

11-30-2023

Research on Operational Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Support Equipment System

Xiaolan Yu

University of Aerospace Engineering, Beijing 101400, China, yuxiaolan26@163.com

Wei Xiong

University of Aerospace Engineering, Beijing 101400, China, 13331094335@163.com

Chi Han

University of Aerospace Engineering, Beijing 101400, China

Zhenwei Wu

Beijing satellite navigation center, Beijing 100089, 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. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Research on Operational Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Support Equipment System

Abstract

Abstract: The operational effectiveness evaluation of space-based information support equipment systems has become a research hotspot in the military field. How to effectively deal with the nonlinear and confrontational problems of the operational effectiveness of the space-based information support equipment system has become a crucial issue in the development of the space-based information support equipment system. In this paper, a method for evaluating the operational effectiveness of the space-based information support equipment system based on the system dynamics (SD) model is presented. The SD flow rate basic tree entry modeling method is used to establish the basic tree entry model of seven subsystems and finally form the SD model for the evaluation of the space-based information support equipment system. The operational effectiveness of the space-based information support equipment system is defined. It is verified that the proposed method can effectively evaluate the operational effectiveness of the space-based information support equipment system and can play a supporting role in the scientific demonstration of equipment systems.

Keywords

space-based information support equipment system, system dynamics(SD), operational effectiveness evaluation, non-linear, dynamic

Recommended Citation

Yu Xiaolan, Xiong Wei, Han Chi, et al. Research on Operational Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Support Equipment System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2429-2444.

天基信息支援装备体系作战效能评估方法研究

于小岚¹, 熊伟^{1*}, 韩驰¹, 吴振伟²

(1. 航天工程大学, 北京 101400; 2. 北京卫星导航中心, 北京 100089)

摘要: 天基信息支援装备体系的作战效能评估已经成为军事领域的研究热点, 如何有效地处理天基信息支援装备体系作战效能的非线性、对抗性等问题俨然成为了发展天基信息支援装备体系至关重要的问题。提出了一种基于系统动力学(system dynamics, SD)模型的天基信息支援装备体系作战效能评估方法。采用SD流率基本入树建模法建立7个子系统的基本入树模型, 形成天基信息支援装备体系作战效能评估的SD模型, 对天基信息支援装备体系的作战效能进行了定义。仿真试验结果表明: 该方法能够对天基信息支援装备体系进行有效的作战效能评估, 可以发挥装备体系科学论证的支撑作用。

关键词: 天基信息支援装备体系; 系统动力学; 作战效能评估; 非线性; 动态性

中图分类号: N945.13; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2429-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0683

引用格式: 于小岚, 熊伟, 韩驰, 等. 天基信息支援装备体系作战效能评估方法研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(11): 2429-2444.

Reference format: Yu Xiaolan, Xiong Wei, Han Chi, et al. Research on Operational Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Support Equipment System[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2429-2444.

Research on Operational Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Support Equipment System

Yu Xiaolan¹, Xiong Wei^{1*}, Han Chi¹, Wu Zhenwei²

(1. University of Aerospace Engineering, Beijing 101400, China; 2. Beijing satellite navigation center, Beijing 100089, China)

Abstract: The operational effectiveness evaluation of space-based information support equipment systems has become a research hotspot in the military field. How to effectively deal with the nonlinear and confrontational problems of the operational effectiveness of the space-based information support equipment system has become a crucial issue in the development of the space-based information support equipment system. In this paper, a method for evaluating the operational effectiveness of the space-based information support equipment system based on the system dynamics (SD) model is presented. *The SD flow rate basic tree entry modeling method is used to establish the basic tree entry model of seven subsystems and finally form the SD model for the evaluation of the space-based information support equipment system. The operational effectiveness of the space-based information support equipment system is defined.* It is verified that the proposed method can effectively evaluate the operational effectiveness of the space-based information support equipment system and can play a supporting role in the scientific demonstration of equipment systems.

Keywords: space-based information support equipment system; system dynamics(SD); operational effectiveness evaluation; non-linear; dynamic

收稿日期: 2022-06-15 修回日期: 2022-08-24

基金项目: 国防科技重点实验室基金(XM2020XT1023)

第一作者: 于小岚(1998-), 男, 硕士生, 研究方向为作战效能评估. E-mail: yuxiaolan26@163.com

通讯作者: 熊伟(1971-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为网络信息体系. E-mail: 13331094335@163.com

