Journal of System Simulation

Volume 32 | Issue 4

Article 9

4-16-2020

Design of Space-Based Surveillance Distributed Simulation System for Space Targets

Zhang Yang

1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China.;2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

Qingbo Gan 1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China.;

Yuan Hong 1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China.;

Jiangliang Fu 1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China.;2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

See next page for additional authors

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.

Design of Space-Based Surveillance Distributed Simulation System for Space Targets

Abstract

Abstract: Following the wide application of the HLA in the aerospace system simulation, the space-based surveillance distributed simulation system for the space targets based on the HLA is designed. In the infrastructure design level, *the hierarchical structure including data layer, model layer and mission layer are designed.* In the system design level, *the simulation control members, space-based surveillance member, space target member, optical payload member, and visual simulation member are divided and confirmed.* The orbit dynamics and maneuvering model, attitude dynamics and control model, payload pointing and optical imaging model are established. In system implement level, the distributed system is integrated based on the RTI. The space-based surveillance visual simulation and optical imaging simulation are realized by using the Vega Prime and OpenGL. The space-based surveillance for the space targets is simulated and verified finally.

Keywords

space targets, space-based surveillance, HLA, visual simulation, RTI

Authors

Zhang Yang, Qingbo Gan, Yuan Hong, Jiangliang Fu, and Chengming Sun

Recommended Citation

Zhang Yang, Gan Qingbo, Yuan Hong, Fu Jiangliang, Sun Chengming. Design of Space-Based Surveillance Distributed Simulation System for Space Targets[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 620-626.

第 32 卷第 4 期 2020 年 4 月

空间目标天基监视分布式仿真系统设计

张扬^{1,2}, 甘庆波¹, 袁洪¹, 傅江良^{1,2}, 孙成明¹ (1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:以 HLA 在航天系统仿真领域的广泛应用为背景,设计了基于 HLA 的空间目标天基监视分布 式仿真系统。在系统架构层面, *设计数据层、模型层、任务层的分层结构*。在系统设计方面, *设计 仿真控制成员、天基监视成员、光学载荷成员、空间目标成员和视景仿真成员*, 建立天基监视系统 中的轨道动力学及机动模型、姿态动力学与控制模型、载荷指向及目标成像模型。在系统实现方面, 基于 RTI 进行系统集成。应用 Vega Prime 和 OpenGL 实现天基监视视景仿真和光学成像仿真, 完 成空间目标天基监视任务的仿真验证。

关键词:空间目标;天基监视;HLA;视景仿真;RTI
中图分类号:TP391 文献标识码:A 文章编号:1004-731X (2020) 04-0620-07
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0467

Design of Space-Based Surveillance Distributed Simulation System for Space Targets

Zhang Yang^{1,2}, Gan Qingbo¹, Yuan Hong¹, Fu Jiangliang^{1,2}, Sun Chengming¹

Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China.
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Following the wide application of the HLA in the aerospace system simulation, the space-based surveillance distributed simulation system for the space targets based on the HLA is designed. In the infrastructure design level, *the hierarchical structure including data layer, model layer and mission layer are designed*. In the system design level, *the simulation control members, space-based surveillance member, space target member, optical payload member, and visual simulation member are divided and confirmed*. The orbit dynamics and maneuvering model, attitude dynamics and control model, payload pointing and optical imaging model are established. In system implement level, the distributed system is integrated based on the RTI. The space-based surveillance visual simulation and optical imaging simulation are realized by using the Vega Prime and OpenGL. The space-based surveillance for the space targets is simulated and verified finally.

Keywords: space targets; space-based surveillance; HLA; visual simulation; RTI

引言

随着航天技术的发展,航天系统任务复杂度越



收稿日期:2018-07-07 修回日期:2018-10-08; 基金项目:国家自然科学基金(11303029),中国科学 院光电研究院创新项目(Y70B14A18Y); 作者简介:张扬(1986-),河北,博士生,工程师, 研究方向为系统仿真;甘庆波(1983-),江西,博 士,副研究员,研究方向为天体力学。 来越高,对航天仿真技术的通用性、扩展性和实时 性的要求也越来越高。相比于单机仿真技术,分布 式仿真系统具有通用性强、重复性好、仿真计算分 散化等特点,已经成为复杂航天任务仿真的首选体 系之一。

