

6-8-2020

Airborne Weather Radar Visual Simulation Based-on Dynamic Satellite Cloud Image

Zhang Jun

School of Digital Media, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Airborne Weather Radar Visual Simulation Based-on Dynamic Satellite Cloud Image

Abstract

Abstract: A real-time simulation algorithm was proposed to generate a wide range of the common aviation weather condition for the flight simulator based-on a set of dynamic satellite cloud images. With this efficient weather simulation algorithm, a fast radar echo visual simulating method was proposed. The proposed method used the 2D simplified Navier-Stokes and microphysics equations to implement the essential numerical simulation of the aviation weather condition. *By this way, the complex problem of large-scale cloud resolving and particle-backscattering computing could be viewed as a simple 2D multi-resolution image processing.* Real application on the flight simulator shows that the proposed method can provide a vividly visual airborne weather radar display in real-time on a normal PC platform.

Keywords

airborne weather radar, aviation weather, flight simulation, visual emulation, wind field reconstruction

Recommended Citation

Zhang Jun. Airborne Weather Radar Visual Simulation Based-on Dynamic Satellite Cloud Image[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1344-1350.

基于动态卫星云图的机载气象雷达视觉仿真方法

张军

(江南大学数字媒体学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对飞行模拟器中机内航电设备显示画面仿真需求, 提出一种基于动态卫星云图的大范围航空气象条件实时仿真算法, 并进一步构建出基于虚拟气象数据的快速气象雷达回波显示画面的仿真方法。该方法利用二维简化纳维-斯托克斯方程及云微物理方程作为气象条件仿真核心数值计算模型, 将复杂的大范围三维云场演化、风场重建和雷达波后向散射等物理过程仿真计算简化为二维图像处理问题。实际应用表明, 方法可在普通 PC 平台上实时向飞行模拟器输出视觉逼真的机载气象雷达设备的动态显示画面。

关键词: 机载气象雷达; 航空气象; 飞行模拟器; 视觉仿真; 风场重建

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 06-1344-07

Airborne Weather Radar Visual Simulation Based-on Dynamic Satellite Cloud Image

Zhang Jun

(School of Digital Media, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: A real-time simulation algorithm was proposed to generate a wide range of the common aviation weather condition for the flight simulator based-on a set of dynamic satellite cloud images. With this efficient weather simulation algorithm, a fast radar echo visual simulating method was proposed. The proposed method used the 2D simplified Navier-Stokes and microphysics equations to implement the essential numerical simulation of the aviation weather condition. *By this way, the complex problem of large-scale cloud resolving and particle-backscattering computing could be viewed as a simple 2D multi-resolution image processing.* Real application on the flight simulator shows that the proposed method can provide a vividly visual airborne weather radar display in real-time on a normal PC platform.

Keywords: airborne weather radar; aviation weather; flight simulation; visual emulation; wind field reconstruction

引言

飞行模拟器是重要的航空装备论证仿真系统, 它是能够复现飞行器及空中环境并可以进行操作的模拟装置^[1]。作为计算机仿真技术最成功的应用

之一, 飞行模拟器是计算机仿真技术与航空技术相结合的产物, 并伴随着计算机技术的发展逐步走向成熟, 受到世界上许多国家的重视。

飞行模拟器是典型人在回路的仿真系统, 而飞行员有 70% 以上的信息来自于视觉。因此, 飞机的内、外视景仿真系统是飞行模拟器的关键子系统, 成为飞行模拟器研究过程中的热点之一^[2-5]。然而, 现有飞行视景仿真系统的研究多集中于机外三维地形和建筑物的仿真, 较少关注航空气象模拟以及机内航空电子设备的动态显示画面仿真。



收稿日期: 2014-11-05 修回日期: 2014-12-24;
基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20141113, BK20130158);
作者简介: 张军(1978-), 男, 甘肃临潭, 博士, 副教授, 研究方向为计算机仿真、计算机图形学、航空电子等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1344 •