0 引言

天基信息支援装备体系是指实现天基信息支援活动而依赖的武器装备体系,具体包含航天侦察监视,天基预警探测,卫星导航定位以及卫星通信等功能的航天器、地面站、控制站、以及它们集成的功能系统等^[1]。随着天基信息支援装备体系的不断发展,该装备体系的作战效能评估受到诸多学者的广泛关注。作战效能是用于衡量武器装备体系在作战过程中的重要程度,能够在一定程度上支持作战决策以及装备体系的建设发展,因此对其准确性与实时性提出了更高的要求。在诸多学者的努力下建立起了一套行之有效的评估方法体系^[2-5],随着天基信息支援装备体系的复杂性不断提升,评估工作面临着不少的问题。一方面天基信息支援装备体系结构与功能具备多样性,因此其指标与作战效能值之间的关系不能简单的用加和等线性关系进行描述,而是有着较强的非线性映射关系。另一方面天基信息支援装备体系在作战过程中其作用是动态变化的,因此在不同时刻其表现也是不同的,准确的评估工作需要充分考量其动态性。因此需要一种能够同时具备对非线性关系和动态过程进行量化描述的能力的作战效能评估方法。

系统动力学(system dynamics, SD)建模理论是由文献[6]提出,天基信息支援装备体系在遂行作战任务时,各型装备系统之间随着作战进程的推进,彼此之间的相互反馈与影响是不断变化的,而系统动力学可以通过对不同变量增加反馈与时间因素的方式,对以上的复杂关系进行描述,因此是研究该系统结构与行为的典型方法。相较于当下其他的评估方法,具有以下优/特点:

(1) SD方法对作战过程有着较好的刻画能力,在作战分析的基础上能够对天基信息支援装备体系这样一个复杂大系统的诸多子系统进行分析获得简单的相互关系图,为SD模型建立打下良好的基础。

(2) SD方法能够对作战过程进行动态刻画,使得作战效能评估的结果更准确、更具备实际参考价值。

目前,SD方法主要应用于经济、社会、生态等复杂系统问题^[7],而作战效能评估就是针对复杂系统的分析评估,因此该方法受到作战效能评估领域的广泛关注,文献[8-10]利用系统动力学针对C³I系统、网络空间指挥体系等进行了效能评估,证明了该方法的可行性。文献[11-14]针对不同的评估对象采用了系统动力学方法进行评估工作,不仅论证了其可行性,还在建模方法、模型验证上提供了方法上的指引。

综上所述,系统动力学方法不光在各类复杂系统问题中都有所应用,而且在作战效能评估领域的应用也是广受关注的。但是该方法在系统动力学的应用中多是以各项节点的数据变化情况对作战、装备等各项指标进行分析。未能针对某型装备体系的作战效能值做出具体的定义。

本文提出一种基于系统动力学的天基信息支援装备体系的作战效能评估方法,验证系统动力学在该领域的适用性,并且提出天基信息支援装备体系的作战效能值的定义,可以有效地支持该类装备体系的建设发展。

1 问题的提出与分析

1.1 问题描述

天基信息支援装备体系是一个复杂系统,显然这样一个复杂系统对于整个作战过程的影响不能简单用聚合、加权等线性的方式进行描述,其最终影响是一个复杂的非线性累积过程,此外这一过程不是单一的行为模型,而是作战双方博弈的过程,是具备一定的对抗性并且在时间维度上是动态变化的。因此其作战过程呈现极强的非线性、对抗性以及动态性。该问题是以复杂的天基信息支援装备体系为评估目标,以远程精确打击海上目标为评估场景,全面考虑天基信息支援装

备体系的各项因素, 揭示各项指标之间的相互关系, 最终获得准确的评估模型, 对该类装备体系的建设发展做出贡献。

1.2 系统分析

在明确问题的基础上, 对评估目标进行介绍与描述, 并以远程精确打击海上目标为作战场景对装备体系进行分析, 为建设 SD 模型提供基础。

1.2.1 系统描述

天基信息支援装备体系具备着装备种类复杂、建设成本高、子系统之间交互复杂、系统具备对抗性与动态性等特点, 如图 1 所示。系统动力学能够设置丰富的系统变量、利用存量流量图可以描述变量间的复杂交互关系、通过仿真实验可以实现全过程的对抗性与动态性描述。

1.2.2 相互关系分析

本文以远程精确打击海上目标为作战背景,

对天基信息支援装备体系应用过程进行相互影响分析, 为建立 SD 存量模型提供依据。

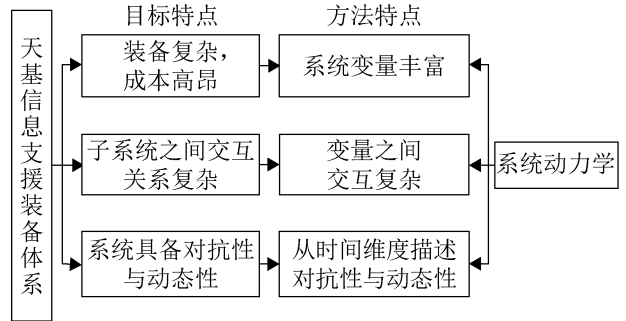


图 1 天基信息支援装备体系的特点
Fig. 1 Characteristics of space-based information support equipment system

