

6-2-2020

Research of Modeling of Spatial Information Support SoS Based on Complex Network Theory

Qingjun Zhang

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;

Mingzhi Zhang

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;;

Qingjuan Zhang

2. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China;

Wu Xi

1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, 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.

Research of Modeling of Spatial Information Support SoS Based on Complex Network Theory

Abstract

Abstract: Spatial information support system as the main body of space operations, in the future network of joint operations, plays a central role. Based on the characteristics of spatial information support system, *a modeling method combining multi-agent, multi-resolution and complex network was proposed, and the spatial information support system model framework was constructed. Multi-agent model, multi-resolution model and complex network model were established, and the connectivity rate in the complex network model was simulated and analyzed*, so as to lay the foundation for further research on the modeling of spatial information support system.

Keywords

multi-agent, multi-resolution, complex network, spatial information support SoS, modeling

Recommended Citation

Zhang Qingjun, Zhang Mingzhi, Zhang Qingjuan, Wu Xi. Research of Modeling of Spatial Information Support SoS Based on Complex Network Theory[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(9): 1907-1914.

基于复杂网络理论空间信息支援体系建模研究

张庆军¹, 张明智¹, 张庆娟², 吴曦¹

(1. 国防大学信息作战与指挥训练教研部, 北京 100091; 2. 北京市遥感信息研究所, 北京 100192)

摘要: 空间信息支援体系作为空间作战的主体, 在未来网络化联合作战中, 起着核心的作用。立足空间信息支援体系特点, 提出将多 Agent、多分辨率和复杂网络相结合的一种建模方法, 构建了空间信息支援体系模型框架, 建立了多 Agent 模型、多分辨率模型和复杂网络模型, 并对复杂网络模型中的连通率进行了仿真分析, 以期对空间信息支援体系建模的再进一步研究奠定基础。

关键词: 多 Agent; 多分辨率; 复杂网络; 空间信息支援体系; 建模

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 09-1907-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201709005

Research of Modeling of Spatial Information Support SoS Based on Complex Network Theory

Zhang Qingjun¹, Zhang Mingzhi¹, Zhang Qingjuan², Wu Xi¹

(1. Department of Information Operation & Command Training, National Defense University, Beijing 100091, China;
2. Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100192, China)

Abstract: Spatial information support system as the main body of space operations, in the future network of joint operations, plays a central role. Based on the characteristics of spatial information support system, a modeling method combining multi-agent, multi-resolution and complex network was proposed, and the spatial information support system model framework was constructed. Multi-agent model, multi-resolution model and complex network model were established, and the connectivity rate in the complex network model was simulated and analyzed, so as to lay the foundation for further research on the modeling of spatial information support system.

Keywords: multi-agent; multi-resolution; complex network; spatial information support SoS; modeling

引言

随着太空商业化和军事化的迅猛发展, 太空成为继陆、海、空之后又一新的领域, 是当今维护国家政治、经济、军事利益所必需关注的新的战略“制高点”, 也是国家安全的“高边疆”^[1]。作为世界头号军事强国的美国, 太空作战逐步向以空间信息支

援为主的慑战一体化方向发展。针对太空域这一新型作战空间, 用来描述机械化战争的传统建模方法无法体现信息网络和体系对抗特征^[2], 不能有效的反映基于信息系统的体系作战的“多网联动”和“多域较链”的特性^[3], 无法体现体系作战的整体性和复杂性, 迫切需要突破新的建模理论和方法。

本文立足空间信息支援体系的自适应性、多层次性和级联性等特点, 提出将多 Agent、多分辨率和复杂网络相结合的一种建模方法, 这也是开展基于网络信息体系作战机理研究的基础, 是加快提升空间作战能力的重要途径。



收稿日期: 2017-05-10 修回日期: 2017-07-10;
基金项目: 国家自然科学基金(61174156, 61273189,
61174035, 61374179, 61403400);

作者简介: 张庆军(1979-), 男, 山东单县, 博士生, 工程师, 研究方向为军事系统分析与建模; 张明智(1962-), 男, 陕西凤翔, 博士后, 博导, 研究方向为战争模拟等。

