

12-13-2019

Agent Based Modeling and Simulation Analysis of Low-Orbit Early-Warning Satellites

Liu Wen

China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Department, Beijing 100076, China;

Xiaolu Wang

China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Department, Beijing 100076, China;

Hongsheng Wang

China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Department, Beijing 100076, China;

Zhang Heng

China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Department, Beijing 100076, 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.

Agent Based Modeling and Simulation Analysis of Low-Orbit Early-Warning Satellites

Abstract

Abstract: Low-Orbit Early-Warning Satellite has accurate midcourse ballistic missile tracking and surveillance capability. The paper takes Space Tracking and Surveillance System's function and construction as the research subject. System model is constructed *based on Agent method*. The possible constellation configurations of STSS are analyzed considering the coverage performance, and the detection capability of ballistic missile target is simulated and analyzed. Simulation analysis of target detection is carried out. The result shows that STSS can effectively detect a certain number of targets, but *detecting capability is affected severely by solar illumination*.

Keywords

space tracking and surveillance system (STSS), simulation analysis, ballistic missile detection, Agent based modeling and simulation

Authors

Liu Wen, Xiaolu Wang, Hongsheng Wang, Zhang Heng, and Changqing Wang

Recommended Citation

Liu Wen, Wang Xiaolu, Wang Hongsheng, Zhang Heng, Wang Changqing. Agent Based Modeling and Simulation Analysis of Low-Orbit Early-Warning Satellites[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2413-2421.

基于 Agent 的低轨预警卫星星座探测仿真分析

刘闻, 王晓路, 汪宏昇, 张恒, 王长庆

(中国运载火箭技术研究院研究发展部, 北京 100076)

摘要: 天基预警卫星系统中, 低轨预警卫星具有对中段弹道导弹目标进行精确的跟踪和监视的能力。参照美国“空间跟踪与监视系统”(STSS, Space Tracking and Surveillance System)的基本功能和部署, 采用 Agent 建模仿真方法建立了低轨预警卫星系统模型, 从覆盖性角度分析了可能的卫星星座构型, 并对弹道导弹目标的探测能力进行了仿真分析。仿真结果表明 STSS 星座能有效探测一定数量目标, 但探测能力受光照影响严重。

关键词: 空间跟踪与监视系统; 仿真分析; 弹道导弹目标探测; 基于 Agent 的建模仿真方法

中图分类号: V474.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 11-2413-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0344

Agent Based Modeling and Simulation Analysis of Low-Orbit Early-Warning Satellites

Liu Wen, Wang Xiaolu, Wang Hongsheng, Zhang Heng, Wang Changqing

(China Academy of Launch Vehicle Technology Research and Development Department, Beijing 100076, China)

Abstract: Low-Orbit Early-Warning Satellite has accurate midcourse ballistic missile tracking and surveillance capability. The paper takes Space Tracking and Surveillance System's function and construction as the research subject. System model is constructed based on Agent method. The possible constellation configurations of STSS are analyzed considering the coverage performance, and the detection capability of ballistic missile target is simulated and analyzed. Simulation analysis of target detection is carried out. The result shows that STSS can effectively detect a certain number of targets, but detecting capability is affected severely by solar illumination.

Keywords: space tracking and surveillance system (STSS); simulation analysis; ballistic missile detection; Agent based modeling and simulation

引言

天基预警卫星系统是对弹道导弹目标进行发现、监视、探测、跟踪的主要执行者之一, 其中主要由对弹道导弹中段和末段进行高精度探测跟踪的低轨预警卫星, 与对目标主动段进行探测的高轨

卫星共同构成。STSS 的前身是“天基红外系统(Space based Infrared System, SBIRS)”中的“低轨预警卫星系统(SBIRS-Low)”, 2002 年美国导弹防御局(Missile Defense Agency, MDA)重构了该项目并改为“空间跟踪和监视系统(STSS)”, 目前处于试验阶段^[1]。2009 年 9 月 MDA 委托诺斯罗普·格鲁曼和雷声公司研制了两颗成对运行的 STSS 演示验证星成功发射, 并成功进行了一系列技术验证和演示任务^[2]。未来 STSS 还将验证能否根据高轨卫星的探测数据来跟踪弹道目标; 能否生成高质量的弹道跟踪结果, 配合“宙斯盾”系统, 制导舰载拦



收稿日期: 2019-05-27 修回日期: 2019-07-19;
作者简介: 刘闻(1994-), 男, 宁夏银川, 硕士, 研究方向为系统仿真技术; 王晓路(1982-), 男, 北京, 博士, 高工, 研究方向为体系仿真技术; 汪宏昇(1982-), 女, 北京, 博士, 高工, 研究方向为系统工程与体系仿真。

