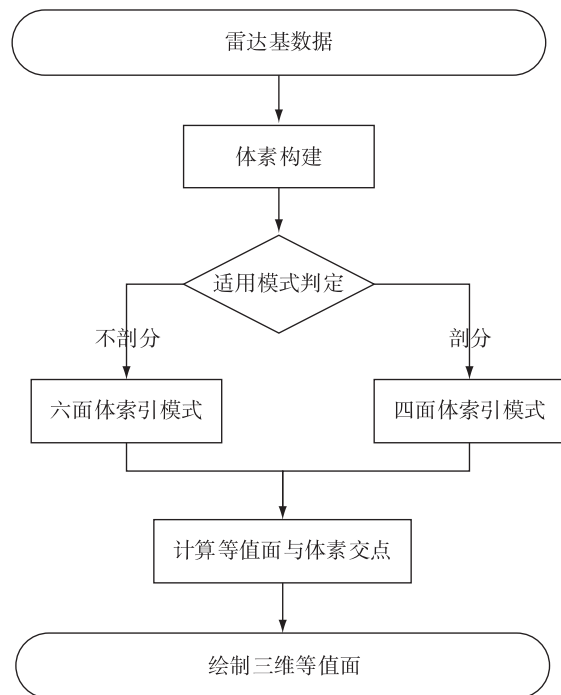


图 2 MTPD 算法流程
Fig. 2 MTPD algorithm flow

2.1 体素构建

本文根据雷达基数据的存储特点直接从极坐标角度出发构造体素,结果如图 3 所示.分别将径向距离库长 r_0 、同一仰角和径向距离上相邻方位角 φ_i 和 φ_{i+1} 的连线、同一方位角和径向距离上相邻仰角 θ_i 和 θ_{i+1} 的连线作为棱边,以此构成的梯形六面体作为体素 V_i .

为方便算法实现,需要将雷达基数据的极坐标系转换为以雷达站为原点、雷达站正北方向为 X 正向、雷达站正西方向为 Y 正向、高度由低到为 Z 正向的直角坐标系,同时考虑回波高度值受地球曲率影响^[20],坐标转换公式如下:

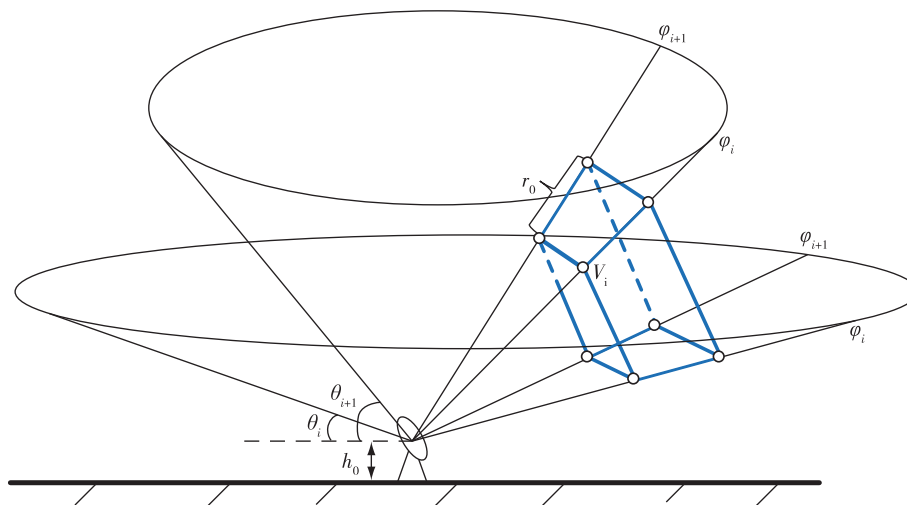


图3 根据雷达基数据构建梯形多面体体素

Fig. 3 Constructing trapezoidal hexahedron voxels from radar base data

$$\begin{cases} x = r \times \cos \theta \times \cos \varphi, \\ y = r \times \cos \theta \times \sin \varphi, \\ z = h_0 + r \times \sin \theta + \frac{r^2}{2R_e}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 r 是径向距离, θ 是仰角, φ 是方位角, h_0 是雷达站高度, R_e 是在标准大气折射下的地球半径.

图4是体素在直角坐标系下体素顶点 V_i ($0 \leq i \leq 7$) 和棱边 E_i ($0 \leq i \leq 11$) 编号, 后文涉及到的顶点和棱边编号均以此图为例.

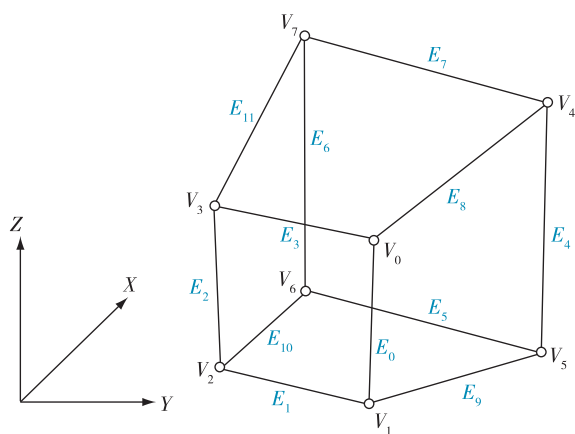


图4 体素顶点和棱边编号示例

Fig. 4 Vertex and edge numbering of voxels

2.2 适用模式判定

设等值面值为 α , 每个体素顶点的反射率有大于 α 或小于等于 α 两种状态, 记状态值为 λ . 显然当体素一条棱边的两个端点 λ 不等时该棱边与等值面必有交点. 本文把三角面片作为连接交点的基本图