机载气象雷达(Airborne Weather Radar)可以探测飞机前方航道的天气状况,包括雷雨、冰雹、风暴、湍流、云雾和雷暴等^[6],帮助飞行员正确评估气象态势,对飞行安全与飞行品质都有重要的保障作用,已经成为大型民用飞机不可或缺的重要航空电子部件。现有飞行模拟器对机载气象雷达设备的仿真多集中于其雷达回波和天线物理特性的计算机模拟测试^[7-14],较少关注该设备显示画面与真实机载设备的视觉一致性。另一方面,由于机载气象雷达所在平台为高速机动目标,动态仿真过程中需要大范围的气象环境激励。然而,现有高精度机外气象条件仿真模拟^[15-19]算法在涉及范围较大时会导致庞大的计算量,很难在飞行模拟器的硬件环境上实现与机载气象雷达仿真系统实时动态数据通信,进一步降低了现有先进机载气象雷达仿真技术^[10,13]在飞行模拟器上应用的可行性。

本文针对飞行模拟器中机载气象雷达设备的显示画面视觉仿真需求,提出基于动态卫星云图的风场和云场快速重建算法,并大幅简化雷达波束对云场、风场探测过程的虚拟计算,形成一种支持大范围飞行模拟的机载气象雷达设备显示画面实时动态仿真方法。该方法具有计算快速、视觉逼真度较高等优势,可有效提高飞行模拟器中机内航空电子设备视景仿真的沉浸感,为飞行员学习机载气象雷达设备功能的模拟训练提供可信仿真环境。

1 机载气象雷达视觉仿真算法框架

为尽可能真实模拟机载气象雷达系统的数据接收、处理和显示等功能,并使之与飞行模拟器间能进行实时通信,本文提出机载气象雷达仿真软件的框架如图 1 所示。

机载气象雷达仿真软件包含“大范围气象条件仿真”、“信号采集仿真”和“人机界面仿真”3 个子模块,每个仿真模块独立运行,并实时交换数据。该软件接收外部飞行模拟器提供的飞机状态,并实时向飞行模拟提供同步的雷达回波图像和机外云场信息。

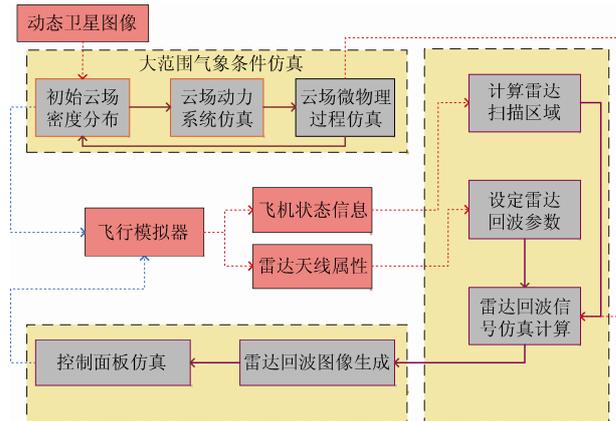


图 1 机载气象雷达仿真软件框架

大范围气象条件仿真模块:通过一定的初始条件(动态卫星云图)建立大范围飞行空域内的三维气象信息(云场密度、风场方向和云滴物理特性等),详细计算过程将在本文第 2 节中描述。

信号采集仿真模块:结合飞行高度、姿态、速度和雷达控制面板设置等数据计算机载气象雷达波束在碰到机外云场颗粒时的虚拟回波信号,详细计算过程将在本文第 3 节中描述。

人机界面仿真模块:通过绘制机载气象雷达人机界面(周边按键、辅助文本和图标等),提高仿真画面逼真度。该模块可采用常见图形库或仪表显示工具库^[20]进行软件开发,本文不再赘述。

2 气象条件仿真算法

重建大范围航空气象条件是机载气象雷达仿真过程中的关键步骤,为气象雷达回波提供动态更新的机外气象目标特性。现有高精度气象雷达回波仿真算法^[10]一般假设仿真系统能够事先获得外部航空气象条件,对大范围航空气象条件仿真的重视程度较为不足。实际上,由于计算能力和数据来源的限制,成熟的数值天气模型^[15]无法在普通 PC 上完成大范围航空气象条件的实时仿真计算,无法满足机载气象雷达这种安装在高速机动平台上的雷达回波仿真计算需求。考虑到基于单纯静态卫星云图反演云场的算法^[21-23]不能支持较长时间跨度的风场重建计算,本文提出基于动态卫星云图与简化风场数学模型^[24]相结合的反演计算思路,为机载