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

• 2413 •

截弹摧毁目标。当低轨卫星部署完成后,可形成高低轨结合,预警、跟踪、识别功能复合的天基预警卫星系统,性能最为先进。因此,对美国当前的天基预警卫星系统进行仿真评估,是必要之举。需要研究低轨预警卫星的未来部署、功能运转,以针对其特点和薄弱环节,开发相应的反击手段。

1 基于 Agent 的 STSS 模型框架设计

1.1 STSS 的基本结构和功能

STSS 主要由组网卫星星座及配套地面指控站组成。本节对 STSS 包含的主要对象和功能进行分

析,探讨系统的基本工作模式和预警任务执行流程,给出研究开展的功能描述,并采用 Agent 的建模思路对 STSS 的系统模型框架设计,确定工作开展基线。

低轨 STSS 卫星一般部署在 1 600 km 左右的轨道上^[3],根据卫星部署高度及传感器覆盖范围进行分析,需形成 24~30 颗的多轨道面上低轨卫星网才可具备全球全程观测能力。当前,可以获取到 STSS 的轨道信息主要源于在轨运行的两颗低轨预警卫星验证卫星,STSS Demo1 和 STSS Demo2。二者双行元参数如表 1 所示。

表 1 STSS Demo1 和 STSS Demo2 的 TLE 轨道参数
Tab. 1 TLE Orbit Elements of STSS Demo1 and STSS Demo2

卫星名称	TLE 轨道参数						
STSS DEMO1	1 35937U 09052A	19083.89514722	0.00000000	00000-0	00000-0 0	05	
	2 35937 57.9908	77.6441 0013744	229.2029 130.8605	12.79331902		01	
STSS DEMO2	1 35938U 09052B	19083.88860082	0.00000000	00000-0	00000-0 0	08	
	2 35938 58.0012	77.9717 0014485	279.0965 80.7535	12.79304565		04	

每颗低轨预警卫星都搭载 2 种探测器,兼具中短波红外、长波红外和可见光探测能力。快速捕获相机采用一维阵列,扫描整个区域的完整图像,发现目标;跟踪相机一个正方形或长方形焦平面连续观测一个特定的区域及其红外辐射的变化,用于精确的探测。两种探测器配合分工形成完整的“捕获-跟踪”工作。捕获探测器视场广,兼具地平线以上和地平线以下的探测能力;跟踪探测器视场较窄,安装与双轴框架上,可灵活摆动,捕获传感器一旦发现目标,便将目标信息传递至跟踪传感器,由后者对目标进行闭环跟踪。STSS 卫星一般以多卫星立体观测的方式对目标进行空间定位,跟踪信息可以在卫星间相互传递,实现对目标的“接力”跟踪。通过星地链路将星上初处理后的探测数据实时传输给地面指控中心,用于引导地基预警雷达和拦截武器跟踪拦截目标。

对弹道导弹目标的探测跟踪过程是一个预测目标信息精度逐步收敛的过程。随着对目标持续进行探测,积累足够充分的探测结果,更新其轨迹参

数,再并分配观测能力更强的卫星传感器资源继续探测过程,对目标轨迹逐步进行修正,最终获得高精度的弹道轨迹和目标信息。

如图 1 所示,天基预警探测任务的发起一般由高轨预警卫星捕获到目标开始。

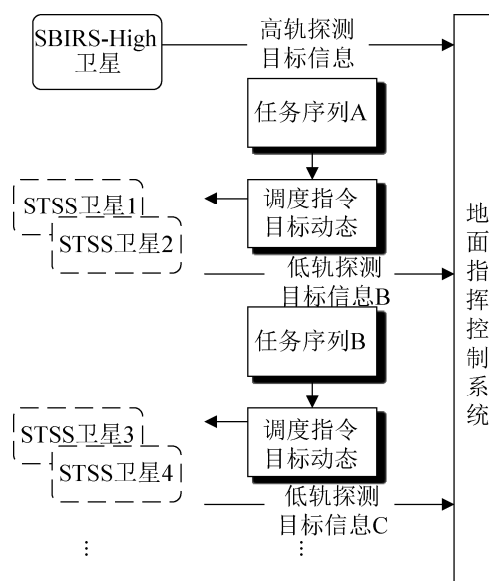


图 1 天基预警系统工作流程
Fig. 1 Space based Early-Warning System Task Processing

地面指控中心通过星地链路获取早期预警信息, 对当前可疑目标进行参数估计和弹道初步判断, 形成预警探测任务集, 将跟踪调度指令和预测目标信息传递给低轨卫星, 由低轨卫星进行精确跟踪探测。低轨卫星收到分解后的预警任务和调度指令, 通过传感器扫描跟踪行为, 对目标进行高精度探测跟踪。地面站通过融合执行同一探测目标的多颗卫星视线方向信息对目标进行准确的定位, 并根据获取的高精度目标信息参数形成新的弹道预报结果, 进一步对整个预警体系探测结果进行更新。