1 相关概念研究

1.1 多 Agent 建模

Agent 的概念最早可追溯到 1977 年 Carl Hewitt 的“Viewing Control Structures as Patterns of Passing Messages”一文,文中 Carl Hewitt 定义了具有自兼容性、交互性和并发处理机制的对象,称为“Actor”。基于 Agent 的建模与仿真方法(Agent Based Modeling and Simulation, ABMS),就是用 Agent 的思想对作战体系中的诸多实体建立相应模型,并通过模型对 Agent 个体及其相互之间的行为进行描述,来刻画作战体系的整体涌现行为。空间信息支援体系是一个由诸多要素共同组成的复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)^[4-5],具有开放性、动态性、自组织性、自管理和适应性、非中心分布性等特性。按照 ABMS 方法, CAS 可抽象为多 Agent 系统(Multi-Agent System, MAS),即由多个 Agent 组成的系统。

1.2 多分辨率建模

多分辨率建模(Multi Resolution Modeling, MRM),最初称为可变分辨率(Variable Resolution)建模,就是针对所要研究的问题,在不同分辨率尺度上建立的多种分辨率模型,满足在多个层次和层面上认知事物和推理的需要。起源于 20 世纪 80 年代中期,最初由美国 RAND 公司的 Paul K. Davis 根据军事应用需求提出并在兰德战略评估系统(RAND Strategy Assessment System, RSAS)应用^[6-7]。文献[8]针对多分辨率建模的理论 with 关键技术进行了详细的研究,文献[9]采用基于 EBI 框架的战争模拟多分辨率的方法进行建模,文献[10]提出了基于 BOM(Base Object Model)和 FEDEP(Federation Development and Execution Process)的多分辨率建模框架。

1.3 复杂网络建模

复杂网络,是对复杂系统的抽象和描述方式,是研究复杂系统的一种角度和方法,更关注系统中

个体相互关联作用的拓扑结构,是具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络^[11-13]。以兰彻斯特方程为代表的传统作战模型从整体的、平均域的角度来描述作战过程,基本没有或很少考虑作战体系构成单元之间的关系和交互,缺乏对信息化战场上感知、信息交互、指挥控制、协同等因素的描述,无法描述一体化、网络化的作战体系。现代的信息化战争是一种充满着对抗性的活动,用复杂网络理论研究作战行动、战争规律,符合战争系统的特点。文献[14]从复杂网络的角度出发研究作战体系的网络拓扑模型,建立作战体系网络的拓扑模型,分析了模型度分布特征,提出了描述作战体系的统计特征量;文献[15]针对信息时代作战特点,提出一种基于复杂网络的作战描述模型,将作战单元抽象成节点,把各单元之间的相互作用抽象成有向边,将战场描述成一个由传感器、决策器、影响器、目标四类节点组成的有向网络图,定义了网络模型的特征参数,并将作战环看成反映作战能力的指标,区别分析了标准作战环和广义作战环。

2 基于多 Agent 多分辨率和复杂网络的空间信息支援体系模型框架

空间信息支援体系是典型的基于网络信息体系的复杂系统,通过多 Agent 建模将所有装备及环境抽象为一个相对独立的对象实体,定义其属性、结构和行为等,符合作战仿真模型逼真、完善和实用的要求。在联合作战背景下,采用单一的统一分辨率模型无法描述和揭示复杂网络体系中的空间信息支援体系的对抗性等特征,通过多分辨率建模,针对同一系统的不同层次或过程的不同阶段进行建模,可有效解决模拟过程的复杂性,模拟对象的层次性,研究问题的角度性和资源有限性等矛盾。通过复杂网络建模,可以弥补多 Agent 建模在对个体之间的信息网络及其网络行为、个体间基于网络交互描述存在的缺陷。空间信息支援体系模型框架如图 1 所示。

