DOI：10.20271/j.cnki.1673−9833.2026.5012

虚拟电离层暴事件仿真方法及应用研究

王洪明，刘书志，刘晓雷

（中国电子科技集团公司第二十二研究所，山东 青岛 266000）

摘　要：通过发展电波环境效应仿真平台，逼真模拟无线电系统典型应用场景，构建电波环境及其效应评估模型，开展高效的无线电系统电波环境影响试验评估，能够提升电子信息系统电波环境辅助设计支撑能力。以电离层暴事件模拟与效应评估为切入点，利用三维 GIS、科学计算可视化、虚拟现实等多种技术手段，仿真太阳日冕物质抛射的高速等离子体 1~3 d 后到达地球，产生全球性的电离层电子密度和结构异常变化的过程，逼真模拟电离层暴“事件平静－事件发生－事件结束”的全过程，开展电离层暴对无线电系统影响评估，设计电离层暴对卫星导航定位误差仿真、电离层暴对短波通信频率变化仿真的应用实例，形成支撑短波和卫星导航系统设计和试验用户开展在线分析和交互式计算的操作能力，同时也为电波环境数字孪生技术的发展提供借鉴。

关键词：电离层暴；虚拟现实；仿真；效应评估

中图分类号：P352　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673−9833(2026)05−0091−06

引文格式：王洪明，刘书志，刘晓雷 . 虚拟电离层暴事件仿真方法及应用研究 [J]. 湖南工业大学学报，2026，40(5)：91−96.

Research on Simulation Method and Application of Virtual Ionospheric Storm Event

WANG Hongming，LIU Shuzhi，LIU Xiaolei

（The 22nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation，Qingdao Shandong 266000，China）

Abstract：Developing the simulation platform of radiowave environment effect, realistically simulatingthe typical application scenarios of radio system, constructing the radio wave environment model and its effect evaluation model, carrying out efficient experimental evaluation of radio wave environment impact on radio system, can improve the support ability of radio wave environment auxiliary design of electronic information system. This paper takes ionospheric storm event simulation and effect evaluation as the breakthrough point, using 3D GIS, scientific computing visualization, virtual reality and other technical means, simulates the process of high-speed plasma emitted by the solar coronal mass ejections arriving at the earth 1~3 days later, producing global ionosphere electron density and structure abnormal change, realistic simulation of the ionosphericstorm“event calm - event occurrence - event end”whole process, carries out the ionosphericstorm impact evaluation on radio system, designs the simulation application examples of ionosphericstorm on satellite navigation positioning error and frequency variation in shortwave communication, forms the operation ability to support short wave and satellite navigation systemsdesign and test users to carry out online analysis and interactive calculation, and also provides reference for the development of digital twin technology of radiowave environment.

Keywords：ionospheric storm；virtual reality；simulation；effect evaluation

收稿日期：2025−04−23

作者简介：王洪明，男，中国电子科技集团公司第二十二研究所高级工程师，主要研究方向为电波环境数据处理与分析及可视化仿真，E-mail：wanghongming2777@126.com

0 引言

电离层通常有着明显的日变化、季节变化规律，伴随着磁暴的发生，太阳风、磁层、电离层的耦合作用会引发电离层强烈扰动，这种扰动称电离层暴[1]。电离层暴事件导致信号衰减、射线弯曲、时延、反常传播等效应，直接影响无线电系统的作用距离、定位精度和通信质量等工作性能[2]。

随着电离层天－地基观测手段的逐步增多，针对电离层暴的特性与机制研究、理论分析以及评估与预测技术得到了长足的发展[3-4]。但受到外场试验条件和环境的限制，搭建电离层暴事件测试场景和战术指标验证的手法十分有限，事件发生期间无线电系统的工作效能无法得到充分验证和评估。

复杂系统的分析仿真是无线电系统论证研制、试验鉴定最重要的手段之一[5-7]。仿真作为第三种认识世界的方法，具有成本低、易实现、灵活性强等优点，可以较好地满足无线电系统正向设计和虚拟试验的需求[8-10]。通过对虚拟电离层暴事件仿真，可以解决电离层暴发生期间环境多变性和不可控性造成的无线电系统外场试验难以遍历的问题。当前，面向复杂环境下系统的更新改进、技术研发和原型设计等场景，以系统工程理论、方法和过程模型为指导的正向设计理念正在形成和推广[11-12]。预先使用仿真模型对无线电系统性能进行评估，改变了新的无线电系统装备研制完成后再通过外场试验发现问题，然后改进完善的传统模式，旨在提高装备指标的合理性，减少设计盲目性和反复的系统设计修改，进而提高装备研制成功率、缩短研制周期、节约研制成本[13]。