1.2 基于 Agent 的系统体系架构设计

为使构建模型尽可能模拟实际 STSS 的工作运行情况, 构建的系统模型框架以预警卫星系统模型和地面指控系统模型为主。研究内容主要关注预警卫星、探测目标和地面管控设施之间的交互与功能, 在此基础上对卫星模型组件进行简化, 重点关注卫星的在轨运行情况和轨道参数、传感器探测识别功能执行、星上数据处理及管理和本质的通信功能。对指控系统的研究内容重点侧重于预警卫星组网应用和协同观测任务执行。

从上述低轨预警卫星系统的组成和执行任务的过程可得, 当前系统具有以下几个特性:

(1) 复杂性, 低轨预警卫星网包含传感器资源较多, 多目标探测背景下, 预警资源与目标、卫星与地面站之间交互复杂;

(2) 动态性, 预警卫星在轨位置、导弹目标运动状态、系统环境都在动态变化, 因此模型功能、探测任务必须具备动态调整能力;

(3) 交互性, 模型对象和功能执行会根据环境、状态进行调整来实现目标, 行为也会对环境和其他实体产生影响。

同时, 自治运营的低轨预警卫星网也是美国对于当今卫星系统发展的趋势, 具有一定自治能力的预警卫星能够有较强的任务及环境适应性。面对这样复杂的大型系统, 难以通过解析的方法对其系统的功能与运行状态进行评估和仿真。对于这样复杂

的系统, 通过还原论刻画传统系统, 建立系统的形式化模型就比较困难了。因此需要选用合适的建模仿真方法进行系统的建模仿真, 其中基于 Agent 的建模仿真方法是解决复杂系统建模分析的一种有效途径。

基于 Agent 建模与仿真 (ABMS, Agent-Base Modeling and Simulation) 是一种采用彼此具有交互行为的实体 Agent 对系统进行描述和抽象的建模仿真方法, 也是一种自底向上模拟系统变化的方法^[5]。研究人员在微观层次描述模拟个体的行为、感知、决策过程, 从而了解宏观层次的系统现象。

将各类模型对象构建为单独的 Agent 模型, 即预警卫星 Agent 与预警任务管理控制 Agent。每个模型均为独立的实体, 具有自主感知状态, 有特定的行为集, 并进行决策实现目标的能力。后续也可根据天基预警体系的功能改变, 单独对各类 Agent 模型进行补充修改, 无需从系统层面修改行为规则。

为适应当前预警体系建模的需求, 本研究中各类 Agent 开发采用基于控制论模型的 Agent 结构, 如图 2 所示, 这种结构类似慎思型 BDI 模型思想。其中传感器负责接收和处理外界消息; 控制器则根据控制规则库, 按照相应的规则对输入信息进行处理, 并输出控制指令至执行器; 执行器按照控制器给出的控制指令执行动作, 动作结果包括对内部状态进行改变, 对环境造成影响和内部控制反馈。

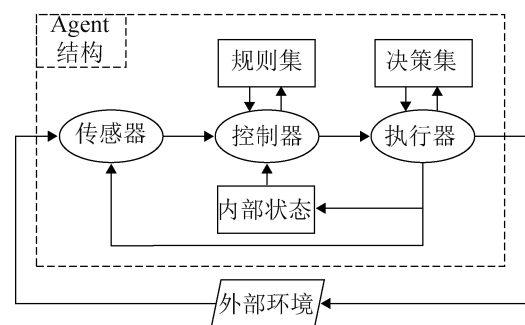


图 2 基于控制论的 Agent 行为模型
Fig. 2 Agent Behavior Model Based on Control Theory

其过程可简要理解为, 通过传感器获取外界信息, 更新信息库, 控制器按照最大化实现目标方向

选择决策, 并通过执行器执行。

多 Agent 体系需要明确体系中 Agent 间的组织关系和交互逻辑, 以实现自动控制执行和规划能力, 并具备不同的处理速度和管控效率。一般多 Agent 结构有以下 4 种: 自顶向下式结构、集中式结构、分布式结构、完全分布式结构^[6]。基于本文的假设和所构建的体系, 其中包含的 Agent 既有自主运行的预警卫星, 也有预警任务管理控制中心模型, 这种模型组成更适于采用如图 3 所示的集中式结构, 即由任务管理控制中心实现对体系全局的任务规划和决策, 而预警卫星个体既可以服从顶层任务规划决策, 也可以根据当前目标和自身状态的变化, 反馈于任务管理控制中心, 更新当前的任务规划。