元, 如图5所示, 面 $V_0V_3V_7V_4$ 上两个对角顶点 λ 相等, 且不等于相邻顶点 λ , 则该面上存在图5a和5b两种等值面抽取方式. 若该面作为相邻体素的公共面时, 构建的三维结构将会出现图5c中不封闭的情况. 为解决上述问题, 本文把梯形六面体分割成5个四面体, 在每个四面体中进行等值面提取. 图6给出了四面体中抽取等值面的拓扑. 全部顶点状态值 λ 相等时, 四面体与等值面没有交点(图6a); 只有1个顶点与其他顶点的 λ 不相等, 生成1个三角面片(图6b); 当有2个顶点与其他顶点的 λ 不相等, 生成2个三角面片(图6c). 四面体与等值面的拓扑关系仅有以上3种, 因此提取等值面时不存在公共面有2种连接方式.

由于体素剖分势必会增加处理的体素个数从而增加算法计算时间, 因此必须考虑算法效率与结果精度之间的平衡. 本文把不采用体素剖分的建模方式称为六面体索引模式, 采用体素剖分的建模方式称为四面体索引模式. 假设最大径向距离为 460 km、最大方位角为 360° 、9个仰角空间范围内雷达基数据每个采样点值都大于 0, 按照表1给出的23个测试空间范围分别计算两种建模方式生成体素的耗时. 图7是表1选取测试空间范围的XY平面示意图, $\Delta\varphi$ 是两个方位角 φ_i 和 φ_j 之间的夹角, 采样点 p_i 和 q_j 的径向距离均等于 r , 测试空间XY平面取由原点 O 、 p_i 、 q_j 构成的扇形 $S_{p_iq_j}$, 高度取所有仰角.

图8是测试空间范围下两种模式的体素构建耗时结果, 可以看出六面体索引模式和四面体索引模式在大范围空间下计算耗时差距明显, 最大空间范

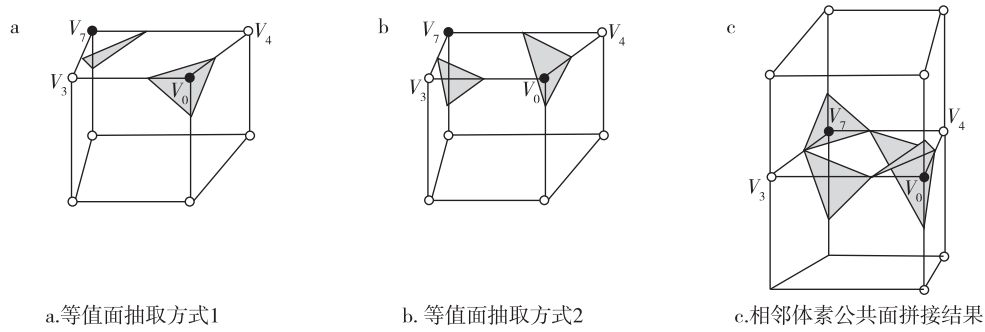


图5 一种相邻体素的等值面抽取拓扑(空心点代表顶点反射率大于 α ,实心点代表顶点反射率小于等于 α)

Fig. 5 Iso-surface extraction topologies of adjacent voxels (hollow dots indicate that the reflectivity of the vertex is greater than α , and solid points mean that the reflectivity of the vertex is less than or equal to α)

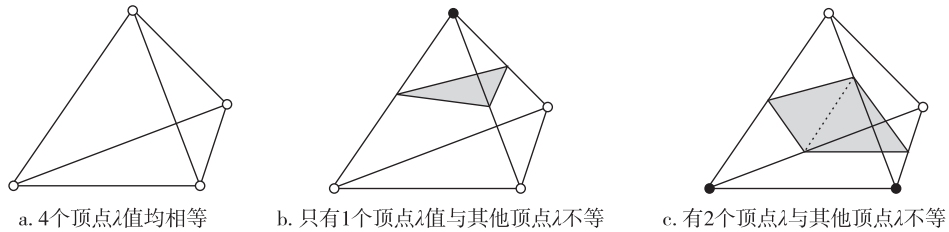


图6 四面体中等值面抽取拓扑

Fig. 6 Iso-surface extraction topology in tetrahedron

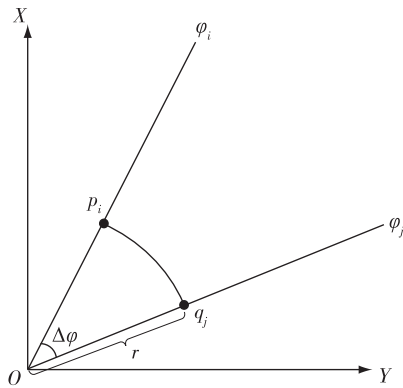


图7 测试空间范围的XY平面示意

Fig. 7 Schematic diagram of XY plane for test space range

围上四面体索引模式耗时是六面体索引模式的2倍.随着空间范围不断缩小两者计算耗时差距逐渐缩小,在 r 为140 km、 $\Delta\varphi$ 为 105° 范围上(序号17)四面体索引模式与六面体索引模式时间差缩小到53 ms,此时 S_{pq} 面积约等于 $17\,959\text{ km}^2$.当空间范围再缩小,两种建模方式生成体素的计算时间差小于20 ms,几乎可以忽略不计.本文在算法实现时是通过矩形框在雷达XY二维平面上框定范围进行三维建模,选取空间范围是XY平面取矩形 S ,高度取所有仰角,如图9所示.因此矩形 S 面积小于等于 $17\,959\text{ km}^2$