首先, 将天基信息支援装备体系细分航天侦察监视、天基预警探测、卫星导航定位以及卫星通信四部分, 并将作战单元划分为火力打击系统、指挥控制系统, 以信息传递方向对各子系统之间的相互影响进行描述, 如图 2 所示。

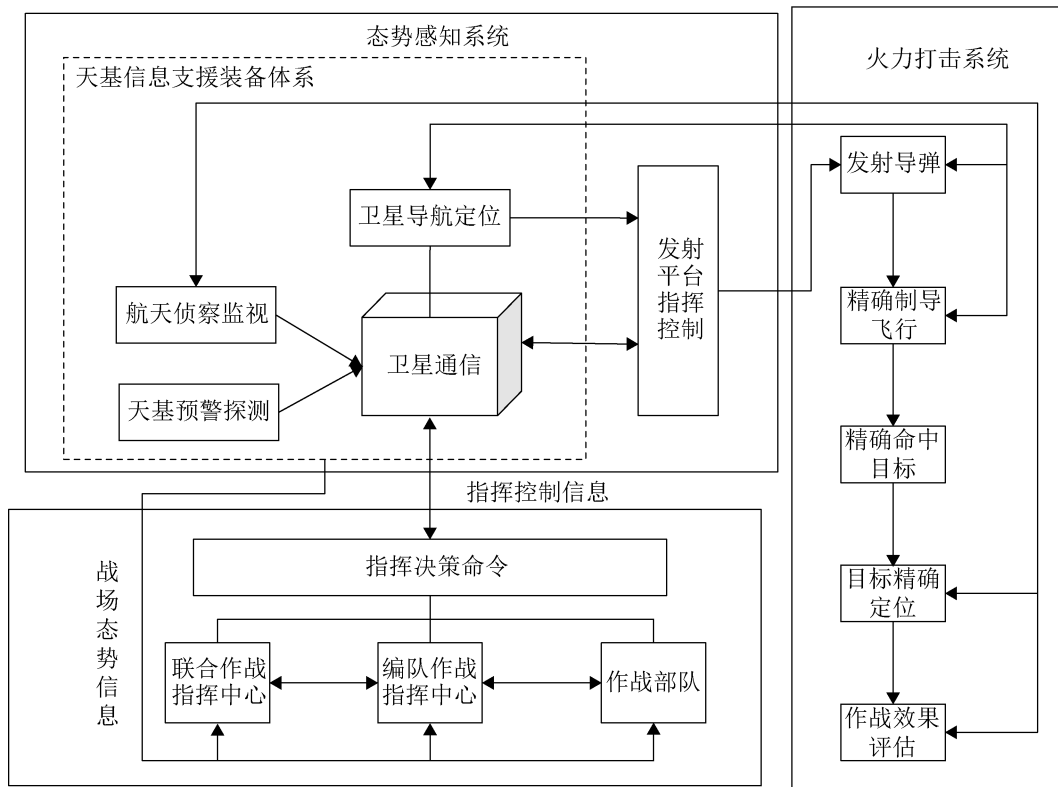


图 2 天基信息支援装备体系的远程精确打击任务作战过程
Fig. 2 Operational process of long-range precision strike mission of space-based information support equipment system

对图 2 所示的作战过程进行分析可以发现，天基信息支援装备体系的四部分在远程精确打击任务中主要参与的有航天侦察监视、卫星导航定位以及卫星通信三部分，按照能力划分为侦察监视能力、导航定位能力以及通信保障能力。其攻击系统对应的则是火力打击能力。因此通过简单分析可以发现，攻击系统的火力打击能力会受到

侦察监视能力、导航定位能力、通信保障能力、导弹部署位置、蓝方舰船移动速度、蓝方舰船干扰能力等因素的影响，并且蓝方舰船的生存概率则会反过来对红方的诸多子系统产生负面影响。因此在图 3 中绘制系统组件之间的相互关系图，其中负反馈和正反馈用箭头表示。