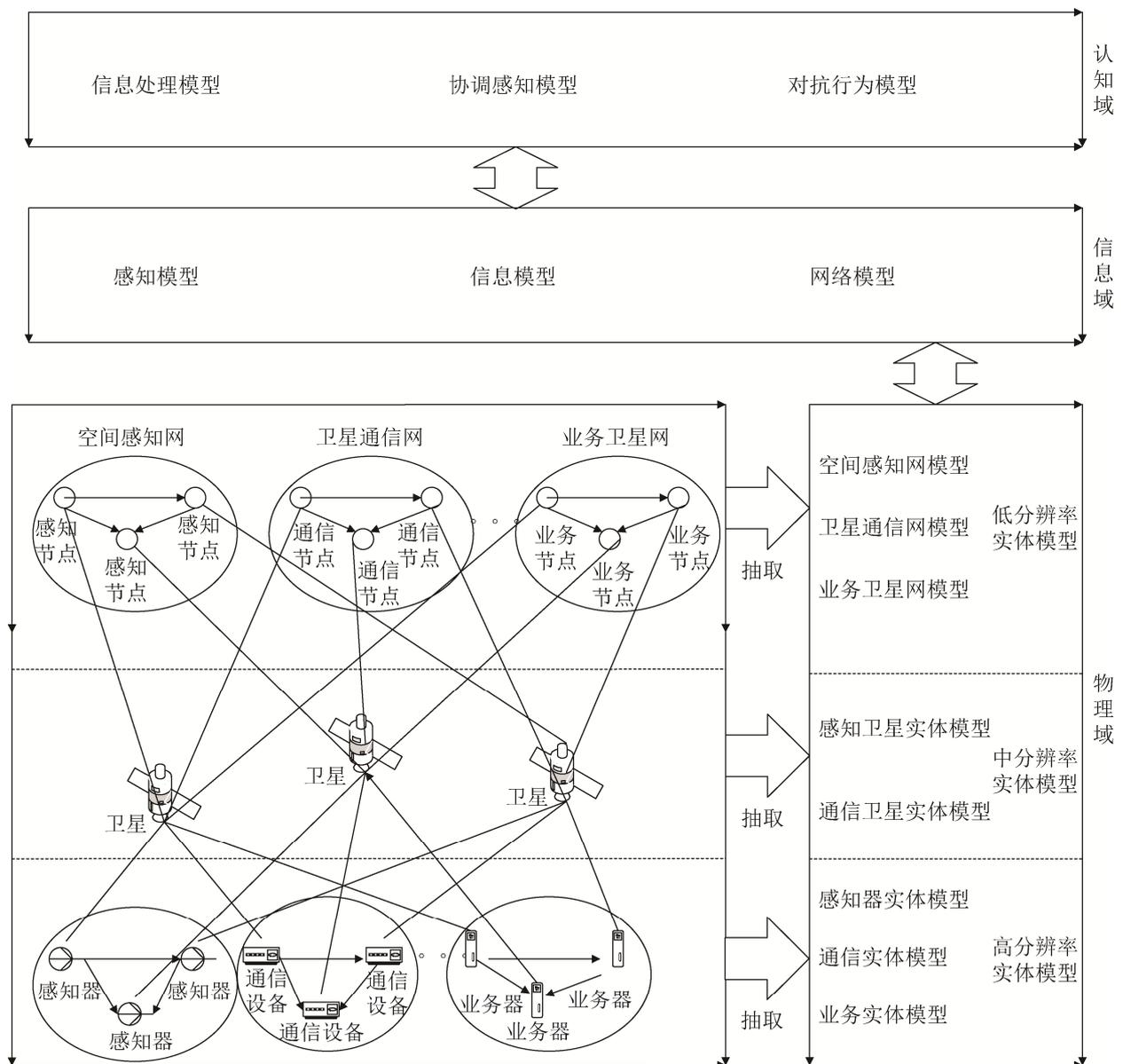


图 1 空间信息支援体系模型框架
Fig. 1 Spatial information support system model framework

体系模型根据分辨率可分为低分辨率模型、中分辨率和高分辨率模型, 高分辨率模型包括感知器模型、通信设备模型和业务器模型等; 中分辨率模型包括感知卫星模型、通信卫星模型、定位导航卫星模型和地面接收站模型等; 低分辨率模型包括空间感知网模型、卫星通信网模型和业务卫星网模型等。基于作战空间的抽象性和空间的可嵌套性, 可将作战空间抽象分为物理域、信息域和认知域, 物理域包括传感器实体模型、通信设施实体模型、干