表1 雷达三维建模适用模式测试空间范围

Table 1 Spatial range of applicable mode test for 3D radar modeling

序号	r/km	$\Delta\varphi/^\circ$	S_{pq}/km^2	序号	r/km	$\Delta\varphi/^\circ$	S_{pq}/km^2
1	460	345	637 062.6	13	220	165	69 691.0
2	440	330	557 528.0	14	200	150	52 359.8
3	420	315	484 904.8	15	180	135	38 170.3
4	400	300	418 879.0	16	160	120	26 808.2
5	380	285	359 136.4	17	140	105	17 959.4
6	360	270	305 362.8	18	120	90	11 309.7
7	340	255	257 244.1	19	100	75	6 544.9
8	320	240	214 466.1	20	80	60	3 351.0
9	300	225	176 714.6	21	60	45	1 413.7
10	280	210	143 675.5	22	40	30	418.8
11	260	195	115 034.7	23	20	15	52.3
12	240	180	90 477.8				

时选用建模精度更高的四面体索引模式,矩形 S 面积大于 $17\,959\text{ km}^2$ 时则选用建模速度更快的六面体索引模式.

2.3 六面体索引模式拓扑构建

六面体索引模式以梯形六面体为基本体积单元构建三维等值面连接拓扑.设顶点索引 Index 表示梯

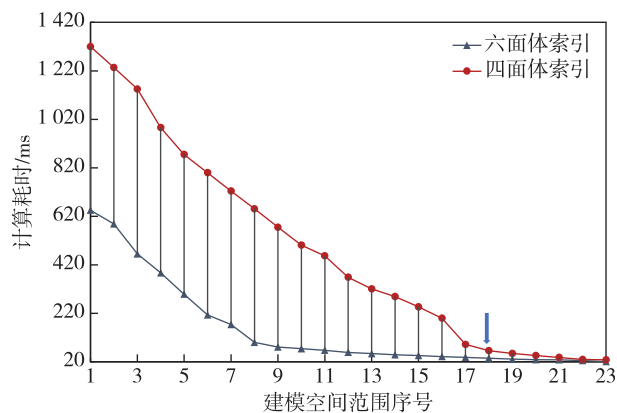


图8 两种模式下体素构建耗时对比
Fig. 8 Comparison of time-consuming for voxel construction in two modes

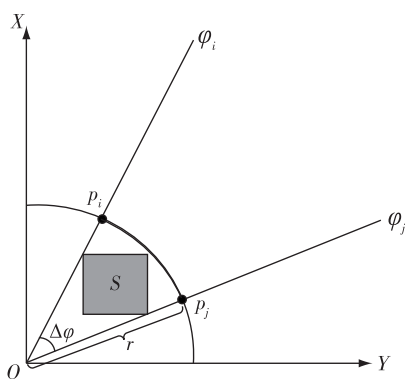


图9 算法实现选取空间范围的XY平面示意图
Fig. 9 The algorithm realizing the XY plane of the selected spatial range

形六面体顶点 $V_i (i = 0, 1, \dots, 7)$ 与等值面值 α 的关系状态,结构如图 10 所示.每个顶点用 1 个 bit 来表示.当顶点值小于或等于 α 时 $V_i = 1$,当顶点值大于 α 时 $V_i = 0$.梯形六面体的 8 个顶点都有大于 α 或小于等于 α 两种可能,因此 Index 范围是 0 到 255.例如 Index 值为 1 则表示 V_0 顶点为 1,其他顶点为 0.

构造构型索引表 IntersectEdge 存储等值面与体素的相交边,采用 Index 值进行索引. IntersectEdge 数组中每个元素以 2 个字节标识 12 条棱边与等值面是否相交,每条边占用 1 bit, 0 代表不相交, 1 代表相

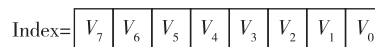


图 10 顶点索引字节结构示意图
Fig. 10 Diagram of vertex index byte structure

交,最高 4 位固定为 0.例如棱边 E_0, E_3, E_8 与等值面有交点, $IntersectEdge[Index] = 0000000100001001$.

三角面片构型表 Triangle 存储体素内连接等值点的三角形个数和连接方式,采用 Index 值进行索引.图 11 是三角面片构型表结构示意图, Triangle 数组的每个元素是长度为 16 的一维数组,该数组中每个值是等值点所在棱边的编号,每 3 个值组成一个三角面片.