本文从电离层暴事件模拟、电离层暴事件对特定装备的影响态势模拟、典型装备的影响分析评估需求入手，依次开展实体建模与运动仿真、电离层暴事件过程粒子仿真技术研究。在此基础上，设计电离层暴对卫星导航定位误差仿真、电离层暴对短波通信频率变化仿真应用实例，形成支撑短波、卫星导航系统设计和试验用户开展在线分析、交互式计算的操作能力，同时也为电波环境数字孪生技术的发展提供理论参考。

1 电离层暴事件过程粒子仿真

太阳日冕物质抛射的高速等离子体 1~3 d 后到达地球，与地球磁层和电离层发生相互作用，产生全球性电离层电子密度和结构的异常变化，引起电离层暴。

粒子系统在三维计算机图形学中常用来模拟一些模糊且具有随机性的物体，可呈现基于虚拟现实技术的场景渲染效果，能够较好地模拟电离层暴事件过程中太阳日冕物质抛射、电离层电子密度异常变化等效果。

1.1 太阳日冕物质抛射粒子仿真

当前用于日冕物质抛射 CME（coronal mass ejection）传播数值模拟的模型非常多，但即使使用日冕中真实的 CME 拟合参数，也很难准确模拟 CME 到达的时间和特性[14]，本文将太阳日冕物质视为由随机数量、不规则的、随机分布的粒子组成，根据 CME 常规统计结果，这些粒子的速度通常在 500 km/s 左右，空间尺度对地张角平均约为 45°[15-16]。因此需要设置太阳日冕物质抛射粒子的生命周期和其他不断改变的属性（如形状、大小、颜色、位置和速度）。

具体实现时，绘制太阳日冕物质抛射粒子系统的步骤如下。

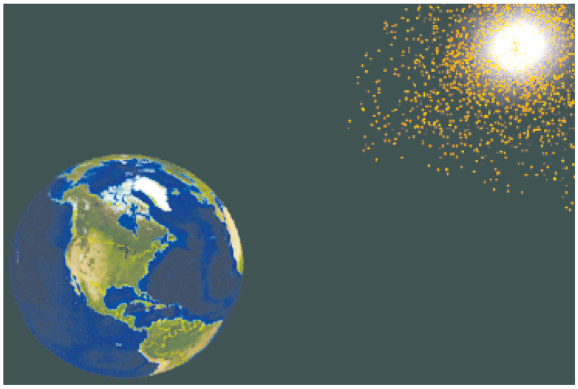
步骤 1 对新产生的太阳日冕物质抛射粒子，设置起始属性，包括粒子系统的初始位置、移动方向、偏移速度、粒子数目、放大缩小比例、粒子大小和颜色、粒子的形状分布等。

步骤 2 分析太阳日冕物质抛射粒子的运动规律，建立粒子属性变化的动态特性模型。本文仿真太阳日冕物质对地抛射，随着仿真时间的流逝，粒子会自行更改自身属性。

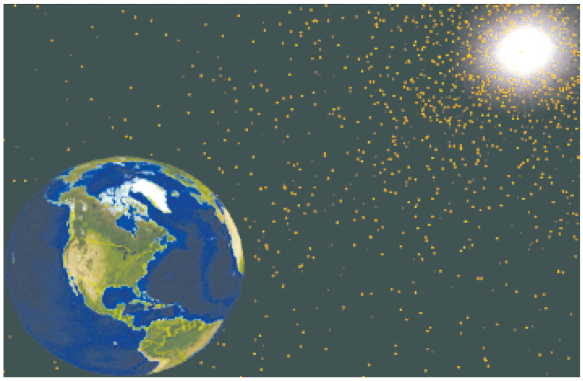
步骤 3 删除生命周期结束的太阳日冕物质抛射粒子，对超出边界的粒子直接进行消亡处理。