扰器实体模型、侦察卫星实体模型、通信卫星实体模型和定位导航实体模型等; 信息域包括探测模型、信息模型和网络模型等; 认知域属于决策范畴, 包括信息处理模型、协调感知模型、对抗行为模型等。本文模型采用 EBNF(Extended Backus Naur Form)范式进行描述。

2.1 多 Agent 多分辨率模型

基于 Agent 的作战模型仿真中, 作为行为主体

的 Agent 可以用三元组 Agent::=<属性, 结构, 行为>进行描述^[16]。Agent 属性是各类 Agent 的标志性特征, 可以分为空间属性、物理属性和其他属性等, 描述形式表示为属性::=<基本属性, 业务属性, 参数>; Agent 结构描述, 反映 Agent 的不同组织方式, 通常有集中式、分布式和混合式; Agent 行为描述, 指 Agent 对环境变化和其他实体行为的响应, 可表示为行为::=<行为名称, 行为类别, 响应阈值, 行为驱动>。下面分别以代表高分辨率感知器实体模型和代表中分辨率的感知卫星模型为例进行构建。

2.1.1 感知器实体模型

<感知器 Agent>::=<感知器属性, 感知器结构, 感知器行为>;

<感知器属性>::=<基本属性, 感知属性, 设备属性, 参数>;

<基本属性>::=<感知器类别, 属性 1, 属性 2, ...>;

<感知属性>::=<感知属性 1, 感知属性 2, ...>;

<设备属性>::=<设备属性 1, 设备属性 2, ...>;

<参数>::=<参数 1, 参数 2, ...>;

<感知器结构>::=<结构类别, 相互关系, 相邻感知器>;

<感知器行为>::=<行为名称, 行为类型, 响应阈值, 行为驱动>;

<行为类型>::=<反应式行为, 认知式行为>;

<行为驱动>::=<命题, 规则, 程序>。

2.1.2 感知卫星实体模型

<感知卫星 Agent>::=<感知卫星属性, 感知卫星结构, 感知卫星行为>;

<感知卫星属性>::=<基本属性, [感知器 Agent], [通信设施 Agent], [其它 Agent], ..., 目

标清单, 资产清单>;

<基本属性>::=<卫星类别, 坐标 X, 坐标 Y, 坐标 Z, X 方向速度, Y 方向速度, Z 方向速度, 精度>;

<感知器 Agent>::=<...>;

<通信设施 Agent>::=<...>;

<其它 Agent>::=<...>;

<感知卫星结构>::=<结构类别, 相互关系, 相邻卫星>;

<感知卫星行为>::=<行为名称, 行为类型, 响应阈值, 行为驱动>;

<行为类型>::=<反应式行为, 认知式行为>;

<行为驱动>::=<命题, 规则, 程序>。

2.1.3 模型的聚合解聚

考虑到空间信息支援体系特点, 本文采用聚合解聚法(Aggregation—Disaggregation)的多分辨建模方法。聚合解聚法, 是当前常有一种研究方法, “聚合”是指将多个较高分辨率的实体合并成低一层分辨率的实体, “解聚”是指将较低分辨率的实体分解为高一层分辨率的实体, 如图 2 所示。该方法通过改变运行模型, 来实现不同实体在同一分辨率上的交互^[17]。根据行为主体 Agent 的三元组定义, 按照 EBNF 范式定义的模型之间的聚合/解聚^[9]为:

<聚合>::=<聚合对象, 触发机制, 聚合规则>;

<聚合对象>::=<属性, 结构, 行为>;

<聚合规则>::=<作战条令, 数据统计, 战场环境, 外部命令>;

<解聚>::=<解聚对象, 触发机制, 解聚规则>;