2.4 四面体索引模式拓扑构建

图 12 是梯形六面体剖分示意,图 12a 和 12b 是把梯形六面体划分成五个四面体的两种方式.由于两种划分方式得到的四面体不同,为避免相邻梯形六面体的公共面上三角面片无法拼接,在相邻体素剖分时采用图 12c 间隔交替的划分方式.相邻梯形六面体交替划分后,由顶点 P_0, P_1, P_2, P_3 构成的公共面划分成 $\Delta P_0 P_2 P_3$ 和 $\Delta P_0 P_1 P_2$ 两个三角形,这两个三角形分别是四面体的一个面.这种体素剖分方式一方面得到的多面体数量少,另一方面保证了在公共面上的拼接一致性.

四面体索引模式以四面体作为体素构建等值面.四面体共有 4 个顶点,因此顶点索引 Index 的 V_4 至 V_7 固定设置为 0.由顶点状态可知四面体棱边与等值面的相交关系有 $2^4 = 16$ 种,因此棱边表 IntersectEdge 和三角面片构型表 Triangle 的长度均为 16. IntersectEdge 数组的每个元素改用一个字节标志四面体 6 条棱边与等值面是否相交,最高 2 位固定为 0. Triangle 的每个元素变为长度为 9 的一维数组,结构与六面体索引模式保持一致.

2.5 计算交点坐标

根据相交边的两个顶点坐标及其法向量,采用线性插值确定交点的坐标和法向量.设交点所在棱

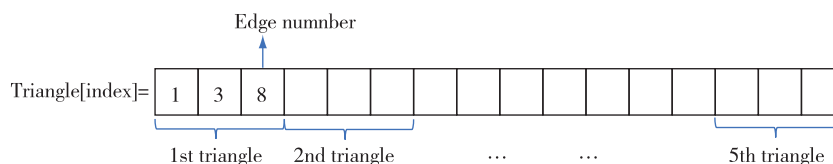


图 11 三角面片构型表结构示意图
Fig. 11 Diagram of triangular patch configuration table

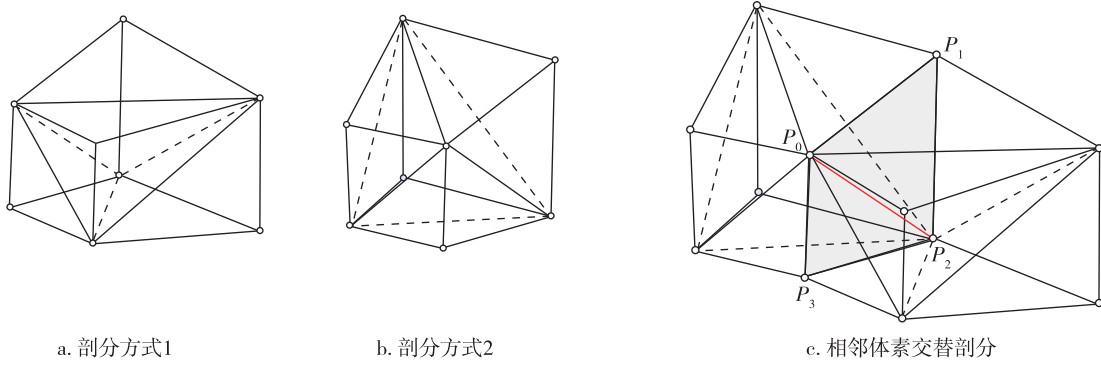


图 12 相邻梯形六面体的剖分(实线代表体素外面划线,虚线代表体素内面划线,红色虚线代表公共面上的剖分线)

Fig. 12 Partition of adjacent trapezoid hexahedron(solid lines represent lines drawn on the outside of the voxel, dashed lines represent lines drawn on the inside of the voxel, and red dotted line represents the division line on the common surface)

边的两个端点 $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 的反射率为 R_1 和 R_2 , 等值面值为 c , 则等值点 $P(x, y, z)$ 的坐标为

$$P(x, y, z) = P_1(x_1, y_1, z_1) + \frac{c - R_1}{R_2 - R_1} (P_2(x_2, y_2, z_2) - P_1(x_1, y_1, z_1)). \quad (2)$$

对于等值面的任意一点, 其梯度的矢量方向就是等值面在该点的法向量. 根据公式(3)计算顶点的梯度再通过式(4)线性插值求出交点处的法向量. 其中函数 $R(x, y, z)$ 是代表坐标 x, y, z 上的反射率, Δx 、 Δy 和 Δz 是在 3 个方向的体素边长.

$$\begin{cases} N_x(x, y, z) = \frac{R(x+1, y, z) - R(x-1, y, z)}{2\Delta x}, \\ N_y(x, y, z) = \frac{R(x, y+1, z) - R(x, y-1, z)}{2\Delta y}, \\ N_z(x, y, z) = \frac{R(x, y, z+1) - R(x, y, z-1)}{2\Delta z}, \end{cases} \quad (3)$$

$$N(x, y, z) = N(N_x, N_y, N_z) = N_1(x_1, y_1, z_1) + \frac{c - R_1}{R_2 - R_1} (N_2(x_2, y_2, z_2) - N_1(x_1, y_1, z_1)). \quad (4)$$

根据交点坐标和法向量, 按照三角面片构型表 Triangle 给出的交点连接方式, 绘制三维等值面.

3 实验与分析

为检验雷达三维建模算法效果, 采用表 2 中三种算法对 2016 年 6 月 23 日 06:18 时 (UTC), $33.6^\circ \sim 34.2^\circ \text{N}$, $119.5^\circ \sim 119.8^\circ \text{E}$ 空间区域范围进行雷达回波三维建模. 测试计算机为双核处理器、主频 2.50 GHz、内存 4 GB.