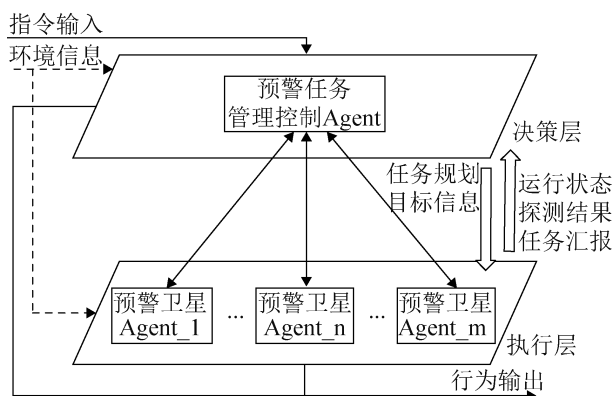


图 3 预警卫星系统 Agent 结构
Fig. 3 SBEWS Model Agent Architecture

该结构明确了体系中具有不同职能的 Agent 个体互相间的控制关系, 确保了任务规划调度和执行过程中具有一定的灵活性, 也能保证执行 Agent 具备一定的自主性。

2 低轨预警卫星 Agent 模型的设计

低轨预警卫星 Agent 主要关注卫星的轨道参数配置、红外传感器的参数和探测方式配置、卫星运行状态管理与任务执行。

按照 Agent 行为模型的设计, 预警卫星 Agent 的主要功能包括卫星轨道运行模块、传感器功能模块及通信模块。轨道运行模块主要负责卫星的轨道

状态计算和运行状态管理; 传感器模块主要模拟预警卫星的传感器功能, 对目标进行探测; 通信模块, 主要负责 Agent 与 Agent 实体或 Agent 与环境实体间的信息交互。以下主要对轨道运行模块和传感器模块功能的设计进行描述。

2.1 轨道运行功能模块设计

卫星的轨道推算为轨道运行模块的重要功能, 卫星模型可通过配置双行元参数修改卫星的轨道位置。为实现卫星模型的灵活配置, 轨道计算模块长时间稳定运行, 选用双行元(Two-Line Element, TLE)作为航天器轨道参数, 采用 NORAD 公布的轨道预测模型作为轨道计算工具。TLE 轨道参数考虑了地球扁率、日月引力、摄动影响、大气阻力影响和轨道衰退等参数。TLE 表示卫星运行的一种平均六根数, 采用特定的方法剔除周期扰动项。基于 TLE 的 SGP4/SDP4 轨道解析算法可以获得较为准确的轨道预测参数^[7], 主要考虑了地球引力场、三体摄动和指数大气密度阻尼等摄动因素; 且卫星双行元数据均可通过北美防空司令部(NORAD)或者美国忧思科学家联盟获取, 具有广泛的数据来源。对于研究的预警卫星模型, 可以通过公开卫星 TLE 参数带入轨道解析算法, 获取卫星实时位置速度信息。

2.2 传感器功能模块设计

传感器模块的主要功能包括传感器信息处理与执行。采用模块化设计, 低轨预警卫星 Agent 可根据设计调整传感器的主要参数。传感器模型具备目标在不同背景可见性判断功能, 也具备光学特性(主要为红外特性)的可见性判断。

2.2.1 传感器探测背景条件解算模型

预警卫星传感器对目标的探测范围不仅与其探测能力和目标特性有关, 也与卫星传感器与目标以及地球、太阳等空间实体的几何关系有关。

为确定传感器可以有效探测到目标, 必须保证目标在传感器探测视场内, 卫星和目标之间不被

地球遮挡。同时,传感器的朝向方向必须避开高亮度星体光线,确保传感器不受背景光线影响。研究中为简化分析,对太空背景干扰中,仅考虑太阳光线对预警卫星探测的影响。

判断目标在传感器探测视场的方法,主要通过判断传感器坐标系下的星目视线是否在传感器有效视场内。判断目标是否被地球遮挡,则需要判断地心惯性坐标系下的星目视线与卫星地心连线夹角是否小于最小观测角度 α_{\min} 。

太阳照射问题是影响预警卫星光学探测器的主要干扰,为使预警卫星正常工作,需要保证阳光不能进入卫星某角度范围。为便于实现,在研究中将太阳照射问题判定分为两类:一类为判定传感器视线背景是否为太阳,传感器直接受到太阳照射;另一类为判断卫星是否处于地影区,若卫星处于地影区则不受太阳光照影响。

仅判断太阳、目标、传感器位置关系,以目标为中心点 T , 设目标太阳矢量为 TR , 目标至卫星传感器为 TS 。为便于分析,认为二者矢量夹角大于 90° , 则认为太阳在传感器视场中; 矢量夹角小于 90° , 则认为太阳在传感器视场外。

如图 4 所示, 设太阳、地球本影区顶点位置为 O_{Shadow} , 本影角为 δ_u 。则地心惯性坐标系下的坐标为:

$$OO_{Shadow} = -\frac{OR_E}{|OR_E|} \cdot \frac{R_E}{\tan \tan \delta_u} \quad (1)$$

当卫星进入本影锥角区域, 即: $\angle OO_{Shadow}S_1 < \delta_u$; 且卫星在地影侧, 即 $\angle O_{Shadow}OS_1 < (\pi/2 - \delta_u)$, 则认为卫星进入地影, 不受太阳光照影响。