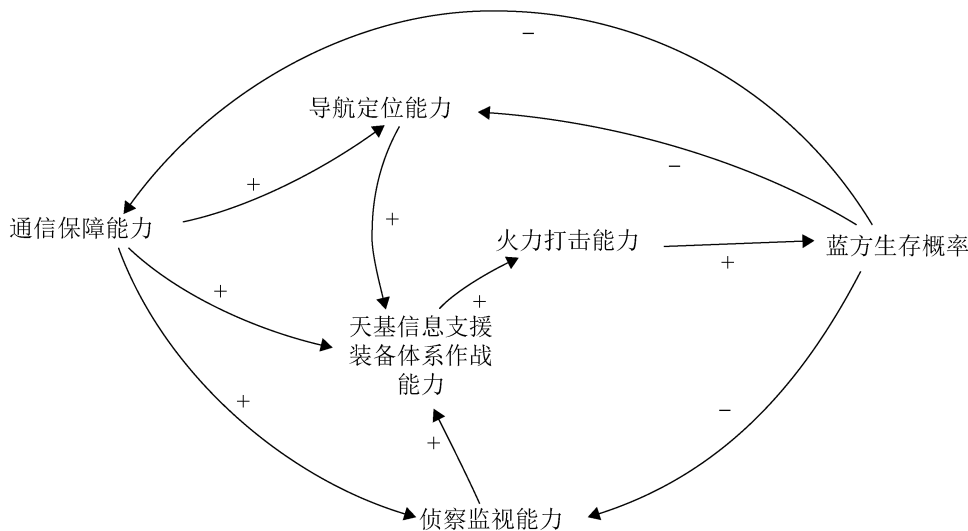


图 3 天基信息支援装备体系组件之间的相互关系

Fig. 3 Relationship among components of space-based information support equipment system

本节从系统的角度出发，对天基信息支援装备体系在作战过程中的相互影响进行描述，具体分析过程见模型构建部分。

2 基于SD的模型构建

SD主要用于了解和剖析系统问题、探究之间的反馈关系。它的主要原理是借助计算机技术对复杂系统进行反馈调控，研究系统中各项功能结构之间的反馈关系和动态变化。一方面，其探索问题过程中，可以将定性定量相结合，以系统整体为参考，剖析其中的反馈关系。另一方面，该方法对于整个系统的行为结构描述时，通常是以关系为基础，可以灵活设置以数学关系式为主的函数关系来描述系统之间的相互联系。因此能够很好地描述复杂的作战系统在作战过程中动态

的对抗性相互关系。

为准确地建立天基信息支援装备体系作战效能评估的SD模型，在1.2节的相互关系分析的基础上，本节首先构建天基信息支援装备体系的指标体系，然后在指标体系的基础之上采用SD流率基本入树的建模方法分别对各个子系统进行SD建模，最终将各个子系统进行嵌入操作形成最终的SD模型。

2.1 指标体系的构建与权重确立

天基信息支援装备体系的指标体系的构建需遵循以下原则：独立性、完备性、一致性以及客观性^[15]。以天基信息支援装备体系支援远程精确打击海上目标任务为背景，在指标体系确定的基础上将采用AHP(analytic hierarchy process)权重确立方法确立各项指标的权重，如图4所示。