步骤 4 每隔固定时间重新绘制太阳日冕物质抛射粒子的轨迹图。

综上可知，通过反复执行步骤 1~ 步骤 4，模拟太阳日冕物质抛射的动态变化过程，可绘制得到太阳日冕物质抛射粒子系统的仿真分布图，如图 1 所示。其中，图 1a 展示了太阳日冕物质抛射初期高速等离子体粒子的仿真分布。1~3 d 后太阳日冕物质抛射的高速等离子体到达地球，图 1b 展示了太阳日冕物质抛射到达地球粒子的仿真分布。



a）抛射初期高速等离子体粒子仿真分布



b）抛射的高速等离子体到达地球粒子仿真分布

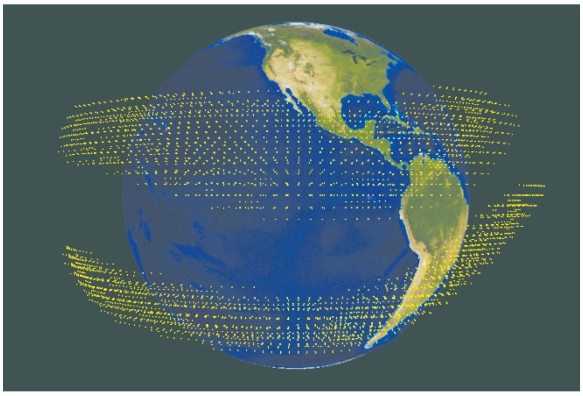
图 1　太阳日冕物质抛射粒子仿真

Fig. 1　Particle simulation of solar coronal mass ejection

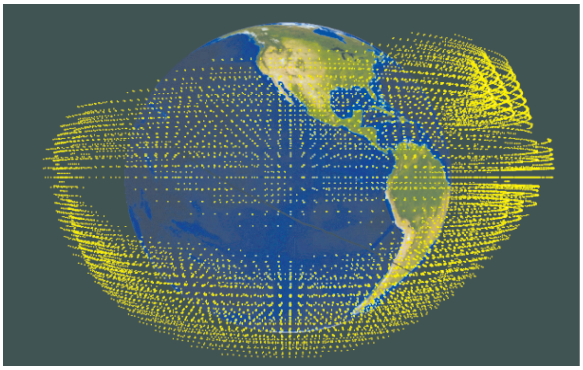
1.2　电离层电子密度异常变化粒子仿真

伴随有朝向地球的全晕日冕物质抛射，预计会引起大的地磁暴和电离层暴，在磁暴开始后，中高纬地区的电离层电子浓度变化速度非常快，一般几小时内就会大量聚集。同时，电离层暴形态随经纬度、季节的变化存在一定的分布规律。通常情况下，负相暴主要发生在高纬地区（中国北纬 35° 以北区域），正相暴主要发生在低纬地区（中国北纬 25° 以南区域），而中纬（中国北纬 25° ~35° 区域）夏季与高纬相似，以负相为主，中纬冬季则多发生正相暴。

绘制电离层电子密度异常变化粒子系统的仿真图，与绘制太阳日冕物质抛射粒子系统仿真图的步骤相似，不同之处在于，对于电离层电子密度粒子系统的粒子消亡，通过设置阈值控制粒子数量，当超过阈值后，便使此时进入网格的粒子消亡，这样从出生到消亡两个方面控制整个电离层流场中粒子的密度，使粒子能比较均匀分布于电离层全流场。绘制得到的电离层电子密度异常变化粒子系统如图 2 所示。图 2a 为电离层平静期电子密度粒子仿真分布，图 2b 为电离层暴发生期电子密度粒子的仿真分布。从图 2 中可知，在相同阈值情况下，电离层暴发生期间电子密度明显增大。



a）平静期



b）发生期

图 2　电离层电子密度异常变化粒子仿真

Fig. 2　Particle simulation of anomalous changes in ionospheric electron density

2　电离层暴对卫星导航定位误差仿真

当发生电离层暴时，电离层电子密度变化幅度较大，致使折射误差变化剧烈。随着人类对航天器定位精度要求的不断提高，电离层折射误差已成为影响卫星导航系统的主要误差来源之一。