分布式仿真技术发展经历了 SMINET, DIS, ALSP 和 HLA 几个时期。HLA 是综合了 DIS 和

ALSP 成果的新一代分布交互仿真体系结构^[1]。 HLA 提供独立的支持服务框架,将系统应用层和 底层支撑环境分离,具备多种时间管理机制,能够 满足多类型仿真任务需求,在保证仿真应用互操作 性和建模与仿真资源可重用性的前提下,最大化的 支持仿真系统的扩展^[4],已经广泛应用在航天系统 仿真领域。

本文面向空间目标天基监视过程的具体任务, 进行分布式仿真系统设计和研制。在系统分层架构 设计的基础上,划分系统功能成员、明确成员间的 接口关系,阐述了空间目标天基监视仿真中应用的 主要数学模型,具体包括轨道动力学及机动模型、 姿态动力学与控制模型、载荷指向及目标成像模 型。基于 HLA 构建空间目标天基监视分布式仿真 系统,应用 Vega Prime 和 OpenGL 完成天基监视 视景仿真和光学成像仿真,最后应用整个仿真系统 进行高轨空间目标天基监视任务的仿真验证。

1 系统体系设计

为了提高系统的通用性和后续航天任务的扩展和延拓,空间目标天基监视系统采用自下而上、 分层设计的体系设计方法,提高设计独立性,弱化 耦合性^[2]。空间目标天基监视系统划分为3层结构: 数据层、模型层和任务层。如图1所示。

数据层是任务仿真的数据支撑,包含系统运行 所需的各类数据库。其中知识数据库包括系统运行 的各类模型或参数数据,该类数据为已知知识,数 据为固定参数,通用性强,如地球引力场数据、地 球自转参数、行星位置参数、大气模型数据、恒星 星表数据、常数参数等。配置数据库包括系统运行 的各类配置数据,与具体任务相关,包括任务配置 数据、卫星结构参数、卫星初始状态信息、载荷安 装位置和成像参数等。可视化素材库包括支撑任务 可视化演示的地球、月球和太阳三维模型、卫星三 维模型数据、纹理贴图数据和任务可视化过程音频 数据等。仿真存储数据库负责任务仿真结果数据的 存储。



图 1 系统体系结构 Fig. 1 System architecture

第 32 卷第 4 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 4
2020年4月	Journal of System Simulation	Apr., 2020

模型层提供任务仿真所需的仿真模型。按照具体功能包括动力学模型、载荷模型、控制模型、部件模型等。其中动力学模型包括轨道和姿态动力学,载荷模型包括载荷转台模型、载荷成像模型,控制模型包括轨道机动模型、姿态控制模型和转台控制模型等,部件模型包括传感器模型、发动机、推力器等执行机构模型,计算模型主要包括仿真应用的数值积分方法、插值计算方法等。

任务层面向具体任务,对于空间目标天基监视 系统任务而言,任务层划分为仿真控制成员、天基 监视成员、光学载荷成员、空间目标成员、视景仿 真成员。

(1) 仿真控制成员

仿真控制成员负责整个仿真系统的任务管理、 运行控制和时间管理等功能。包括仿真系统的任务 设定,任务参数配置,仿真过程控制、仿真步长控 制、仿真时间管理、成员状态监测等。

(2) 天基监视成员

天基监视成员完成对天基监视卫星平台的运动仿真模拟。包括轨道姿态动力学仿真、轨道机动、 姿态控制、传感器仿真、执行器仿真等。基于设定 的轨道机动策略和姿态控制模式,进行平台轨道、 姿态动力学数值计算,输出天基监视成员的轨道和 姿态信息。

(3) 光学载荷成员

光学载荷成员完成对载荷可视区域的成像模 拟。包括可见性分析和成像仿真。综合卫星轨道、 姿态、载荷安装位置和转台指向信息,实时计算载 荷光轴位置矢量,结合载荷视场分析恒星和空间目 标的可见性并进行目标在视场内的位置计算,最后 应用 OpenGL 进行载荷成像结果渲染。

(4) 空间目标成员

空间目标成员完成空间目标的运动仿真模拟。 包括轨道姿态动力学仿真、轨道机动、姿态控制等。 基于设定的轨道机动策略和姿态控制模式,进行平 台轨道、姿态动力学数值计算,输出空间目标轨道 和姿态信息。 (5) 视景仿真成员