<解聚对象>::=<属性, 结构, 行为>;

<解聚规则>::=<作战命令, 空间环境, 敌军情况, 案例经验>;

<触发机制>::=<事件触发, 时间触发, 命令触发, 空间区域触发>。

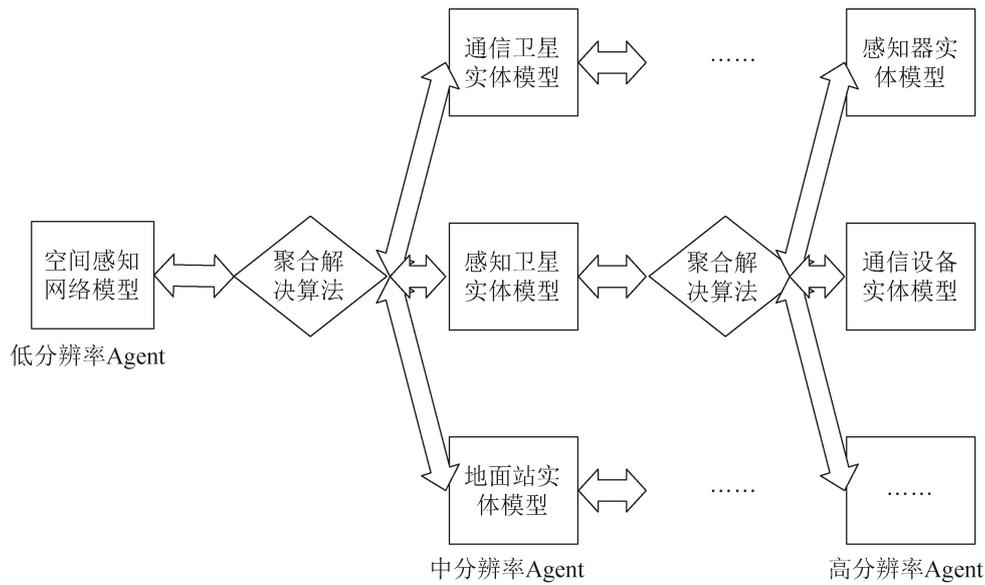


图 2 空间信息支援体系模型聚合解聚示意图

Fig. 2 Illustration of space information support system model polymerization and depolymerization

2.2 复杂网络模型

太空域与传统陆、海、空等作战域相比, 具有很多不同特点, 其中很重要一点是具有高动态性, 即空间作战体系的拓扑结构随着时间无时无处不在动态变化中, 网络时空复杂又具有一定的空间构型, 在时间上表现为周期性和节律性。此外, 还具有“多网联动”和“多域铰链”的特性, 这些特征在进行空间信息支援体系建模时均需要综合考虑。空间信息支援体系作为战争系统的一部分, 同样也是由众多实体组成的, 其整体行为和效果往往取决于实体间复杂的相互作用关系^[18], 对这种复杂关系的描述是系统建模的关键, 采用基于复杂网络理论的建模方法可以较好解决上面提出的几个问题。鉴于空间感知、预警、导航、监视等体系的运行均离不开通信网络的支撑, 空间信息支援体系的网络模型可分为空间通信网模型和以此为依托的空间感知网模型、定位导航网模型等。本文以代表低分辨率的空间感知网模型为例对建模方法进行说明。

定义网络图 $G=(V, E)$, 其中点集 V 表示卫星或地面站节点实体, 边集 E 表示各节点实体之间的信息关系。定义 $V=\{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\}$ 分别为感知卫星 Sat1, 感知卫星 Sat2, 感知卫星

Sat3, 感知卫星 Sat4, 中继通信卫星 Sat5, 卫星地面站 SatGround; 定义 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 为各节点之间的关系, 为研究方便, 定义矩阵 $A=a_{ij}$ 对应 E , 表示卫星感知网拓扑结构的邻接矩阵。

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

按照 EBNF 范式定义矩阵元素::=<关联节点对, 关联关系, 交互情况>;

关联节点对::=<节点实体 1, 节点实体 2>;