2.1　误差模型构建

为准确评估该误差影响，本研究构建如下仿真模型，其构建步骤如下：

1）根据总电子含量 TEC（total electron content）与 F_2 层临界频率 foF_2 的相关性，计算各栅格点 TEC，利用经验公式建立 TEC 与 foF_2 之间的线性关系为

$$N_T=aF+b。$$

式中：N_T 为总电子含量；F 为 F_2 层临界频率；a、b 为经验相关系数，通过实测数据拟合获得。

2）依据国际电信联盟（ITU）推荐标准 P.531，本文采用以下公式计算 500 MHz 信号天顶方向群时延 t 为

$$t = 1.345 \times N_T / f^2 \times 10^{-7},$$

式中：t 为与真空相比的时延；f 为信号传播频率。

3）计算测距误差。根据光速与群时延的关系，推导测距误差 D 为

$$D = c \times t,$$

式中 c 为光速（约 $2.997\,924\,58 \times 10^8$ m/s）。

2.2　误差仿真结果分析

本文在广东省设置测控雷达，雷达初始参数设置如下：位置为经度 116.0° E，纬度 23.0° W，天线高度为 30 m，工作频率为 900 MHz，该雷达对地球轨道（MEO）、地球同步轨道（GEO）两类卫星进行测控，实时仿真计算 2023 年 4 月 24 日 0~23 时电离层暴发生、持续、结束全过程的距离误差变化情况。仿真场景如图 3 所示，图中显示出测控雷达对跟踪卫

星的距离误差的实时评估情况，给出了卫星的编号、仿真时间、卫星所处的经度、纬度、高度等信息以及距离误差的评估结果。

2023 年 4 月 24 日 0~23 时仿真结果如图 4 所示，结果表明测控雷达对“IGSO5”卫星定位误差为 4.28~21.25 m，测控雷达对“M4”卫星定位误差为 4.36~26.18 m，定位误差较大的时间段为 2023 年 4 月 24 日 2~10 时。而 2023 年 4 月 24 日 9 时爆发电离层红色警报，仿真结果与电离层暴事件对卫星导航定位误差影响趋势基本保持一致。

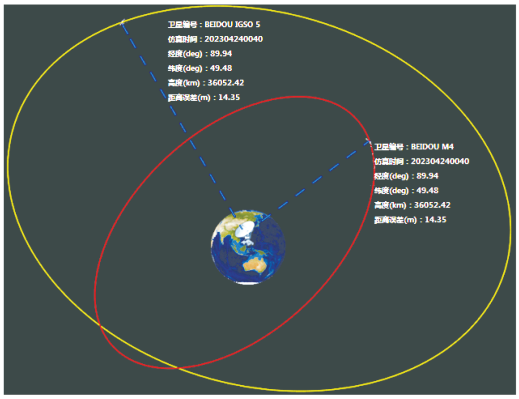


图 3 电离层暴对卫星导航定位误差仿真

Fig. 3 Simulation of ionospheric storm on satellite navigation positioning error

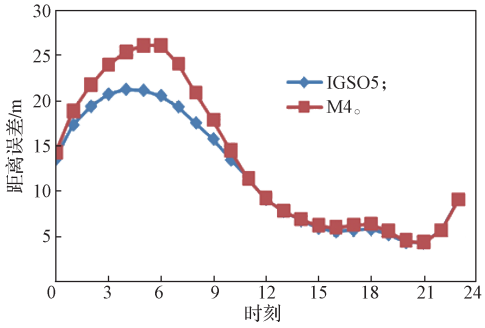


图 4 卫星导航定位误差仿真结果

Fig. 4 Simulation results of satellite navigation positioning error

3 电离层暴对短波通信频率变化仿真

电离层暴期间，F 层的电子密度会发生显著变化，导致短波链路的可用频率发生改变，特别是电离层暴显著期间，短波链路的可用频率明显收窄，通信质量会受严重影响，若所用频率高于此时的最高可用频率（maximum usalde frequency，MUF），则会造成短波通信中断。

3.1 仿真模型构建

仿真模型构建步骤如下：

1）短波链路的 MUF 计算，利用国际电信联盟无线电通信部门 ITU-R 建议采用 P.533 方法，结合短波链路参数计算方法，分别计算电离层平静时（可用月中值或前 5 d 中值代替）和层暴时指定通信距离（如 1 000 km）短波链路 MUF，计算公式为

$$n_0F_2(D)MUF=\left[1+\left(C_d/C_{3000}\right)(B-1)\right]\cdot foF_2+f_H\left(1-d/d_{\max}\right)/2。$$