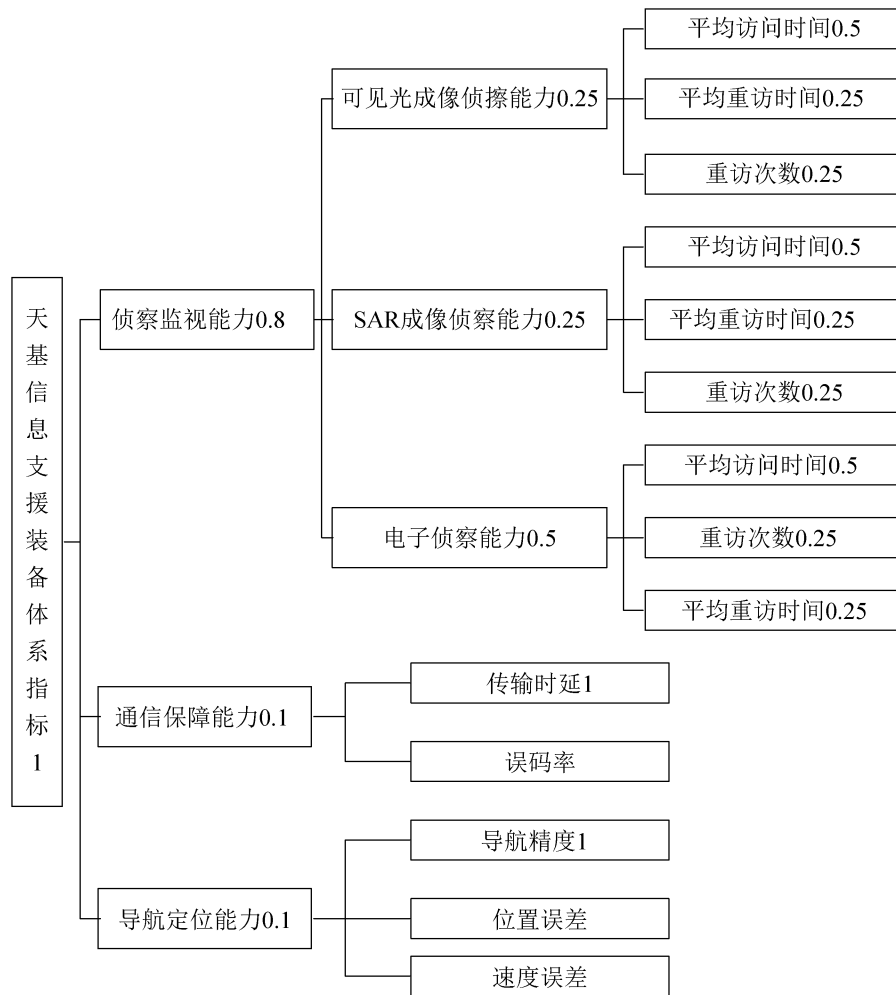


图4 天基信息支援装备体系的指标体系
Fig. 4 Indicator system of space-based information support equipment system

2.2 模型构建

一般的SD模型的建模过程是从相互关系分析图出发, 确定子系统中的存量流量, 并且设置变量, 确立经验公式, 该建模方式较为复杂, 大大增加了建模成本。本文采用基于SD简化流率基本入树模型^[16], 将系统分为多个子系统分别构建模型, 对各个子系统的模型进行整合形成最终的SD模型, 建模过程更加简化且准确, 提升SD模型中经验公式的准确性。

2.2.1 SD流率基本入树模型的基本概念

该方法是由文献[16]提出“SD流率基本入树建模法”, 该方法将系统划分为数个子系统, 并将

每一个子系统看作一个存量流量方程, 并设置辅助变量。将子系统视为树模型, 确立树根、入树等, 最终通过嵌入式操作, 将子系统树模型构建最终的系统流图模型。

流率基本入树定义: 若一个动态有向图 $T(t) = (V(t), X(t))$ 中, 存在一个点 $v(t)$, 使得 $T(t)$ 中的任一点 $u(t) \in V(t)$, 找到有且仅有一条从 $u(t)$ 到 $v(t)$ 的有向道路, 则称 $T(t)$ 为一颗入树。 $v(t)$ 称为树根, 满足入度 $d^-(u(t)) = 0$ 的 $u(t)$ 称为树尾, 树尾到树根的有向道路则称为一根树枝, 由树尾至树根含有的节点数目是这一枝的枝阶长度。若将速率变量称作树根, 状态变量看作树尾, 则可以称之为流率入树, 如图5所示。若其各枝阶长度为1的流率

入树则称之为流率基本入树。

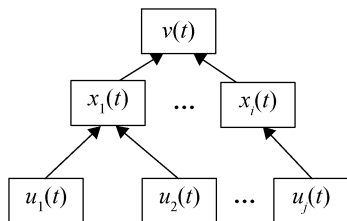


图 5 流率入树
Fig. 5 Tree entry of flow rate

建模步骤如下：

step 1: 基于相互关系图分析系统变量，确定存量-流量变量。

step 2: 按照系统的定义划分子系统，并为每个子系统建立流率基本入树，其中每棵树的树根为 $R_i(t)$ ，树尾为 $L_i(t)$ 到 $L_n(t)$ ， $A_1(t)$ 到 $A_m(t)$ 等为常量或辅助变量，如图 6 所示。

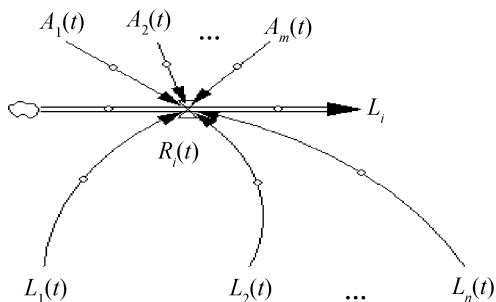


图 6 流率基本入树模型
Fig. 6 Basic tree entry model of flow rate

step 3: 将子系统的流图按照嵌入式操作形成最终的存量流量模型。

step 4: 使用系统模型进行仿真并对作战效能进行评估。

2.2.2 天基信息支援装备体系作战效能评估模型的构建

(1) 背景设置

将作战双方分为红蓝双方，蓝方派出舰船前往红方某海域游弋，红方在天基信息支援装备体系的支持下，发现蓝方舰船并针对其实施远程精确打击，蓝方舰船实施电子干扰企图躲避攻击。红蓝双方参与的武器装备如表 1 所示。

表 1 武器装备种类

Table 1 Types of weapons and equipment	
红方	蓝方
可见光成像侦察卫星	某型舰船
SAR 成像侦察卫星	雷达干扰机
电子侦察卫星	导航干扰机
通信卫星	
导航卫星	
某型导弹	