气象雷达回波仿真提供实时、有效的机外气象目标特性。

Jos Stam^[24]提出一组简化的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程用于云场流体动力学过程模拟:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} &= -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p / \rho + f \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= -(\mathbf{u} \cdot \nabla) \rho + \kappa \nabla^2 \rho + S \end{aligned} \quad (1)$$

式中: \mathbf{u} 为速度矢量场; t 代表时间; ν 为运动黏性系数; ρ 为云场密度; p 为压力; f 为外力项(通常为作用在流体体积上的力,如浮力或重力等); ∇ 为微分算子,分别应用于梯度、散度和拉普拉斯算子: ∇p , $\nabla \cdot \mathbf{u}$, $\nabla^2 p$ 。

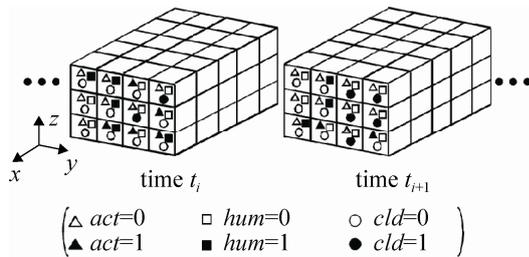


图 2 简化的云微物理演化模型^[25]

为了模拟云场内部物理特性动态演化, Dobashi^[25]提出的简化微物理模型计算各种云滴成分比例。该方法采用元胞自动机方式:云的模拟空间使用 1 个三维网格表示,网格中的每个单元都有 3 个二元状态(水汽 hum 、相变因子 act 和云 cld); 每个状态为布尔量。如图 2 所示,通过在每个时间步应用一组状态转换规则(2),可以模拟云场的形态的演化,包括云滴形成、消散以及随风飘动情况。

$$\begin{aligned} hum_k &= f(hum_{k-1}, act_{k-1}) \\ cld_k &= g(cld_{k-1}, act_{k-1}) \\ act_k &= h(act_{k-1}, hum_{k-1}, \phi(act_{k-1})) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k 表示当前时刻; f, g, h 为基于布尔运算规则的演化函数。

Dobashi 和 Jos Stam 的方法都存在仿真精度不足的缺陷,其模拟计算结果与实际云场、风场分布相比缺乏细节特征。为此,本文提出在原始 Dobashi

演化过程的基础上,通过导入动态卫星云图来限制水汽供应,形成与卫星云图类似的云场。

在云场 N-S 方程解算过程中,云场密度 ρ 由 Dobashi 方法^[25]中云 cld 控制,而 Dobashi 方法中水汽 hum 由卫星云图中像素值高于阈值的区域控制。

设在第 k 步解算时云场密度为 ρ_k , 水汽分布为 hum_k , 云滴分布为 cld_k , 卫星云图为 I_k , 则有

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{k+1} &= cld_k \\ cld_k &= hum_{k-1} \\ hum_{k-1} &= (I_{k-1} > \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, α 为卫星云图中判定像素为云的阈值,对于一般 8 位单通道灰度图像, $\alpha = 128$ 。

最后,云场密度为 ρ_{k+1} 将由 $\bar{\rho}_{k+1}$ 作为初值,代入方程(1)进行计算。为保证气象条件的实时更新速度,上述所有计算都在二维网格中进行。典型计算结果将在第 4 节中给出。

3 快速雷达回波信号仿真方法

机载气象雷达发射机周期性地产生时间上短促而峰值功率强大的高频振荡电磁波,经过天线馈线分系统后再发射出去^[26]。发射分系统是间歇性工作的,在短暂工作中产生电磁波并发射出去后,休眠直到进入下一个周期。天气雷达发射波通常为极化波,即场强在各方向分布不均匀^[27-28]。