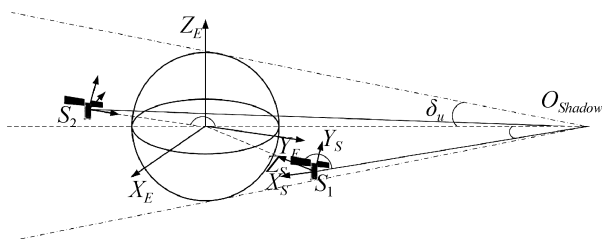


图 4 卫星位置与地影区关系图

Fig. 4 Relative Position between Satellite and Shadow Zone

2.2.2 传感器对目标光学可见性解算模型

导弹主动段飞行期间主要由预警卫星扫描传感器对其捕获, 因此研究主要考虑预警卫星扫描探测器对发动机尾喷焰的探测能力。

由于导弹目标为点目标, 目标信号在红外探测器的电压响应为

$$\Delta V = \frac{\Delta I_t}{R^2} \tau_a \tau_o A_o \cdot \mathfrak{R}(\lambda) \quad (2)$$

式中: ΔI_t 为目标与背景辐射强度之差 (ΔI_t 应该是目标的辐射强度); R 为目标距离传感器的视线长度; τ_a 为大气透过率; τ_o 为光学系统透过率; A_o 为光学系统孔径面积; $\mathfrak{R}(\lambda)$ 为探测器响应率, 单位 V/W, 由 D^* 可计算得到

$$\mathfrak{R}(\lambda) = \frac{D^*(\lambda)V_n}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (3)$$

于是

$$\Delta V = \frac{\Delta I_t}{R^2} \tau_a \tau_o A_o \cdot \frac{D^*(\lambda)V_n}{\sqrt{A_d \Delta f}} \quad (4)$$

式中: A_d 为探测器像元面积; V_n 为噪声电压; $\Delta f = 1/2\tau_d$, 其中 τ_d 为驻留时间。

于是信噪比可表达为

$$SNR = \sqrt{2\tau_d} \cdot \frac{\Delta I_t \tau_a \tau_o K A_o D^*(\lambda)}{\sqrt{A_d R^2}} \quad (5)$$

对线阵扫描传感器, 令 n 为探测器并联元数, T_f 为帧周期, q_c 为扫描重叠率, Ω 为扫描方向视场, ω 为像元视场角, K 为过程因子。于是像元驻留时间为

$$\tau_a = \frac{n\omega T_f \eta_{sc}}{\Omega(1-q_c)} \quad (6)$$

根据上述模型, 可求得视线距离 R 随信噪比 SNR 的变化关系。可认为当满足一定信噪比阈值 SNR_{\min} , 低轨预警卫星既可以有效探测目标。

3 预警任务管理控制 Agent 的设计

考虑到预警卫星资源有限, 单卫星凝视传感器同时只能跟踪单个目标, 不但要确定预警卫星监视目标序列, 确定对目标的监视时长, 还涉及到预警卫星系统信息融合、指令交接、任务配置等问题。

因此,根据系统框架设计,构建预警任务管理 Agent 作为低轨预警卫星运行中的决策者。其主要功能包括:探测数据处理、预警任务生成、预警资源规划调度。各模块的功能设计如下:

3.1 探测数据处理模块

探测数据处理模块的功能主要包含弹道推算功能和双星立体定位融合功能。

低轨卫星以 2~4 颗卫星共同实现对目标中段的立体观测和空间定位,需要地面站融合多颗卫星的视线方位信息对目标进行准确的定位。探测结果主要为目标的方位角、辐射度和信噪比,探测信息发送给预警任务管理 Agent,由任务管理 Agent 通过基于立体视觉原理的弹道点重建算法生成三维弹道点信息。

重建目标的三维弹道信息后,探测数据处理模块会根据弹道信息进行特征分析、弹道计算和落点范围预估,并将处理结果进行保存。

3.2 预警任务生成模块

预警任务生成模块的功能包含目标动态威胁度评估和预警任务分解制定。

对低轨预警卫星 Agent 进行跟踪目标的分配,首先需要对观测目标形成可度量的评价指标,作为卫星优先观测跟踪的重要参考依据。研究通过预估目标毁伤能力形成威胁度指标,综合考虑了导弹性能和预警卫星的探测能力,形成合理调度规划的主要评价指标。