(2) 提出假设

根据背景设置，构建红蓝双方作战的模型，考虑到作战因素与作战关系的复杂性，为了能够抓住主要矛盾，尽可能准确的描述作战过程，需要对模型进行假定说明，具体有以下几点：

1) 文中构建的 SD 模型，对系统而言，影响因素是完备的；

2) 由于天基信息支援装备体系的支援作战过程是从侦察到打击结束，结合实际的舰船游弋速度，将红蓝双方对抗总时长设定为 120 h；

3) 蓝方舰船的生存概率低于 0.3 h，视为摧毁成功。

(3) 明确变量

根据红蓝双方的武器装备在作战过程中所发挥作用的的不同，将天基信息支援装备体系划分为 7 个子系统分别为可见光成像侦察系统、电子侦察系统、SAR 成像侦察系统、火力打击系统、蓝方舰船防御系统。

由 SD 理论可知，存量、流量是 SD 中的一个核心概念，存量也称为状态变量，是一种积累量，代表一个变量从初始值开始会随时间慢慢累积。而存量随时间变化的速度就是流量，流量是一个速率变量^[1]。在存量流量图中，除了状态变量以及速度变量，还存在辅助变量与常量。辅助变量是表示系统动态行为是的中间变量，它会随着系统内部变化而变化，而常量会对其他变量产生影响，却不会随着时间改变而改变。

结合子系统的划分以及辅助变量、常量的定义，对天基信息支援装备体系在远程精确打击过程中的变量进行分类，如表 2 所示。

表2 变量分类
Table 2 Variable classification

变量分类	含义	变量符号
状态变量	可见光成像侦察能力	L_1
	SAR 成像侦察能力	L_2
	电子侦察能力	L_3
	通信保障能力	L_4
	导航定位能力	L_5
	火力打击能力	L_6
	蓝方舰队生存概率	L_7
速率变量	可见光成像侦察能力变化率	R_1
	SAR 成像侦察能力变化率	R_2
	电子侦察能力变化率	R_3
	通信保障能力变化率	Q_1
	导航定位能力变化率	Q_2
	火力打击能力变化率	R_4
	蓝方舰队生存率变化率	Q_3
辅助变量	侦察监视效能	F_1
	信息支援能力	F_2
常量	蓝方雷达干扰系数	C_{16}
	蓝方电子干扰系数	C_{17}
	蓝方导航干扰系数	C_{18}
	蓝方舰船速度系数	C_{19}
	攻击系数	C_{20}
	防御系数	C_{21}
	侦察初始参数	C_{22}
	打击系数	C_{23}
	平均重访时间 1、2、3	C_1, C_4, C_7
	平均访问时间 1、2、3	C_2, C_5, C_8
	重放次数 1、2、3	C_3, C_6, C_9
	电磁环境干扰系数	C_{10}
	气象系数	C_{11}
	传输时延	C_{12}
导航精度	C_{13}	
红方导弹部署位置	C_{14}	

根据图 4 可知, 表 2 中底层指标 $C_1 \sim C_{11}$ 的指标权重分别为 $w=(0.1, 0.1, 0.2, 0.05, 0.05, 0.1, 0.05, 0.05, 0.1, 0.1, 0.1)$ 。

(4) 建立存量流量方程

结合子系统划分, 本节将针对 7 个子系统分别建立流率入树, 并且在此基础上结合确立的权重建立各树内的微分方程。

1) 可见光成像侦察系统

可见光成像侦察系统由可见光成像侦察卫星组成, 其侦察过程首先由电子侦察系统确定其具体范围, 进而由成像侦察卫星进行成像, 这一过程易受到天气的影响。因此建立如图 7 所示的流率基本入树, 可见光成像侦察能力的方程可以表达为

$$L_1 = R_1 t \tag{1}$$

$$R_1 = \begin{cases} 0, L_3 \leq C_{22} \\ (\omega_2 C_2 + \omega_5 C_3 - \omega_4 C_1) C_{11}, L_3 > C_{22} \end{cases} \tag{2}$$

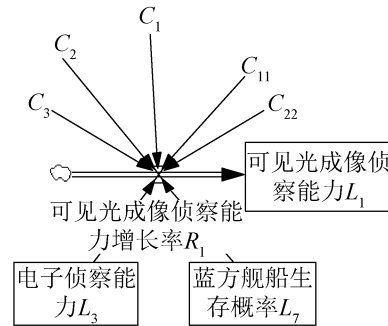


图 7 可见光成像系统的流率基本入树

Fig. 7 Basic tree entry of flow rate of light imaging system

2) SAR 成像侦察系统

SAR 成像侦察系统由成像侦察卫星组成, 其侦察过程同样受到电子侦察系统的影响, 此外还受到蓝方防御系统的干扰影响, 在一定程度上受到舰船的运动速度影响。因此建立如图 8 所示的流率基本入树, SAR 成像侦察能力的方程可以表达为