关联类型::=<传感关系>|<中继通信关系>|...;

交互情况::=<消息类型, 协议内容, 连通率, 波特率, 延时>;

消息类型::=<轨迹信息>|<命令信息>|<情报信息>|<支援信息>|...;

协议内容::=<长度, 目标位置, 情况报告, ...>;

感知率::=<最长一次连续感知时长, 最短一次

连续感知时长, 连续一次感知平均时长, 感知概率, 感知时间分布>。

时间具有连续性, 但由于卫星节点具有动态性和周期性, 为了研究的方便, 可以将连续的一段时间用一个由 n 个不重叠的时间片^[19](time slice)组成的离散序列 T 进行表示。

若定义如下:

$$T = \{T_n \mid n = 1, 2, \dots, n\}$$

$$T = \{(t_0, t_1), (t_1, t_2), \dots, (t_{n-1}, t_n)\}$$

t_0 表示仿真起始时间, t_n 表示仿真结束时间;

$$t_i = t_0 + i\Delta t, i = 1, 2, \dots, n$$

$$\Delta t = (t_n - t_0) / n \text{ 表示时间片长度。}$$

则相关感知率参数为:

最长一次连续感知时长:

$$T_{\max} = k\Delta t, k = 0, 1, \dots, n$$

最短一次连续感知时长:

$$T_{\min} = j\Delta t, j = 0, 1, \dots, n;$$

连续一次感知平均时长:

$$\bar{t} = \sum_{i=1}^m S_i / m, S_i = r\Delta t, r = 1, 2, \dots, n$$

S_i 表示连续一次感知市场;

$$\text{感知概率: } P = \sum_{i=1}^m S_i / n$$

感知时间分布: $F(t)$ 。

3 仿真与分析

为了更有效说明基于复杂网络的时间片分析方法, 本文构建了一个空间卫星感知网络, 设计了一个基准想定和一个对比想定, 并选用美国 AGI 公司开发的 STK(Satellite Toolkit, 卫星仿真工具包) 平台构造仿真场景。基准想定为全球随即分布的 20 颗空间感知卫星对位于海面某一位置的大型目标实施探测, 对比想定为在基准想定基础上增加由 3 颗低轨小卫星组成的小卫星群, 两套想定目标 Target 坐标相同。为简化研究, 所配星载感知器也设为相同。

基准想定和对比想定新增小卫星群的星历数据分别如表 1, 表 2 所示。

假设步长为 3second, 总时长为 24hour, 经 STK 平台仿真后, 获得的探测结果如表 3 和表 4 所示。

结论: 通过比较实验结果, 对比想定比基准想定的探测率大幅增加。也就是说, 由于同步轨道资源的极度稀缺, 有针对性地增加低轨道小卫星群是增强焦点区域目标感知能力的有效手段。

表 1 基准想定星历数据

Tab. 1 Benchmark scenario to ephemeris data

卫星	X/km	Y/km	Z/km	V_x /(km/s)	V_y /(km/s)	V_z /(km/s)	Lon(deg)
Sat1	1435	-2023	...	6.300	...	-2.45	-54.7
Sat2	-5027	4576	...	2.39	...	7.248	137.6
Sat3	1979	1889	...	6.647	...	-2.76	43.66
...
Sat18	402.1	5428	...	-3.79	...	-4.12	85.76
Sat19	-899	6091	...	1.031	...	6.725	98.39
Sat20	-1290	6104	...	2.798	...	-5.83	101.9

表 2 对比想定新增小卫星群星历数据

Tab. 2 Compare scenario to add new small satellites to ephemeris data

卫星	X/km	Y/km	Z/km	V_x /(km/s)	V_y /(km/s)	V_z /(km/s)	Lon(deg)
Nami1	-4875	4388	...	...	2.768	6.821	138
Nami2	-4460	4598	...	...	1.866	6.614	134
Nami3	-3476	4778	...	...	0.333	5.931	126

表 3 基准想定探测结果

Tab. 3 Detection results of benchmark scenario

Begin Time/s	Lasting Time/s	Detecting Platform
4227	18	Sat4
21510	30	Sat6

表 4 对比想定探测结果

Tab. 4 Detection results of comparing scenario

Begin Time/s	Lasting Time/s	Detecting Platform
201	42	Nami5
483	24	Nami4
...
4227	18	Sat4
...
6330	30	Nami3
...
21510	30	Sat6
...
69891	21	Nami4
...