3.1 算法性能分析

表 3 是各测试算法运行 10 次得到的三角面片

数和运算时间, 其中运算时间取运行 10 次的平均值. 相同空间范围区域内, 六面体索引模式算法所得三角面片数是传统三维建模算法的约 53%, 显著减少运算时间. 虽然四面体索引模式算法比六面体索引模式算法三角面片数增加明显, 但仍比传统建模算法少, 其计算耗时也比传统算法少 0.7 s. 因此, MTPD 算法在计算效率上优于雷达传统三维建模算法.

表 2 测试算法介绍

Table 2 Introduction of test algorithms

测试算法名称	雷达数据	体素形状	剖分
传统三维建模算法	空间分辨率 1 km 的格点数据	立方体	否
六面体索引模式	原始基数据	梯形六面体	否
四面体索引模式	原始基数据	梯形六面体	是

表 3 测试算法性能比较

Table 3 Performance comparison of test algorithms

测试算法	三角面片个数/个	运算时间/s
传统三维建模算法	790 987	3.04
六面体索引模式	415 754	1.14
四面体索引模式	708 227	2.34

3.2 三维建模结果分析

图 13 展示了各测试算法的雷达反射率三维建模效果, 从整体效果来看 MTPD 算法(图 13b 和图 13c)与传统算法(图 13a)得到的回波三维结构很接近, 存在的细小差别在实际应用中是可以接受的, 同时这也验证了 MTPD 算法的正确性. 为进一步观察雷达回波三维结构细节, 选取了 55~56 dBz 反射率进行网格化显示(图 14). 可以看到, MTPD 算法中六面体索引模式(图 14b)和四面体索引模式(图 14c)用更少的三角

面片构建了与传统三维建模算法(图 14a)几乎相同的雷达回波三维结构.六面体索引模式与传统三维建模算法网状结构(图 14a 和 14b)内有明显的空洞,而四面体索引模式(图 14c)在该区域内三角面片拼接连续,完全避免了不剖分时相邻面之间出现空洞的问题,三维结构更连续且精度更高.

综合以上实验结果, MTPD 算法产生的三角面片数量少, 三维建模耗时明显少于传统算法.六面体索引模式计算速度最快而四面体索引模式建模结果连续性最好.因此对于三维模型时效要求很高或类似台风这种大尺度天气分析的应用场景, 运用六面体索引模式能够得到理想效果, 而需要观察雷达回波结构细节的场景下采用四面体索引模式.在实际应用中, MTPD 会按照 2.2 介绍的适用模式判定标准根据建模范围矩形 S 面积自动选择索引模式.

4 算法应用

WebGL 是一种浏览器端的三维绘图标准, 不需要任何浏览器插件就能实现 Web 三维建模和交互显示, 并通过底层硬件加速提高图形渲染速度^[21].

Three.js 是封装 WebGL 底层代码的开源框架, 内置了很多 3D 图形编程中常用对象和工具, 具有开放性和易用性.本文利用该框架开发了多普勒天气雷达可视化平台, 在浏览器端实现了所提出的雷达基数数据移动梯形多面体三维建模算法, 同时还实现了三维场景下的矢量地图的缩放交互、多种图层控制、雷达基本反射率和速度图的单幅与动画显示、垂直剖面等功能.

2019 年 3 月 20 日南京地区出现强对流天气, 图 15a 为 SA 型多普勒天气雷达 05:42(UTC) 的 3.4° 仰角观测结果, 红框区域有明显的三体散射“长钉”且最强回波的反射率因子大于 60 dBz.图 15b 是图 15a 红框区域的雷达反射率三维结构, 25 dBz 回波顶高约为 10 km.从大于 40 dBz 的反射率三维结构(图 15c) 可以看到大于 65 dBz 的强回波中心在 5 km 以上区域, 呈悬垂结构, 并且垂直风切变的存在导致了悬垂结构的倾斜.06:06(UTC) 时 3.4° 仰角的反射率因子(图 15d) 明显降低, 最强回波降为约 50 dBz.图 15d 红框区域的雷达反射率三维结构(图 15e) 看到 25 dBz 回波顶高降低到 8 km.从 40 至 60 dBz 的反射