$$L_2 = R_2 t \tag{3}$$

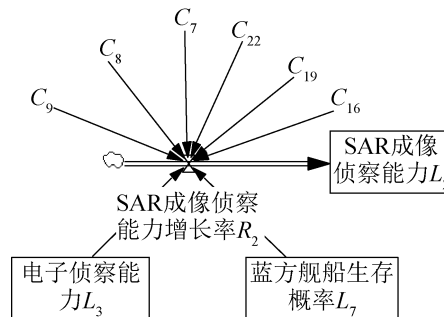


图 8 SAR 成像侦察系统的流率基本入树

Fig. 8 Basic tree entry of flow rate of SAR imaging reconnaissance system

$$R_2 = \begin{cases} 0, L_3 \leq C_{22} \cup L_7 \leq 0.3 \\ (\omega_9 C_8 + \omega_{11} C_9 - \omega_{10} C_7), L_3 > C_{22} \cap L_7 = 1 \\ (\omega_9 C_8 + \omega_{11} C_9 - \omega_{10} C_7) / C_{19} C_{16} L_7^2, \\ L_3 > C_{22} \cap L_7 < 1 \end{cases} \quad (4)$$

3) 电子侦察系统

电子侦察系统由电子侦察卫星构成，其侦察过程会面临海洋复杂的电磁环境干扰，与此同时还会受到蓝方防御系统的电子干扰。因此建立如图 9 所示的流率基本入树，电子侦察能力的方程可以表达为

$$L_3 = R_3 t \quad (5)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0, L_7 \leq 0.3 \\ (\omega_6 C_5 + \omega_8 C_6 - \omega_7 C_4) C_{10} (1 - C_{17} L_7), \\ 0.3 < L_7 < 1 \\ (\omega_6 C_5 + \omega_8 C_6 - \omega_7 C_4) C_{10}, L_7 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

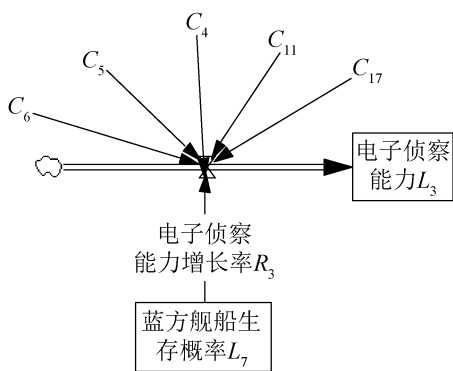


图 9 电子侦察系统的流率基本入树
Fig. 9 Basic tree entry of flow rate of electronic reconnaissance system

4) 通信保障系统

通信保障系统由通信卫星星座构成，其通信保障对侦察系统、导航定位系统均有不同程度的影响，受到传输时延的影响以此同时受到蓝方防御系统的通信干扰。因此建立如图 10 所示的流率基本入树，通信保障能力的方程可以表达为

$$L_4 = 1 - Q_1 t \quad (7)$$

$$Q_1 = \begin{cases} 0, L_7 \leq 0.3 \cup L_7 = 1 \\ C_{12} + C_{17}, 0.3 < L_7 < 1 \end{cases} \quad (8)$$

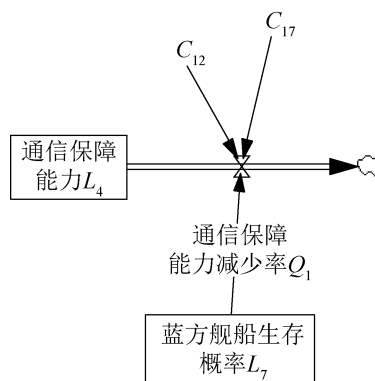


图 10 通信保障系统的流率基本入树
Fig. 10 Basic tree entry of flow rate of communication assurance system

5) 导航定位系统

导航定位系统由导航卫星星座构成，不仅在导弹制导过程中起作用，还能对敌方位置定位，其导航过程中会受到蓝方防御系统的导航干扰，以此减少火力打击。因此建立如图 11 所示的流率基本入树，导航定位能力的方程可以表达为

$$L_5 = C_{13} - Q_2 t \quad (9)$$

$$Q_2 = \begin{cases} 0, L_7 \leq 0.3 \cup L_7 = 1 \\ C_{18} L_7 (1 - L_4), 0.3 < L_7 < 1 \end{cases} \quad (10)$$