视景仿真成员负责空间目标天基监视过程的 可视化呈现,应用 Vega Prime 实现。主要包括地 球仿真、星空背景模拟、卫星状态模拟、载荷状态 模拟、视角自主控制、过程回放等功能。地球仿真 包括地球模型渲染和地球自转运动仿真,星空背景 模拟完成对空间运行环境中的恒星渲染,卫星状态 模拟包括天基监视平台和空间目标的轨道姿态视 景仿真和卫星轨道实时绘制和保持,载荷状态模拟 包括载荷转台运动模拟和载荷成像效果渲染,视角 自主控制基于空间目标、天基平台位置和载荷指 向,自主计算最佳视角位置并完成视角切换。

2 空间目标天基监视数学建模

空间目标天基监视分布式仿真系统构建过程 中,重点研究了天基监视平台和空间目标的轨道动 力学及机动模型、姿态动力学与控制模型、天基监 视平台载荷指向及目标成像模型等。其中监视平台 和目标轨道采用受摄二体模型描述,针对不同轨道 下的监视平台和目标,考虑的摄动项有所区别。监 视平台和目标姿态模型包括姿态动力学和姿态运 动学两部分^[5], 姿态动力学主要考虑刚体动力学模 型,运动学采用采用星体系相对于轨道系的姿态四 元素描述。轨道机动模型采用 Lambert 双脉冲转移 轨道设计[8]。姿态控制模型控制基于四元素误差向 量进行 PD 控制律的设计。载荷指向控制基于目标 在载荷成像坐标系中的高低角和方位角控制实现。 目标成像建模包括可见性分析和位置计算两部分, 可见性分析主要计算目标是否在载荷成像视场范 围内,其中目标包括空间目标和恒星目标。在可见 性分析的基础上,根据可见目标在载荷成像坐标系 下的位置,计算目标在相平面的位置。

3 仿真系统部署

天基监视分布式仿真系统物理架构如图 2(b) 所示。系统包括仿真控制联邦成员、天基监视平台 联邦成员、光学载荷联邦成员、空间目标联邦成员 和视景仿真联邦成员,各联邦成员与体系设计中各 成员和空间目标天基监视数学建模具体内容相对 应,分别运行在单独的计算机中,其中视景仿真联 邦成员外接投影显示系统进行全过程可视化。整个 系统连接在同一局域网内,应用运行支撑环境 (RTI)集成,底层通过网络通信。



(b) 系统流程图



空间目标天基监视系统仿真系统流程如图 2 (b)所示。仿真控制成员控制系统联邦的创建和仿 真运行。开始仿真后,在每一个仿真步长内,天基 监视平台和空间目标成员分别进行平台和目标的 动力学更新,并将轨道、姿态数据分别传递给光学 载荷成员和视景仿真成员进行成像模拟和视景更 新,光学载荷成员接收到平台和目标信息后进行载 荷指向控制和目标成像模拟,同时将指向控制数据 传递给视景仿真成员进行视景更新。整个仿真过程 采用受控时间管理方式,保证仿真系统时间同步。

4 仿真示例

4.1 仿真设置

以高轨失控卫星为观测目标,进行天基监视系 统仿真。目标轨道模型中考虑地球非球形引力、日 月引力、太阳光压摄动,监视平台初始轨道为大椭 圆轨道,考虑地球非球形引力、日月引力、太阳光 压摄动,大气阻力摄动,采用 RK7(8)进行轨道外 推计算。平台姿态控制模式设定为三轴对地定向, 载荷安装位置与平台本体系三轴重合,目标姿态控 制模式设定为无控模式,姿态更新应用吉尔法计 算。载荷光轴初始指向为载荷成像坐标系 z 轴方 向。初始参数设置见表 1~4,各表中涉及的角度单 位统一为度和度/秒。天基监视系统仿真步长设定 为 60 s。

表1 监视平台与目标初始轨道参数

Tal	b. 1 Init	ial orbit p	aramete	ers of platf	form and	target
参数	a(km)	e	i	ω	RAAN	М
平台	37246	0.1292	5.25	0.067	320.63	190.1
目标	42159	0.0004	5.29	314.78	320.58	295.28
	- 201	11 0 00	10.10		ルーズ	10000

初始历元: 2013-11-2-20-18-19.36,参考坐标系: J2000。

表 2 监视平台脉冲变轨参数 Tab 2 Pulse of platform

	1a0. 2 1	uise of platform	
时间(s)	$\Delta \text{Vec}_X(\text{m/s})$	$\Delta \text{Vec}_Y(\text{m/s})$	$\Delta \text{Vec}_Z(\text{m/s})$
0.0	0.253	-0.178	0.000 07
50400	-0.332	-0.227	-0.036