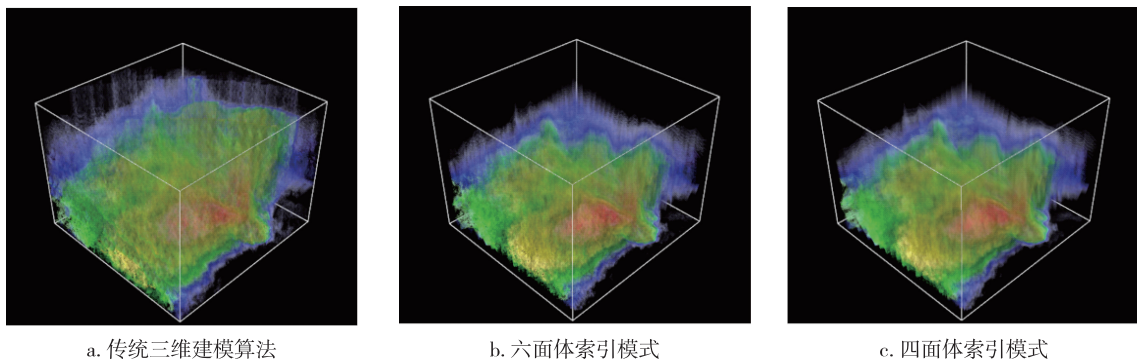


图 13 三种测试算法的三维建模结果对比

Fig. 13 Comparison of 3D modeling results of three test algorithms

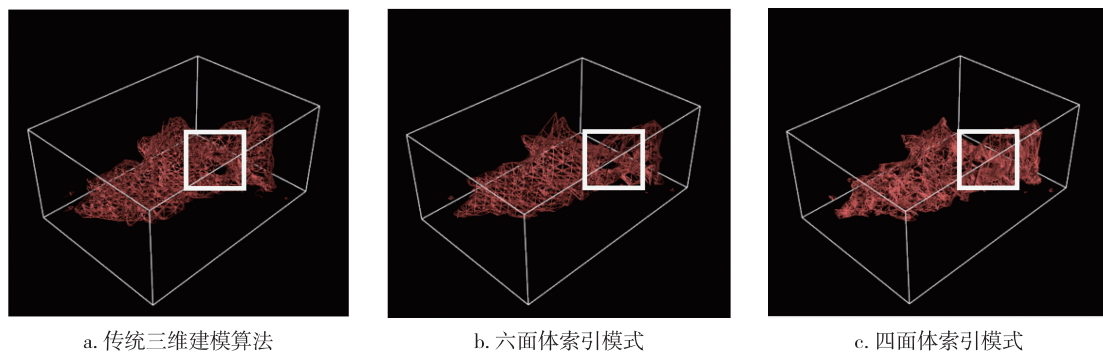


图 14 三种测试算法的 55~56 dBz 反射率三维网状结构对比

Fig. 14 Comparison of 3D netlike structure of 55~56 dBz reflectivity among three test algorithms