任务生成模块根据探测结果和威胁度排序,形成各预警任务的执行时段、目标特征、预估目标轨迹等任务关键信息要素,为后续预警资源的规划调度提供了任务依据。

3.3 预警资源规划调度模块

预警资源规划调度模块主要包含预警任务分解、规划和卫星资源调度功能。

预警探测任务执行过程中会遇到多种突发情况,比如目标数量增多、目标大范围机动、预警卫

星失效等。因此,为适应这种动态变化,确保合理有效分配预警资源,调度规划模块采用基于 Agent 合同网的招投标机制解决预警调度问题,模拟经济学行为中“招标-投标-中标-签约”机制,实现预警任务的分配、调整。通过预警任务管理控制 Agent 与低轨卫星 Agent 之间不断协商过程,实现预警任务执行者的确定,使整个预警系统具有一定的适应性。

4 实验结果与分析

根据构建的低轨预警卫星系统 Agent 模型框架,实验以 Visual Studio 2015 为开发环境,对 STSS 仿真系统进行开发。系统的功能运行行为以 C++ 语言独立开发的模块,不需要 STK 软件提供数据支持,具有较强的自主性和可开发性。各模型的参数和组件可灵活调整和配置,可根据仿真需要快速修改模型参数,具有良好的可扩展性和集成能力。

为对构建的各类 Agent 模型进行检验,并借助 STSS 仿真系统对当前低轨预警卫星的性能进行分析,研究设计了以下实验,并得出了相应结论。

4.1 不同星座类型的低轨预警卫星覆盖性分析

目前的两颗低轨预警卫星验证星运行在同一轨道上,二者的平近角相差约 60° 。未来低轨预警卫星的轨道部署情况尚不确定,若按照现有轨道分布,同一轨道面上可部署 6 颗低轨卫星,STSS 卫星极可能采用 Walker 星座进行部署。实验以 STSS Demo1 的轨道参数为依据,建立 18/6/1, 24/6/1 和 30/6/1 的 Walker 星座对低轨卫星的覆盖性能进行分析。为对覆盖全球的低轨预警卫星星座进行检验,建立东-西向和西-东向两类弹道导弹目标进行仿真实验。

仿真实验设置时间条件下,的自西向东飞行的弹道导弹目标始终处于日照光线中,会对卫星的观测产生影响;而自东向西飞行的导弹目标背向光照方向飞行,且大部分弹道轨迹处于地影下,便于低轨卫星的观测。故二者的探测结果有较大差异。仿真分析结果如图 5~7 所示。

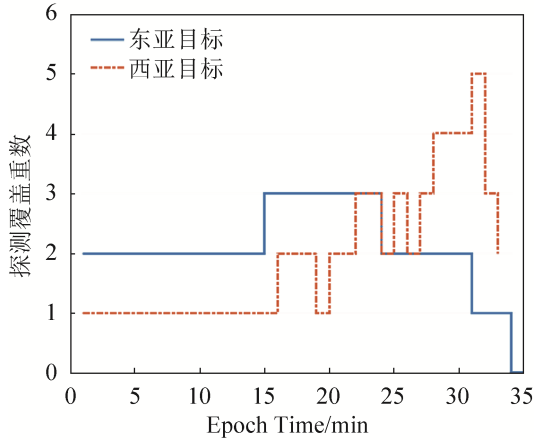


图 5 18/6/1 星座低轨卫星探测结果

Fig. 5 18/6/1 STSS Constellation Model Detection Result

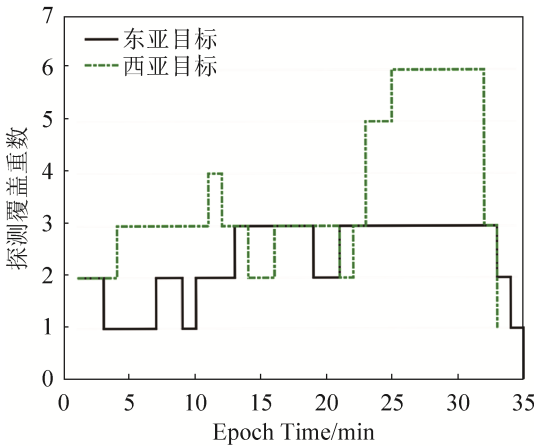


图 6 24/6/1 星座低轨卫星探测结果

Fig. 6 24/6/1 STSS Constellation Model Detection Result

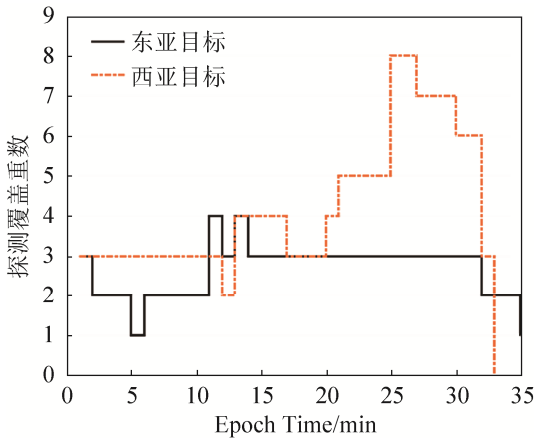


图 7 30/6/1 星座低轨卫星探测结果

Fig. 7 30/6/1 STSS Constellation Model Detection Result

• 对于 18/6/1 星座而言, 对西-东向导弹目标的立体探测(两星以上同时观测)时长占目标总飞

行时长的 85%, 没有出现四重以上的探测结果; 对东-西向导弹目标的立体观测时长占比为 51%, 探测重数高于 4 的时长占总观测时长的 3%。

• 对于 24/6/1 星座而言, 对西-东向导弹目标的立体观测时长占比为 85%, 没有出现四重以上的探测结果; 对东-西向导弹目标的立体观测时长占比约为 97%, 其中有 27% 的观测窗口的探测重数超过 4。