表 3	监视平台与目标初始姿态参数

Tab. 3	Initia	l attitud	e parame	ters of pl	atform ar	d target
参数	phi	thet	persi	dphi	dthet	dpersi
平台	22	11	2	0.1	0.2	0.1
目标	1	0	1	0.05	0.1	0

表 4 监视平台光学载荷参数

参数 观测星等 分辨率 视场 焦距		Tab. 4 Optic	cal parameters of	of platform	
	参数	数 观测星等	分辨率	视场	焦距
平台 13 1024*1024 2 6000	平台	台 13	1024*1024	2	600m

第 32 卷第 4 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 4
2020年4月	Journal of System Simulation	Apr., 2020

4.2 仿真结果分析

天基监视平台和空间目标在 J2000 系下 xoy 平面内的轨道变化曲线和相对距离变化曲线如图 3 所示,其中图 3(a)红色为目标轨道变化曲线,蓝 色为天基监视平台轨道变化曲线。图 3(b)为监视 平台与目标相对距离变化曲线。由图 3 可知,监 视平台在经过脉冲变轨后,逐渐接近目标卫星, 其相对距离逐渐减小,最终达到监视平台对目标 成像的条件。



文中姿态定义为本体坐标系相对于轨道坐标 系的姿态角。目标姿态为无控模式,其姿态变化在 俯仰轴方向呈幅值为±180°的周期运动,滚动轴和 偏航轴方向为小幅值类周期运动,如图4所示。监视平台为三轴对地定向模式,经过短时间的初始姿态控制后平台本体相对于轨道坐标系三轴姿态角变为零,如图5所示。



仿真过程中,目标在载荷成像系下的高低角和 方位角变化曲线如图 6 所示,高低角在整个仿真过 程中变化较小,与目标、监测平台近似同轨道面, 载荷安装位置与平台本体三轴重合的仿真设置保 持一致。方位角在平台进行第 1 次脉冲变轨后变化 相对较大,在平台第 2 次脉冲变轨后,方位角快速 减小,之后进入一个缓慢变化的阶段。整个过程变 化与平台、目标相对运动保持一致。

目标载荷成像仿真结果如图 7 所示。图 7(a) 为目标进入视场并且未进行载荷指向控制时的成 像结果,图 7(b)为指向控制后的成像结果。仿真结 果表明,光学载荷成员在指向控制过程中,目标成 像位置始终保持在视场中心。 第32卷第4期 2020年4月



图 6 目标在载荷成像坐标系下高低角和方位角变化曲线 Fig. 6 Curve of elevation angle and azimuth angle of target in imaging coordinate system



图 7 载荷成像仿真结果 Fig. 7 Results of imaging simulation

视景仿真联邦成员完成从天基监视平台入轨 到载荷对目标监视的全过程可视化仿真,结果如图 8 所示。(a)为入轨后监视平台帆板展开和平台姿 态调整过程的可视化显示,帆板展开通过设置模型 的 DOF 节点,在仿真运行中程序控制实现;(b)为 从天顶方向观察系统运行过程,可视化显示结果与 图 3 得出的平台和目标在地惯系 xoy 平面的轨道变 化曲线保持一致;(c)为监视平台载荷工作的可视 化显示;(d)给出了基于监视平台和目标相对距离 变化下的动态视角;(e)给出了天基监视过程中目 标在载荷视场成像变化。



(a) 监视平台入轨帆板展开 (b) 天顶视角下系统可视化



(c) 监视平台载荷工作可视化 (d) 载荷成像相对视角可视化





5 结论

空间目标天基监视系统是一项复杂的航天任 务,基于 HLA 设计系统联邦成员,构建分布式仿 真系统,将整个过程的模型计算分散在各联邦成员 内,避免了单一节点的超负荷,有效提高了系统仿 真的实时性和效率,采用应用层、模型层和数据层 的分层体系,提高了仿真系统的通用性和扩展性。 应用设计的仿真系统仿真面向高轨失控卫星的天 基监视任务过程。结果表明,系统能够高置信度的 完成设定的天基监视任务,各成员仿真结果正确有 效,同步性好。

参考文献:

- 郭晓峰. 基于 SOA 和 HLA 的分布式仿真关键技术研 究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2011: 2-20.
 Guo Xiaofeng. Research on Key Technologies of Distributed Simulation Based on SOA and HLA[D].
 Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2011: 2-20.
- [2] 张利强,郑昌文,胡晓惠,等.一种基于 HLA 的卫星 仿真系统的设计与实现[J].系统仿真学报,2009, 21(20):6487-6491,6497.