式中：f_H 为控制点处的电子磁旋频率；C_d、C_{3000} 为与链路传播路径相关的系数；B 为链路传播的相位校正因子；d 为通信距离；$d_{\max}$ 为最大视距传播距离。

其中：

$$C_d=0.74-0.591Z-0.424Z^2-0.090Z^3+0.088Z^4+0.181Z^5+0.096Z^6；$$

$$Z=1-2d/d_{\max}；$$

$$d_{\max}=4\,780+\left((12\,610+2\,140)/x^2-49\,720/x^4+688\,900/x^6\right)\cdot\left(1/B-0.303\right)；$$

$$B=M(3\,000)F_2-0.124+\left[\left[M(3\,000)F_2\right]^2-4\right]\cdot\left[0.021\,5+0.005\sin\left(7.854/x-1.963\,5\right)\right]，$$

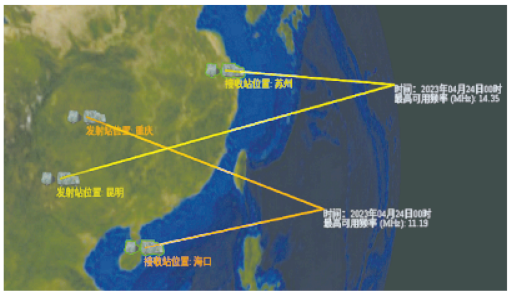
$$x=\frac{M(3\,000)F_2}{foF_2}$$ 或x=2，一般取较大者。

2）对指定短波链路，利用 18 个垂测站的 3 个角度参数插值，获得链路中点的垂测数据，再用 20 个最优常数参数替换 ITU-R P.533 建议中原有的 20 个参数，即可计算获得指定链路的最高可用频率 MUF。

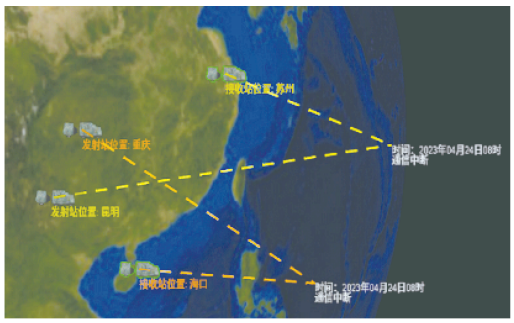
3）利用改进的克里格空间插值算法，获取全国及周边区域的 MUF 区域信息，并获取全国及周边区域未来 1~24 时的 MUF 区域预报产品。

3.2 仿真结果分析

本文设置两组短波通信链路，基本参数设置如下：工作频率为 10 MHz，发射机功率为 1 kW，接收机带宽为 3 000 Hz，信噪比为 6 dB。第一组链路为昆明－苏州（发射站经度：103.8°，发射站纬度：25.5°，接收站经度：120.4° E，接收站纬度：31.3° N），第二组链路为重庆－海口（发射站经度：106.42° E，发射站纬度：29.51°，接收站经度：110.33° E，接收站纬度：20.0° N）。实时仿真计算 2023 年 4 月 24 日 0 ~ 23 时电离层暴发生、持续及结束全过程，分析链路之间的最高可用频率及通信中断情况。仿真场景如图 5 所示，图 5a 为短波通信链路“昆明－苏州”“重庆－海口”在 2023 年 4 月 24 日 0 时的最高可用频率值，图 5b 为受电离层暴影响，短波通信链路“昆明－苏州”“重庆－海口”在 2023 年 4 月 24 日 8 时发生通信中断。短波通信链路仿真结果见表 1。



a）2023 年 4 月 24 日 0 时短波链路通信正常



b）2023 年 4 月 24 日 8 时短波链路通信中断

图 5　电离层暴对短波通信频率变化的场景仿真

Fig. 5　Simulation of frequency changes in shortwave communication caused by ionospheric storms