气象雷达每一瞬间接收到的云雨回波都是由有效照射体积内所有的云和降水粒子的散射回波共同组成的,于是将所有的云和粒子的后向散射相加,即可得到探测云和降水的气象雷达方程的初步形式^[10,29],即:

$$P(R, \theta) = \frac{P_t G^2 \lambda^2 h \theta \phi}{512 \pi^2 R^2} \sum_{(x, y, z) \in V} \sigma(x_l, y_l, z_l) \quad (4)$$

式中: $h = \tau c$ 为雷达波脉冲宽度; τ 为脉冲间隔时间; c 为电磁波在真空中的传播速度; R 为目标到雷达天线的距离; P_t 为雷达发射功率; G 为天线增益; λ 为雷达波长。方程(4)中假设雷达波水平波瓣宽度 θ 和垂直波瓣宽度 ϕ 近似相等,在扫描单元 V 内第 l 个气象目标的后向散射面为 $\sigma(x_l, y_l, z_l)$ 。

本文雷达回波信号仿真计算根据当前飞机飞行姿态, 计算飞机前方扇形区域上离散格点的理论雷达回波强度, 形成动态机载气象雷达视觉仿真画面。为保证计算速度, 本文计算过程实质是在二维气象条件上进行, 并通过指数衰减模型(5)近似逼近三维气象条件。

由于本文方法仅为模拟雷达回波视觉图像, 可简化气象目标后向散射面为云场密度分布, 即

$$\sigma(x, y, z) = \rho(x, y) \cdot \exp(-\delta(z - z_0)^2) \quad (5)$$

式中: z_0 为云层预定高度; δ 为衰减常数。

为进一步提高仿真计算速度, 本文提出利用多层不同分辨率二维气象数据近似逼近雷达回波的累积效应, 使每个雷达波扫描单元的仿真计算过程仅涉及少量双线性插值计算, 从而避免方程(4)中

耗时的局部累加计算, 即

$$\sum_{(x, y, z) \in V} \sigma(x_l, y_l, z_l) \approx \sum_{n=1}^N \phi_n(R) \text{interp2}(\rho^n, x, y) \cdot \exp(-\delta(z - z_0)^2) \quad (6)$$

$$\phi_n(R) = \exp\left(-\left(\frac{R}{R_{\max}} - \frac{n}{N}\right)^2\right)$$

式中: ρ^n 为不同分辨率的云场密度图像; $\text{interp2}(\bullet)$ 为双线性插值函数。特别地, $\phi_n(R)$ 为加权系数, 其作用是使距离雷达越远的回波数值越多的从低分辨率云场密度图像中得来, 以便模拟远距离回波的累积效应(如图 3(b))。实验结果显示, 为达到视觉逼真的雷达回波显示画面, 仅用三幅不同分辨率云场密度图像即可 ($N = 3$)。