• 对于 30/6/1 星座而言, 对西-东向导弹目标的立体观测时长占比为 94%, 没有四重以上的观测覆盖; 对东-西向导弹目标的立体观测时长占比约为 100%, 其中有 33% 的观测窗口的探测重数超过 4。

根据上述结果, 18/6/1 星座覆盖性能逊色与其他二者, 对东西向导弹仅能保证约 50% 的覆盖性, 无法确保对目标的全程跟踪和探测。30/6/1 星座的低轨卫星探测覆盖能力略强于 24/6/1, 但性能提高有限, 且四重以上的观测窗口相差不大, 故当有大量导弹目标出现时, 仍然会出现预警卫星资源短缺的情况。考虑发射成本和管理调度压力, 24/6/1 星座的低轨卫星可以满足少量导弹目标的观测需要。

4.2 STSS 卫星调度管理与任务规划仿真

以 STSS-Demo1 的轨道依据为参考, 建立如图 8 所示的 24/6/1 星座的低轨预警卫星模型。

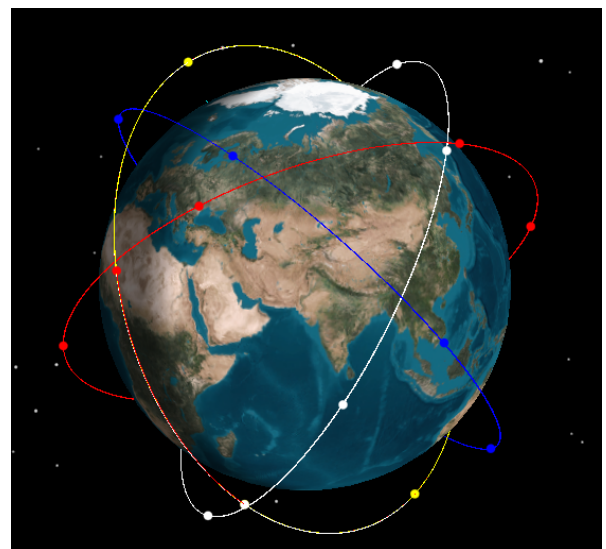


图 8 STSS 卫星 24/6/1 星座示意图

Fig. 8 24/6/1 Constellation STSS Satellites Model

在本仿真方案中,设计并生成了 8 条导弹目标弹道,具体参数如表 2 所示。

预警任务的规划结果和卫星资源调度安排见表 3。其中 Sche_n 代表执行的第 n 次任务调度, Sche_mx 表示子任务观测目标为目标 x。子任务序列的排列顺序以当前时刻威胁度值为标准,由高到低排列。

表 2 弹道导弹目标参数
Tab. 2 Target Missile Basic Parameters

发射点	目标点	发射时间
(32.3841, 112.128)	(34.0522, -118.244)	04:00:00:00
(38.7417, 126.814)	(34.0522, -118.244)	04:02:00:00
(16.8874, 117.288)	(37.7749, -122.419)	04:05:00:00
(34.2076, 44.7793)	(40.7143, -74.006)	04:10:00:00
(2.65077, 154.772)	(47.6062, -122.332)	04:08:00:00
(6.18513, 60.4205)	(38.8951, -77.0364)	04:20:00:00
(15.2735, 63.9524)	(38.8951, -77.0364)	04:01:00:00
(31.1781, 162.593)	(40.7143, -74.006)	04:15:00:00

表 3 任务规划调度表(部分)
Tab. 3 Early-Warning Task Scheduling Result (Part)

仿真时间	任务序号	子任务序列	可用卫星	任务分配结果
04:11:00	Sche_10	Sche_10_m4	STSS_11; STSS_24; STSS_25; STSS_34; STSS_35; STSS_46;	STSS_34&STSS_25: [12:00-14:00]
		Sche_10_m3	-	-
		Sche_10_m5	STSS_21; STSS_26; STSS_35; STSS_44;	STSS_44&STSS_35: [12:00-14:00]
		Sche_10_m2	STSS_26;	-
		Sche_10_m1	STSS_26; STSS_43;	STSS_43&STSS_26: [12:00-14:00]
		Sche_10_m7	-	-
		Sche_11_m3	STSS_26;	-
04:12:00	Sche_11	Sche_11_m4	STSS_24; STSS_25; STSS_34;	STSS_24&STSS_25: [13:00-15:00]
		Sche_11_m5	STSS_21; STSS_26; STSS_35; STSS_43; STSS_44;	STSS_44&STSS_35: [13:00-15:00]
		Sche_11_m2	STSS_26;	STSS_43&STSS_26: [12:00-14:00]
		Sche_11_m1	STSS_26; STSS_43;	STSS_43&STSS_26: [13:00-15:00]
		Sche_11_m7	STSS_34;	-