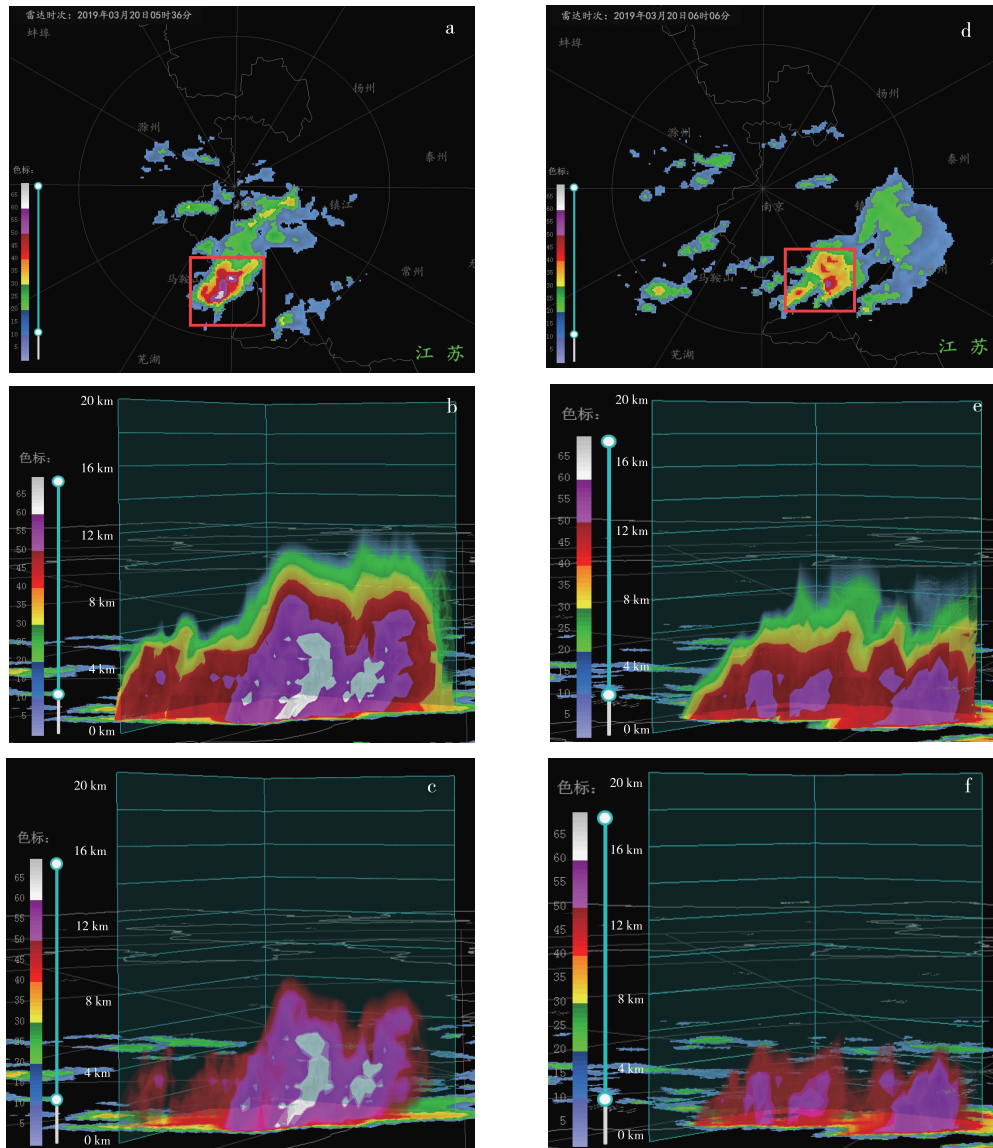


图 15 2019 年 3 月 20 日 05:42(UTC)和 06:06(UTC)南京雷达二维和三维建模展示 a.05:42(UTC)3.4°仰角基本反射率;
b.图(a)红色方框区域的三维建模结果;c.图(a)红色方框区域基本反射率大于 40 dBz 的三维建模结果;
d.06:06(UTC)3.4°仰角基本反射率;e.图(d)红色方框区域的三维建模结果;
f.图(d)红色方框区域基本反射率 40 至 60 dBz 的三维建模结果

Fig. 15 Results of 2D and 3D modeling of Nanjing radar at 05:42 (UTC) and 06:06 (UTC) on March 20, 2019
a.Basic reflectivity at 05:42 (UTC) and 3.4° elevation;b.3D modeling results of the red box area in (a);
c.3D modeling results with basic reflectivity greater than 40 dBz of the red box area in (a);
d.basic reflectivity at 06:06(UTC)and 3.4° elevation;e.3D modeling results of the red box area in (d);
and f.3D modeling results with basic reflectance of 40 to 60 dBz of the red box area in (d)

率三维结构(图 15f)看到强回波中心高度降至约 3 km,回波悬垂结构已经消失.06:08(UTC)溧水地区观测到 1 cm 直径的冰雹.雷达反射率三维结构清楚地反映了该暴雨系统的发展过程,可为预报人员直观和全面了解空间回波的分布状况和内部结构提供直接手段.

5 结论与讨论

本文根据多普勒天气雷达基数据的特征,提出了基于雷达原始基数据的移动梯形多面体三维建模算法(MTPD),与传统雷达三维建模算法进行雷达反射率建模对比实验,并以 MTPD 算法为基础利用 WebGL 技术开发了多普勒天气雷达三维可视化平

台,得到以下主要结论:

1)与基于雷达三维格点数据的传统雷达三维建模算法相比,MTPD 算法在同一空间范围三维建模结果与传统算法结果高度近似,而计算耗时分别减少 1.9 s(六面体索引模式)和 0.7 s(四面体索引模式),表明该算法在不损失精度的条件下可有效提升算法效率。

2)四面体索引模式通过将梯形六面体采用 2 种不同剖分方式交替划分成 5 个四面体解决了六面体索引模式存在的雷达三维结构不连续产生空洞的问题,显示效果精度更高.四面体索引模式可应用于类似龙卷风这种小尺度强对流天气下雷达回波三维结构分析.六面体索引模式计算速度最快,适用于整体雷达回波三维结构显示台风等大尺度天气的业务场景。

3)本算法在雷达二维平面上框定空间范围进行三维建模,当框定矩形面积小于等于 17 959 km² 时选用四面体索引模式,大于 17 959 km² 时则选用六面体索引模式.通过选用不同模式平衡计算效率和建模结果精度。

4)基于 WebGL 的多普勒天气雷达三维可视化平台实现结合地理信息的雷达回波二维和三维交互显示,使得雷达回波空间分析更为方便直观。

MTPD 算法还需要进一步优化,四面体索引模式通过剖分体素的方式增加了需要处理的体积单元数量同时也增加了三角面片数量,与六面体索引模式相比算法耗时多.下一步工作将引入并行计算技术对剖分得到的 5 个四面体同步提取三维等值面,并优化其所产生的三角片的存储结构,在保证三维建模精度的同时提高四面体索引模式的算法效率。

参考文献

References

[1] 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
WEN Hao, LIU Liping, ZHANG Yang. Improvements of ground clutter identification algorithm for Doppler weather radar [J]. Plateau Meteorology, 2017, 36 (3) : 736-749

[2] 肖艳姣.基于多普勒天气雷达体扫资料的 MARC 特征自动识别算法[J].高原气象,2018,37(1):264-274
XIAO Yanjiao. An algorithm of recognizing automatically MARC signature using the Doppler weather radar volume scanning data [J]. Plateau Meteorology, 2018, 37 (1) : 264-274

[3] 黄小玉,彭洁,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

HUANG Xiaoyu, PENG Jie, MAO Ziyang, et al. Analysis of algorithm for identifying active jamming echo from Doppler weather radar [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45 (3) : 371-380

[4] 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
YU Xiaoding, ZHENG Yongguang. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78 (3) : 391-418

[5] 梁海河,张沛源,牛昉,等.全国天气雷达数据处理系统[J].应用气象学报,2002,13(6):749-754
LIANG Haihe, ZHANG Peiyuan, NIU Fang, et al. China operational weather radar data processing system [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2002, 13 (6) : 749-754

[6] 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):44-46,2
LIU Shuyuan, SUN Jian, GUO Weidong, et al. A dealing and graphic system for Doppler radar data [J]. Meteorological Monthly, 2004, 30 (7) : 44-46, 2

[7] 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
ZHANG Jie, ZHANG Sidou, DAI Hua. 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

[8] Ernvik A. 3D visualization of weather radar data [D]. Linköping, Sweden; Linköping University, 2002