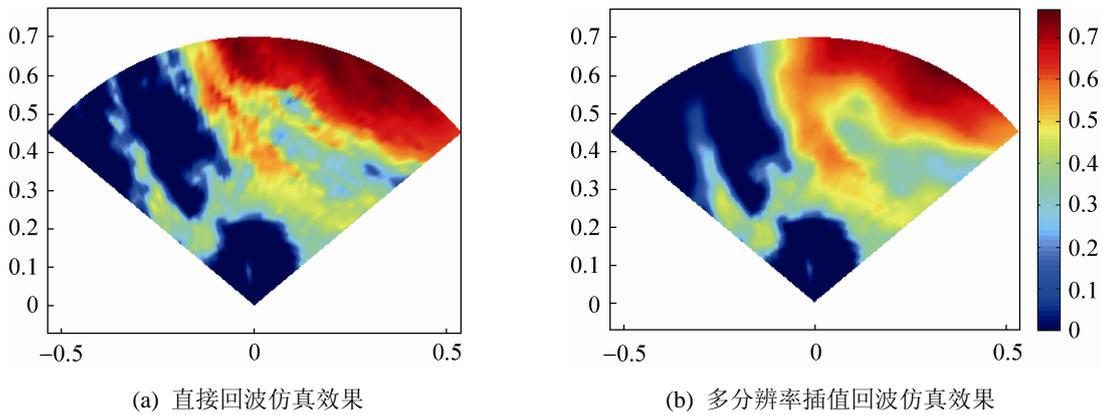


图 3 多分辨率插值效果对比图

4 计算结果及讨论

本文仿真硬件平台为一台 HP Z800 服务器(双 Intel Xeon X5650 CPU, 4 GB 内存, NVidia Quadro 4000 GPU), 在 Visual Studio 2012 集成开发环境下使用 C++ 语言编写仿真程序, 并使用 Intel 公司的 Threading Building Blocks (TBB) 多核并行运行库加速雷达仿真计算过程, 最终实现机载气象雷达仿真画面刷新率接近每秒 100 帧。

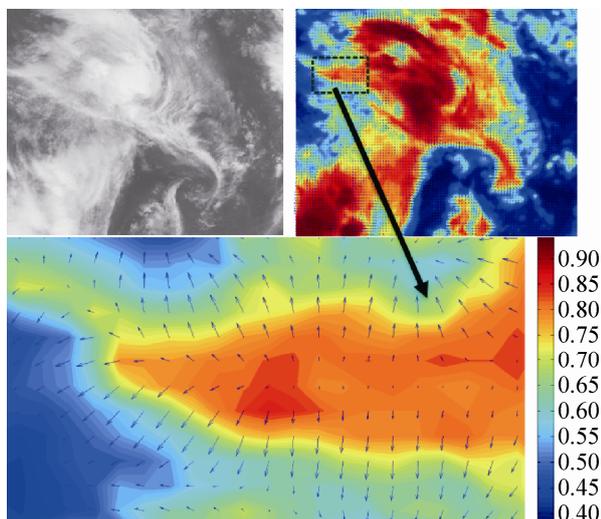
本文实验数据来自国家气象卫星中心发布的 2013 年 7 月间风云二号卫星拍摄的热带气旋系列云图, 仿真雷达对象为各大航空公司选装较多的 RockCollins 公司 WXR-700X 型号雷达, 该雷达系

统工作于特高频的 X 波段, 对雨滴、冰雹等反射率最大。由于本文系统开发目标为视觉仿真, 故仅对反演云场数据的回波强度做图像插值计算, 湍流、风切变响应为重建风场数据直接产生, 未进行雷达信号物理过程仿真和回波频谱模式识别分析。

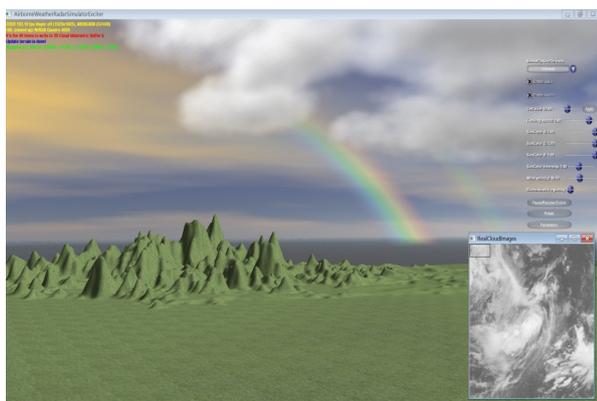
图 4 给出本文算法通过方程(1), (3)计算出的某时刻云场分布图像及其三维可视化效果, 显示出本文云场仿真计算过程可以给出大范围二维云场密度分布, 并通过衰减常数的方式(5)近似给出三维云场分布。图 4 中三维可视化程序基于郭胜等人开发的实时动态体积云模拟程序源代码编写, 通过修订每一时刻云场密度取值对本文云场计算结