表 1　短波通信链路仿真结果

Table 1　Simulation results of shortwave communication link

仿真时间	第一组		第二组	
	通信链路	MUF/MHz	通信链路	MUF/MHz
2023-04-24 00:00	重庆－海口	11.19	昆明－苏州	14.35
2023-04-24 01:00		18.63		16.08
2023-04-24 02:00		999.00		17.16
2023-04-24 03:00		999.00		11.75
2023-04-24 04:00		999.00		9.67
2023-04-24 05:00		999.00		14.67
2023-04-24 06:00		999.00		20.08
2023-04-24 07:00		999.00		18.41
2023-04-24 08:00		999.00		999.00
2023-04-24 09:00		15.07		18.32
2023-04-24 10:00		17.35		999.00
2023-04-24 11:00		16.98		18.22
2023-04-24 12:00		17.44		18.02
2023-04-24 13:00		18.82		20.52
2023-04-24 14:00		24.27		23.50
2023-04-24 15:00		20.97		18.62
2023-04-24 16:00		20.52		19.44
2023-04-24 17:00		18.92		18.41
2023-04-24 18:00		13.75		11.56
2023-04-24 19:00		11.13		9.31
2023-04-24 20:00		8.63		9.47
2023-04-24 21:00		7.70		9.58
2023-04-24 22:00		7.96		9.67
2023-04-24 23:00		8.31		9.36

注：数值 999.00 表示通信中断。

表 1 中，MUF 短波通信链路仿真时间为 2023 年 4 月 24 日 0~23 时，其中最高可用频率 MUF 值为 999.00，表示通信中断。从表中可以看出，电离层暴能使电离层最大可用频率（MUF）突然降低，若通信频率高于突变后的 MUF，信号将无法被反射，直接穿透电离层，导致链路中断。第一组链路昆明－苏州在 2023 年 4 月 24 日 8 时和 10 时，出现通信中断，第二组链路重庆－海口在 2023 年 4 月 24 日 2 时至 8 时，出现通信中断。而 2023 年 4 月 24 日 9 时爆发电离层暴红色警报，仿真结果与电离层暴事件对短波通信频率变化影响均能较好地吻合。

4　结语

本文利用三维 GIS、科学计算可视化、虚拟现实等技术，逼真地模拟了电离层暴事件全过程，包括太阳日冕物质抛射、电离层电子密度异常变化等。仿真结果表明：1）太阳日冕物质抛射粒子系统能够模拟高速等离子体到达地球的过程，粒子在 1~3 d 内到达地球并与电离层相互作用；2）电离层电子密度异常变化粒子系统显示，中高纬地区电子浓度变化快，负相暴主要发生在高纬地区，正相暴则主要发生在低纬地区；3）电离层暴发生前后，测控雷达对卫星的定位误差在 4.28~26.18 m 之间，误差较大的时间段为 2~10 时；4）电离层暴会导致短波链路的最大可用频率（MUF）突然降低，若通信频率高于突变后的 MUF，信号将无法被反射，导致链路中断。

参考文献：

[1] 张玉强 . 暴时东亚地区电离层形态预报研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2022.
ZHANG Yuqiang. Study on Ionospheric Morphology Prediction in East Asia during Storm[D]. Xi’an：Xidian University，2022.

[2] 陈　春 . 电离层 F2 层临界频率的短期和暴时预报研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2010.
CHEN Chun. Study on Short-Term and Storm-Time Forecasting the Critical Frequency of the Ionospheric F2 Layer[D]. Xi’an：Xidian University，2010.

[3] 班盼盼，郭立新，赵振维，等 . 基于长短期记忆网络的电离层暴事件预报模型研究 [C]// 第十七届全国电波传播年会会议论文集 . 延安：[s. n.]，2022：630-633.
BAN Panpan，GUO Lixin，ZHAO Zhenwei，et al. The Study of Ionospheric Storm Forecasting Model Based on Deep Learning Method[C]//Proceedings of the 17th National Radio Wave Propagation Annual Conference.

Yan'an：[s. n.]，2022：630−633.

[4] 吴佳姝，徐 良 . 欧洲扇区不同纬度电离层暴特征的统计分析 [J]. 地球物理学报，2015，58(2)：349−361.
WU Jiashu，XU Liang. Statistical Study of the Ionospheric Storms over 5 Latitude Zones in the European Sector[J]. Chinese Journal of Geophysics，2015，58(2)：349−361.

[5] 孔德金，陈立云，王 帅，等 . 基于 HLA 的防空作战侦察雷达仿真系统建模研究 [J]. 计算机仿真，2011，28(4)：22−25，77.
KONG Dejin，CHEN Liyun，WANG Shuai，et al. Research on Modeling Spying Radar Simulation System of Anti-Aircraft Campaign Based on HLA[J]. Computer Simulation，2011，28(4)：22−25，77.