Zhang Liqiang, Zheng Changwen, Hu Xiaohui, et al. Design and Implement of Satellite Simulation System

Yang et al.: Design of Space-Based Surveillance Distributed Simulation System

第 32 卷第 4 期	系统仿真学报	Vol. 32 No. 4
2020年4月	Journal of System Simulation	Apr., 2020

Based on High Level Architecture[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6487-6491, 6497.

[3] 丁久辉, 郭百巍. 基于 HLA 的卫星指向控制仿真系统 的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1747-1749.

Ding Jiuhui, Guo Baiwei. Design and Implementation of HLA-based Satellite Pointing Control Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1747-1749.

[4] 周彦, 戴剑伟. HLA 仿真程序设计[M]. 北京: 电子工 业出版社, 2002: 35-73.

Zhou Yan, Dai Jianwei. HLA simulation program design [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2002: 35-73.

- [5] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京 航空航天大学出版社, 1998: 95-132.
 Zhang Renwei. Satellite orbit attitude dynamics and control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1998: 95-132.
- [6] Möller B, Dahlin C, Karlsson M. Developing Web Centric. Federates and Federations using the HLA Evolved Web Services API[C]. Proceedings of 2007 Spring Simulation Interoperability Workshop, 2007.
- [7] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 一种基于云计算理念的
 网络化建模与仿真平台—"云仿真"[J]. 系统仿真学报,
 2009, 21(17): 5292-5299.

Li Bohu, Chai Xudong, Hou Baocun, et al. Networked Modeling & Simulation Platform Based on Concept of Cloud Computing—Cloud Simulation Platform[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(17): 5292-5299.

- [8] Bate R R. 航天动力学基础[M]. 吴鹤鸣, 李肇杰译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
 Bate R R. Fundamentals of aerospace dynamics[M].
 Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990.
- [9] 王长波, 王章野, 缪永伟, 等. 卫星与深空动态场景实时仿真系统[J]. 宇航学报, 2005, 26(增 1): 135-140.
 Wang Changbo, Wang Zhangye, Miao Yong-wei, et al. Real-time Simulation System of Satellite and Outer Space Scene[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(S1): 135-140.

[10] 许兴星. 空间目标星载可见光相机成像仿真[D]. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所). 2017: 43-75.

Xu Xingxing. Space Target Spaceborne Visible Light Camera Imaging Simulation[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, University of Chinese Academy, 2017: 43-75.

- [11] 董楸煌, 陈力. 空间机械臂捕获目标过程的自适应控制仿真[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2969-2973.
 Dong Qiuhuang, Chen Li. Adaptive Control Simulation of Space Manipulator Capturing Target[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2969-2973.
- [12] 周平,苏银科,沈超. 基于 DDS 的分布式数字仿真系统设计与实现[J]. 系统仿真学报,2014,26(8): 1678-1683.

Zhou Ping, Su Yinke, Shen Chao. Design and Implementation of Distributed Simulation System Based on DDS[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(8): 1678-1683.

[13] 孙福煜, 王华, 周晚萌. 载人交会对接任务分布式仿 真集成管理平台研究[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(10): 2330-2334.

Sun Fuyu, Wang Hua, Zhou Wanmeng. Analysis of Distributed System Simulation Platform for Rendezvous and Docking Mission of Manned Space Flight[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(10): 2330-2334.

[14] 马忠彧,马宏锋,彭美平.基于 HLA 的多平台分布式 仿真系统设计与实现[J]. 兰州工业学院学报,2016, 23(4): 52-56.

Ma Zhongyu, Ma Hongfeng, Peng Meiping. Design and Implementation of Multi-platform Distributed Simulation System Based on HLA[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2016, 23(4): 52-56.

[15] 尹丽丽, 寇力, 范文慧. 基于多 Agent 的装备保障体系 分布式建模与仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3185-3192.

Yin Lili, Kou Li, Fan Wenhui. Distributed Modeling and Simulation Method of Equipment Support System Based on Multi Agent[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3185-3192.