以仿真结果中 04:11:00 的 Sche_10 调度过程为例,当前的任务序列更新为{目标 4, 目标 3, 目标

5, 目标 2, 目标 1, 目标 7}, 其中目标 5 可用卫星集为{STSS_21;STSS_26;STSS_35;STSS_44}, 目

标 1 可用卫星集为 {STSS_26;STSS_43}, 实际上由探测窗口可得, 在 04:12:00-04:14:00 窗口内, STSS_35 在该时间段内也可以执行对目标 1 的探测任务, 但高优先级的 Sche_10_m5 任务已经调用 STSS_35 执行观测任务。调度任务生成中, 优先对高威胁目标分配卫星资源, 此时签订合同的卫星状态为忙碌, 即使对后续目标具有可见窗口, 但由于资源已经被高优先级的目标占用, 故不能使用。

在下一时间段内, 预警任务管理控制 Agent 会根据前时刻的探测结果, 更新任务序列, 重新对预警资源进行规划调度, 完成对目标的观测任务。预警任务管理控制 Agent 也可以有效地对各类突发事件进行处理, 并更新任务规划结果。

但在本仿真方案中, 若同一区域发射大量目标时, 24 颗星低轨预警卫星星座无法实现对所有目标的全程跟踪, 仅可以保持对重要目标的持续跟踪。

5 结论

本文采用基于 Agent 的仿真建模方法对 STSS 低轨预警卫星及其系统开展了建模仿真工作, 构建了实验仿真系统, 并通过不同的实验方案对 STSS 的功能进行了检验分析。根据实验结果, 考虑低轨预警卫星资源的高效利用, 也满足一定的立体观测需求, 建立 24/6/1 构型的低轨预警卫星星座, 可以对弹道导弹目标有效进行探测跟踪; 对低轨卫星进行任务规划和资源调度, 可持续观测重点高威胁目标, 但受限于卫星星座中低轨预警卫星资源数量, 无法对大量出现的目标保持全程跟踪。

参考文献:

- [1] 邴启军. 美 STSS 的功能特性及薄弱环节研究[J]. 装备学院学报, 2012, 23(1): 65-69.
Bing Qijun. Study on Function, Character and Weakness of the US STSS[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2012, 23(1): 65-69.
- [2] 周小坤. STSS 卫星演示验证全程跟踪导弹能力[J]. 装备学院学报, 2011(3): 24-24.
- [3] 王惠. 太空跟踪监视系统(STSS)卫星演示验证全程跟踪导弹能力[J]. 战术导弹技术, 2011(3): 31-31.
- [4] Andreas N S. Space-Based Infrared System (SBIRS) system of systems[C]. IEEE: 1997 IEEE Aerospace Conference, 1997, 4: 429-438.
- [5] 李群, 雷永林, 侯洪涛, 等. 仿真模型设计与执行[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Li Qun, Lei Yonglin, Hou Hongtao, et al. Simulation Model Design and Execution[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.
- [6] 高黎. 对地观测分布式卫星系统任务协作问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
Gao Li. Research on Earth Observation Task Cooperation for Distributed Satellites System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [7] 刘一帆. 基于 SGP4 模型的低轨道航天器轨道预报方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Liu Yifan. Research on Low Earth Orbit Spacecraft Orbit Prediction Strategy Based on SGP4 Model[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [8] 何俊. 基于预警任务的天基预警资源调度方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
He Jun. Research on Resource Allocation for Space-Based Early-Warning System Based on Early-Warning Task[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [9] 汤绍勋. 天基预警低轨星座星载传感器资源管理与预警探测任务调度问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
Tang Shaoxun. Research on Satellite Sensor Resources Management and Detection Tasks Scheduling Problem for LEO Constellation of Space-based Early Warning System[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [10] 余二永, 徐学文. STSS 星座空间覆盖性能分析方法研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(6): 103-106.
She Eryong, Xu Xuewen. Study on the Method of STSS Space Coverage Performance[J]. Computer Simulation, 2010, 27(6): 103-106.
- [11] 张倩, 赵砚, 徐梅. 卫星星座的空域覆盖性能计算模型[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(1): 6-10.
Zhang Qian, Zhao Yan, Xu Mei. Computation Model of Constellation Space Coverage Performance[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2011, 30(1): 6-10.