果进行可视化展示。受益于本文云场仿真计算的速度优势，本文算法可与飞行模拟器视景实时通信，使飞行仿真机外环境与机内机仿真载气象雷达画面保持一致性。

算法的云场初始数据来自于真实卫星云图，故本文方法在云场分布自然特性要高于 Flight Line Wx500。



(a) 大范围云场分布图

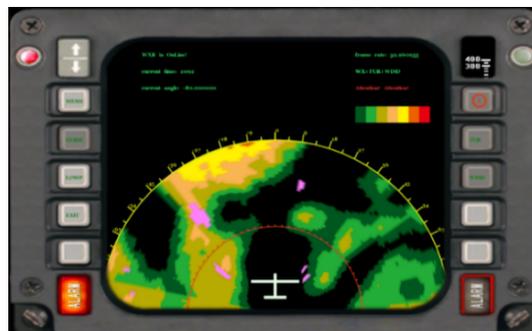


(b) 云场数据可视化结果

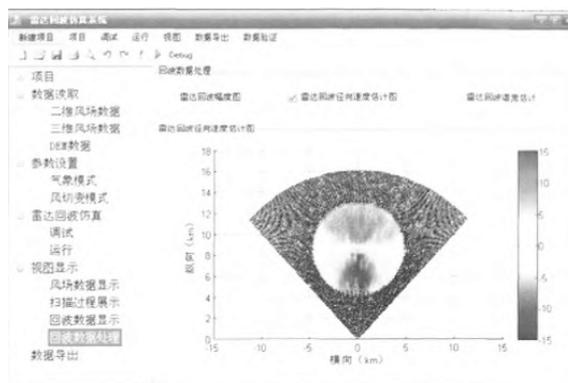
图 4 本文算法输出的大范围云场数据

图 5(a)给出本文算法通过方程(4), (6)计算出的机载气象雷达视觉仿真画面输出结果, 显示出本文仿真计算结果与真实雷达显示画面相似度远高于一般仿真算法(图 5(b)), 可为飞行模拟器提供较为逼真的雷达显示画面。

Microsoft™ Flight Simulator 是计算机游戏领域公认的高水平飞行模拟软件, 图 6 给出其机载气象雷达仿真模块(Flight Line Wx500)的输出画面, 其整体效果与本文算法输出画面类似。考虑到本文



(a) 本文算法输出的机载气象雷达视觉仿真画面



(b) 文献[9]算法输出的机载气象雷达仿真画面

图 5 机载气象雷达仿真画面对比分析

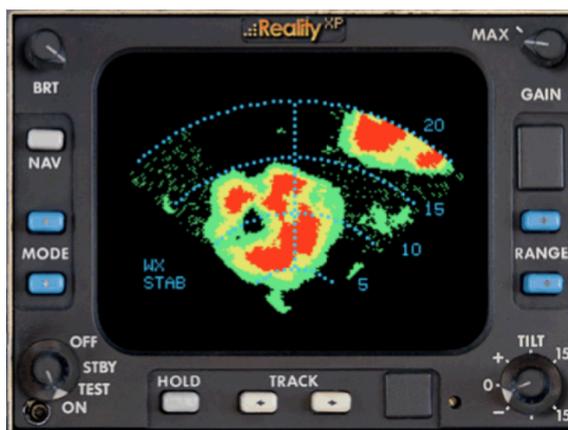


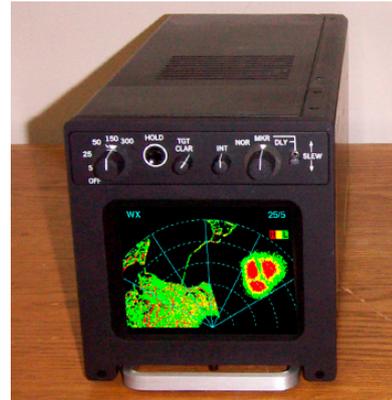
图 6 Flight Line Wx500 输出的机载气象雷达仿真画面

与国际最先进的航空电子设备生产商 RockCollins 公司研发的机载气象雷达仿真器(图 7 (a))相比, 基于本文方法的机载气象雷达仿真器在信号噪声表现上具有一定差距, 这与本文方法忽略

过多雷达回波物理特性的仿真计算方式有关。但作为面向飞行模拟器的视觉仿真需求, 本文方法已经具备了较高的仿真度。

图 8 给出本文仿真算法动态输出结果中的一段图像序列(由每隔 100 帧输出一幅的中间结果组成), 该图上排为重建云场的回波强度图像, 下排为飞机在云场正中央时的雷达扫描区域回波强度图像。