[6] 曹永辉，李 侠，蔡万勇，等 . 基于 HLA 的雷达探测能力仿真系统设计 [J]. 微计算机信息，2010，26(1)：146−148.
CAO Yonghui，LI Xia，CAI Wanyong，et al. The Design of the Detectability of Ground-Based-Air-Surveillance Intelligence Radars Simulation System Based on HLA[J]. Control & Automation，2010，26(1)：146−148.

[7] 张本润，曹卫群 . 虚拟环境中面向灭火指挥的火场信息可视分析 [J]. 系统仿真学报，2024，36(4)：1001−1016.
ZHANG Benrun，CAO Weiqun. Study on Forest Fire Visual Analysis Method for Extinguishing Command in Virtual Environment[J]. Journal of System Simulation，2024，36(4)：1001−1016.

[8] 丁柏圆，穆富岭，李云鹏，等 . 面向复杂电磁环境的体系作战仿真平台设计 [J]. 系统仿真学报，2023，35(2)：330−338.
DING Baiyuan，MU Fuling，LI Yunpeng，et al. Design of System Combat Simulation Platform for Complex Electromagnetic Environment[J]. Journal of System Simulation，2023，35(2)：330−338.

[9] 韩 勇，黄家琛，马纯永，等 . 虚拟海洋环境仿真关键技术与应用研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版)，2023，53(7)：111−117.
HAN Yong，HUANG Jiachen，MA Chunyong，et al. Research on Key Technologies and Implementation on Virtual Marine Environment Simulation[J]. Periodical of Ocean University of China，2023，53(7)：111−117.

[10] 党宏杰，余文广，杨华晖 . 基于数字孪生与平行试验的装备体系试验鉴定数字化应用 [J]. 系统仿真学报，2024，36(7)：1729−1736.
DANG Hongjie，YU Wenguang，YANG Huahui. Digital Application of Equipment System Test and Evaluation Based on Digital Twin and Parallel Experiment Theory[J]. Journal of System Simulation，2024，36(7)：1729−1736.

[11] 吴忠得，罗晓芳，侯增选，等 . 基于三维地球场景的干扰条件雷达探测范围可视化方法 [J]. 计算机与现代化，2020(10)：90−96，102.
WU Zhongde，LUO Xiaofang，HOU Zengxuan，et al. Visualization of Radar Detection Range Based on 3D Earth Scene Under Interference Condition[J]. Computer and Modernization，2020(10)：90−96，102.

[12] 李泓余，韩 路，李 婕，等 . 电磁空间态势研究现状综述 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报，2021，19(4)：549−555，595.
LI Hongyu，HAN Lu，LI Jie，et al. A Summary of the Present Situation of Electromagnetic Space Situation Research[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology，2021，19(4)：549−555，595.

[13] 冯玉康，空间科学实验仿真关键技术研究与实现 [D]. 青岛：中国海洋大学，2012.
FENG Yukan，Research and Implementation on Key Technologies of Space Science Experiments Simulation [D]. Qingdao：China University of Geosciences，2012.

[14] 马孟暄，沈 芳，刘佑生 . 日冕物质抛射传播过程模拟研究 [J]. 地球与行星物理论评，2022，53(4)：397−415.
MA Mengxuan，SHEN Fang，LIU Yousheng. Simulation Study on the Propagation Process of Coronal Mass Ejection[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics，2022，53(4)：397−415.

[15] 陈 琦，肖智海，熊 俊 . 数字孪生技术下虚拟工程训练车间建模仿真 [J]. 计算机仿真，2023，40(7)：262−266.
CHEN Qi，XIAO Zhihai，XIONG Jun. Modeling and Simulation of Virtual Engineering Training Workshop Under Digital Twin Technology[J]. Computer Simulation，2023，40(7)：262−266.

[16] 乔 玥，单红仙，王宏威，等 . 基于数字孪生的海底悬浮物时空变化可视化技术实现与应用 [J]. 海洋学报，2023，45(8)：166−177.
QIAO Yue，SHAN Hongxian，WANG Hongwei，et al. Implementation and Application of Digital Twin-Based Visualization Technology for Spatial and Temporal Variation of Seafloor Suspensions[J]. Haiyang Xuebao，2023，45(8)：166−177.

(责任编辑：姜利民)