[9] Kristof P, Benes B, Song C X, et al. A system for large-scale visualization of streaming Doppler data [C] // 2013 IEEE International Conference on Big Data. October 6-9, 2013, Silicon Valley, CA, USA. IEEE, 2013:33-40

[10] Moreno A, A Galdós, Mujika A, et al. Visual analytics of multi-sensor weather information georeferenciation of Doppler weather radar and weather stations [C] // International Conference on Information Visualization Theory and Applications. January 5-8, 2014, Lisbon, Portugal. IEEE, 2014:329-336

[11] 肖艳姣,刘黎平.新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J].气象学报,2006,64(5):647-657
XIAO Yanjiao, LIU Liping. Study of methods for interpolating data from weather radar network to 3-D grid and mosaics [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64 (5) : 647-657

[12] 张志强,刘黎平,谢明元,等.CINRAD 三维拼图产品显示系统[J].气象,2007,33(9):19-24,129
ZHANG Zhiqiang, LIU Liping, XIE Mingyuan, et al. A display system of CINRAD 3D mosaic products [J]. Meteorological Monthly, 2007, 33 (9) : 19-24, 129

[13] 骆兴江.多普勒天气雷达产品终端及其回波三维显示方法的设计[D].南京:南京信息工程大学,2008
LUO Xingjiang. Design of Doppler weather radar production terminal and its echoes 3D visualization method [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008

- 殷笑茹,等.一种基于多普勒天气雷达基数据的三维建模算法.
YIN Xiaoru, et al. An algorithm for 3D modeling of Doppler weather radar base data. 44-50
- [14] 韩春艳.基于气象雷达基数据的三维重构[D].天津:天津大学,2012
HAN Chunyan. The three-dimensional reconstruction based on meteorological radar data [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012
- [15] 王红艳,刘黎平,王改利,等.多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用[J].应用气象学报,2009,20(2):214-224
WANG Hongyan, LIU Liping, WANG Gaili, et al. Development and application of the Doppler weather radar 3-D digital mosaic system [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(2):214-224
- [16] 邱拓,刘锦丽,李勋.基于OPENGL的组网雷达三维显示系统的开发与应用[J].气象科技,2015,43(5):833-838
QIU Tuo, LIU Jinli, LI Xun. Development and application of OPENGL-based 3D display visualization system in weather radar networking[J]. Meteorological Science and Technology, 2015, 43(5):833-838
- [17] 刘应军,顾松山,周雨华,等.新一代天气雷达体扫模式的比较分析[J].气象,2006,32(1):44-50
LIU Yingjun, GU Songshan, ZHOU Yuhua, et al. Comparison of CINRAD/SA volume coverage patterns on algorithms output[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(1):44-50
- [18] 王新强,倪青汉,童章志,等.新一代天气雷达基数据的3种内插填充方法[J].气象科技,2007,35(增刊1):61-64,94
WANG Xinqiang, NI Qinghan, TONG Zhangzhi, et al. Interpolating and filling methods for processing basic data of new generation weather radar [J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(sup1):61-64,94
- [19] 毕硕本,张国建,侯荣涛,等.三维建模技术及实现方法对比研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(16):26-30,83
BI Shuoben, ZHANG Guojian, HOU Rongtao, et al. Comparing research on 3D modeling technology & its implement methods[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(16):26-30,83
- [20] 王丽荣,王立荣.水平距离和海拔高度对雷达估测降水影响及订正[J].气象,2017,43(9):1152-1159
WANG Lirong, WANG Lirong. Influence of horizontal distance and altitude on radar rainfall estimation and its correction [J]. Meteorological Monthly, 2017, 43(9):1152-1159
- [21] Rego N, Koes D. 3Dmol.js: molecular visualization with WebGL[J]. Bioinformatics, 2015, 31(8):1322-1324

An algorithm for 3D modeling of Doppler weather radar base data

YIN Xiaoru^{1,2} JIAO Shengming¹ XI Du³ BAO Tingting¹

¹ Jiangsu Meteorological Information Center, Nanjing 210008

² Key Laboratory of Transportation Meteorology, China Meteorological Administration, Nanjing 210008

³ Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract This paper proposed a Marching Trapezoidal Polyhedrons 3D modeling algorithm (MTPD) based on the cone-shaped spatial distribution of Doppler weather radar base data. In this algorithm, a trapezoidal polyhedron was introduced to replace the cube in the conventional modeling algorithm as a basic volume element for modelling. On the other hand, the hexahedral index or tetrahedral index was selected as the construction model for the 3D iso-surface based on the difference in spatial range for 3D radar modeling, to balance the efficiency of the algorithm and the precision of the modeling results. Based on this algorithm, a Doppler weather radar 3D visualization platform was developed using WebGL technology. The results revealed that the algorithm significantly improved efficiency without compromising the precision of 3D modeling when compared with the conventional modeling algorithm based on radar grid data. The durations for the algorithms were reduced by 1.9 seconds and 0.7 seconds, respectively under the hexahedral index mode and the tetrahedral index mode, while under the tetrahedral index mode, the 3D echo structure was more continuous with a higher level of precision. The Doppler weather 3D radar visualization platform based on the B/S architecture could provide a cross-platform 3D radar display, thus visualize the 3D structure of convective cloud effectively.

Key words Doppler weather radar; 3D modeling; marching trapezoidal polyhedrons; WebGL