图像相似性具有较高的主观评价特性, Shrivastava 等人^[30]在研究基于内容的图像检索问题中, 提出一种基于数据驱动的图像视觉相似性评价标准计算方法。该方法利用支持向量机将待分析图像在庞大图像数据库中展开成权重向量, 从而进行量化分析。本文借助该方法对图 7、图 6 和文献[10]的雷达仿真画面与 RockCollins 公司雷达实物图像进行相似度分析, 其结果(表 1)可作为本文方法仿真画面逼真度的一个定量分析参考。



(a) RockCollins 公司仿真机载气象雷达



(b) 本文仿真机载气象雷达

图 7 本文与 RockCollins 仿真机载气象雷达对比

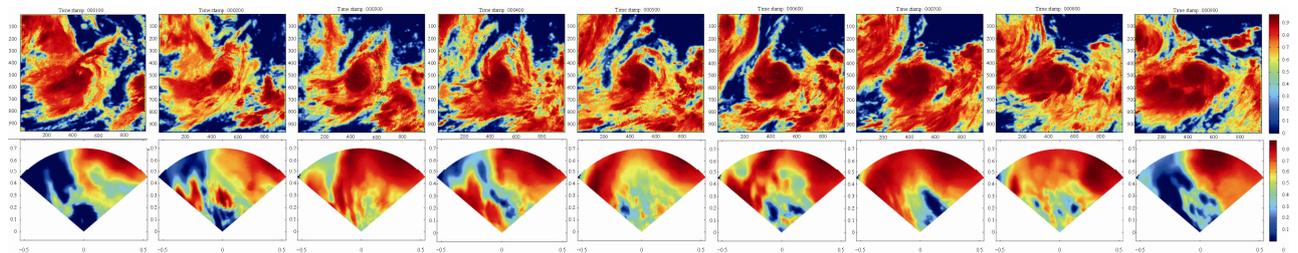


图 8 本文方法的动态仿真画面序列(上排为整个云场回波强度, 下排为雷达扫描面回波强度)

表 1 各仿真画面与图 7 a 的相似度定量分析结果

仿真画面	相似度
图 5 (a)(本文)	0.693 9
图 5 (b)	0.342 2
图 6	0.534 2
文献[10]	0.495 9

从表 1 的数据可以看出, 本文方法与 Microsoft™ Flight Simulator 都是针对视觉相似性而在输出外观上进行细致仿真的方法, 其输出画面与雷达实物的相似度高于重视物理过程仿真而忽视雷达外观的方法。

5 结论

利用动态卫星图像数据对云场密度分布进行约束, 结合简化 N-S 方程和微物理过程演化计算, 本文提出一种适于快速大范围动态气象条件模拟的算法, 并在此基础之上建立快速机载气象雷达回波画面仿真方法, 为飞行模拟器提供较为逼真的机载气象雷达显示画面。该方法具有简单易行、计算快速和画面视觉逼真度较高等特点, 可在普通 PC 平台上实现机载气象雷达显示画面的动态视觉仿真, 具有实际工程应用价值。

与基于雷达信号物理过程的专业级仿真方法相比,本文方法在信号噪声、无线电波散射特性等方面具有一定差距。本文作者将继续研究合适的噪声函数,以便进一步提高加载气象雷达仿真画面的逼真度。

参考文献:

- [1] 李林,翁冬冬,王宝奇,等. 飞行模拟器 [M]. 北京:北京理工大学出版社,2012.
- [2] 杨珂. 飞行视景仿真中若干关键技术研究及实现 [D]. 成都:电子科技大学,2013.
- [3] 郭云松. 飞行模拟器球幕视景显示系统的研究与实现 [J]. 系统仿真学报,2013,25(增1):208-215.
- [4] 李想,乔木,官巍,等. 虚拟座舱技术在飞行模拟器中的应用 [J]. 系统仿真学报,2013,25(增1):129-133.
- [5] 刘晓莉. 飞行模拟视景建模技术研究 [D]. 天津:中国民航大学,2008.
- [6] Bringi V N, Chandrasekar V. Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [7] 纪雷,王振会,黄兴友,等. 机载雷达探测数据仿真平台设计与实现 [J]. 热带气象学报,2012,28(4):557-563.
- [8] 吴仁彪,孟志超,懿范,等. 机载气象雷达风切变信号仿真 [J]. 现代雷达,2012,34(4):74-78.
- [9] 吴仁彪,胡鹏举,卢晓光. 机载气象雷达回波信号仿真系统 [J]. 中国民航大学学报,2012,30(2):1-5.
- [10] Li Z, Zhang Y, Zhang G, et al. A Microphysics-Based Simulator for Advanced Airborne Weather Radar Development [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2011, 49(4): 1356-1373.
- [11] 魏鸣,张思进,刘佳,等. 机载气象雷达扫描的理想模型仿真算法 [J]. 大气科学学报,2011,34(1):28-35.
- [12] 张晓荣,李勇,李滔,等. 机载前视风切变雷达回波信号的一种仿真方法 [J]. 系统仿真学报,2009,21(22):7023-7025.
- [13] Cheong B L, Palmer R D. A Time Series Weather Radar Simulator Based on High-Resolution Atmospheric Models [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (S0739-0572), 2008, 25(2): 230-243.
- [14] Chandrasekar V, Bringi V N. Simulation of Radar Reflectivity and Surface Measurements of Rainfall [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology (S0739-0572), 1986, 4(3): 464-478.
- [15] Warner T T. Numerical Weather and Climate Prediction [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2011.
- [16] Straka J M. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.
- [17] Tsuboki Kazuhisa, Sakakibara Atsushi. Large-scale parallel computing of Cloud Resolving Storm Simulator [C]// 4th International Symposium on High Performance Computing, Kansai Science City, USA. Japan: Springer, 2002: 243-259.
- [18] Simmel M, Diehl K, Wurzler S. Numerical Simulation of the Microphysics of an Orographic Cloud: Comparison with Measurements and Sensitivity Studies [J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2005, 39(2): 4365-4373.
- [19] Ohfuchi W, Nakamura H, Yoshioka M K, et al. 10-km Mesh Mesoscale Resolving Simulations of the Global Atmosphere on the Earth Simulator [J]. Journal of the Earth Simulator (S1349-2667), 2004, 1(4): 8-34.
- [20] 宰辰熹. 虚拟仪器技术在航空机载气象雷达测试系统中的应用 [J]. 测控技术,2012,31(1):112-115.
- [21] Kaur I, Deb S K, Kishtawal C M, et al. Low level cloud motion vectors from Kalpana-1 visible images [J]. Journal of Earth System Science (S0253-4126), 2013, 122(4): 925-946.
- [22] Yuan C, Liang X, Hao S, et al. Modeling Large Scale Clouds from Satellite Images [M]. Singapore: ACM Press, 2013.
- [23] Chuai-Aree S, Ager W J, Bock H G, et al. 3D Cloud and Storm Reconstruction from Satellite Image [C]// Proceedings of the Third International Conference on High Performance Scientific Computing. Hanoi, Vietnam: Springer, 2006: 187-206.
- [24] Stam J. A Simple Fluid Solver based on the FFT [J]. Journal of Graphics Tools (S2165-3488), 2001, 6(2): 43-52.
- [25] Dobashi Y, Kaneda K, Yamashita H, et al. A Simple, Efficient Method for Realistic Animation of Clouds [C]// SIGGRAPH, NY, USA: ACM Press, 2000: 19-28.
- [26] 焦中生,沈超玲,张云. 气象雷达原理 [M]. 北京:气象出版社,2005.
- [27] Battaglia A, Simonetani Satorukobayashi. Multiple-scattering in radar systems: A Review [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer (S0022-4073), 2010, 111(6): 917-947.
- [28] 张培昌,杜秉玉,戴铁坯. 雷达气象学 [M]. 北京:气象出版社,2001.
- [29] Bringi V N, Chandrasekar V. 偏振多普勒天气雷达原理和应用 [M]. 北京:气象出版社,2010.
- [30] Shrivastava A, Malisiewicz T, Gupta A, et al. Data-driven Visual Similarity for Cross-domain Image Matching [J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2011, 33(6): No. 154.