4 结论

空间信息支援作战, 对于顺利赢得战场主动、充分发挥联合作战的整体效能、迅速取得战争胜利, 具有极为重要的作用。本文立足空间信息支援作战的特点, 采用多 Agent、多分辨率和复杂网络理论等, 开展了空间信息支援作战建模研究, 对于完善太空行动指挥流程、弥补力量体系短板、提高整体效益、丰富相关军事理论, 将空间作战体系融入到联合作战体系均具有重大现实意义。

参考文献:

- [1] 郭荣伟. 九天揽月—中国太空战略发展研究 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2014. (Guo Rongwei. Clasp the moon in the Ninth Heaven—Research on China's Space Strategy Development [M]. Beijing, China: National Defense University Press, 2014.)
- [2] 司光亚, 胡晓峰, 王艳正. 新型作战空间建模仿真实践与体会 [J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(4): 5-10. (Si Guangya, Hu Xiaofeng, Wang Yanzheng. Simulation Practice and Experience of New Combat Space Modeling [J]. Military Operations and Systems Engineering, 2014, 28(4): 5-10.)
- [3] 杨镜宇, 胡晓峰. 基于信息系统的体系作战能力评估研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2011, 25(1): 11-14. (Yang Jingyu, Hu Xiaofeng. Research on Evaluation of Operational Capability of Information System Based on Information System [J]. Military Operations and Systems Engineering, 2011, 25(1): 11-14.)
- [4] 胡晓峰. 战争工程论—走向信息时代的战争方法学 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2013. (Hu Xiaofeng. War Engineering—Methodology of War Towards the information age [M]. Beijing, China: National Defense University Press, 2013.)
- [5] 胡晓峰, 杨镜宇, 司光亚, 等. 战争复杂系统的仿真分析与实验 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2008. (Hu Xiaofeng, Yang Jingyu, Si Guangya, et al. Simulation Analysis and Experiment of Complex System with War [M]. Beijing, China: National Defense University Press, 2008.)
- [6] James H B, Paul K D. Implications for Model Validation of Multiresolution.Multiperspective Modeling and Exploratory Analysis [R]. USA: Department of Air Force, 2003: 1-78.
- [7] 胡晓峰, 司光亚, 吴琳, 等. 战争模拟原理与系统 [M]. 北京: 国防大学出版社, 2009. (Hu Xiaofeng, Si Guangya, Wu Lin, et al. Principles and Systems of War Simulation [M]. Beijing, China: National Defense University Press, 2009.)
- [8] 郭强, 毕义明. 多分辨率建模在联合作战仿真中的应用研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2007, 29(6): 86-89. (Guo Qiang, Bi Yiming. Application research of Multi-resolution Modeling in Joint Combat Simulation [J]. Command Control and Simulation, 2007, 29(6): 86-89.)
- [9] 周忠旺, 柳少军. 基于 EBI 框架的战争模拟多分辨率概念建模 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(9): 1-4, 9. (Zhou Zhongwang, Liu Shaojun. Multi-resolution Concept Modeling of War Simulation Based on EBI Framework [J]. Computer Simulation, 2014, 31(9): 1-4, 9.)
- [10] 李元, 李伯虎, 胡晓峰, 等. 基于 BOM 和 FEDEP 的多分辨率建模框架 [J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(3): 368-373. (Li Yuan, Li Bohu, Hu Xiaofeng, et al. Multi-resolution Modeling Framework Based on BOM and FEDEP [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(3): 368-373.)
- [11] 何大初, 刘宗华, 汪秉宏. 复杂系统与复杂网络 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2012. (He Daren, Liu Zonghua, Wang Binghong. Complex systems and complex networks [M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2012.)

(下转第 1920 页)

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