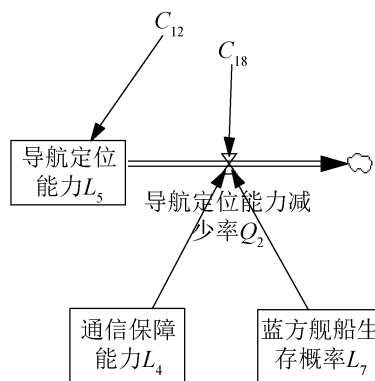


图 11 导航定位系统的流率基本入树
Fig. 11 Basic tree entry of flow rate of navigation and positioning system

6) 火力打击系统

火力打击系统由导弹阵地组成，其主要受到导弹部署位置、蓝方舰船速度，信息支援能力的影响。因此建立如图 12 所示的流率基本入树。火

力打击系统的方程可以表达为

$$L_6 = R_4 t \quad (11)$$

$$R_4 = \begin{cases} 0, L_7 \leq 0.3 \cup F_2 \leq C_{23} \\ F_2 C_{20} (1 - C_{14}/1000)(1 - C_{19} L_7), F_2 > C_{23} \end{cases} \quad (12)$$

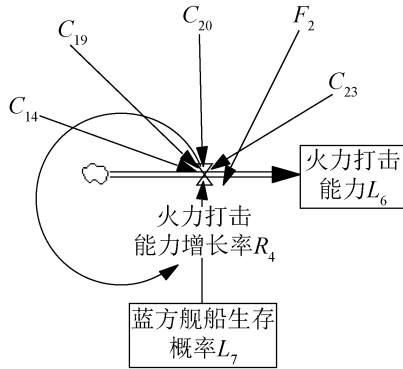


图 12 火力打击系统的流率基本入树

Fig. 12 Basic tree entry of flow rate of fire strike system

7) 蓝方防御系统

蓝方防御系统主要是以蓝方舰船生存概率为基本组成, 其会直接受到火力打击系统的影响, 自身会对红方进行信息干扰从而减少火力打击。因此建立如图 13 所示的流率基本入树, 蓝方舰船生存概率的方程可以表达为

$$L_7 = 1 - Q_3 t \quad (13)$$

$$Q_3 = \begin{cases} 0, L_7 \leq 0.3 \\ L_6 (1 - L_7 C_{21}), 0.3 < L_7 \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

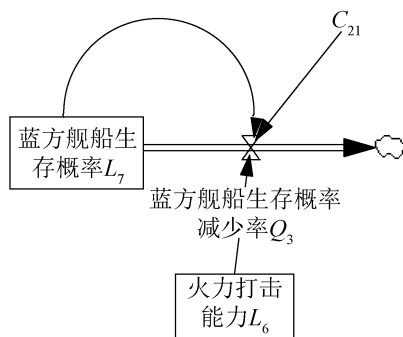


图 13 蓝方防御系统的流率基本入树

Fig. 13 Basic tree entry of flow rate of blue defense system

(5) 模型的参数设置

基于上述建模, 对天基信息支援装备体系子

系统的流率基本入树模型参数设置如下:

- 1) 天基信息支援装备体系的指标常量由仿真数据获取, 作为模拟仿真变量;
- 2) 电磁环境干扰系数与气象系数具备随机因素, 故采用的随机变量的形式表示, 作为概率值对速率变量产生随机影响;
- 3) 辅助变量 F_1, F_2 的设定结合实际作战过程会受到相关变量的影响而变化;
- 4) 相关的常量参数根据专家经验以及相关资料的查询验证进行设置, 如表 3 所示。

表 3 相关常量参数设置

Table 3 Related constant parameter settings

常量	参数设置(无量纲)
导弹部署位置	800
蓝方雷达干扰系数	10
蓝方舰船速度系数	0.4
蓝方电子干扰系数	1
蓝方导航干扰系数	5
攻击系数	0.01
防御系数	0.5
侦察初始参数	2
打击系数	4

(6) 构建总存量流量图

在最终的存量流量模型中, 为了更好的描述子系统之间的相互关系, 结合天基信息支援装备体系的指标体系, 在最终的模型嵌入中增添了 2 个辅助变量为子系统之间的相互关系搭建桥梁。

1) 侦察监视能力: 其目的是将可见光侦察、SAR 侦察、电子侦察的能力相结合, 并且描述了其侦察效果受到通信保障能力的影响。

2) 信息支援能力: 其目的是将侦察监视能力、通信保障能力与导航定位能力融合, 从而对火力打击系统产生影响。

综上所述, 为了更好关注红蓝双方的对抗关系, 建立了天基信息支援装备体系支援远程精确打击的作战效能评估的总流量存量图, 如图 14 所示。

在存量流量图的基础上, 利用 Vensim 软件对

红蓝对抗下的天基信息支援装备体系进行系统动力学仿真。通过以不同作战想定作为输入，以火力打击能力、蓝方生存概率等指标作为输出对天

基信息支援装备体系的作战效能进行分析验证。并在此基础上对天基信息支援装备体系的作战效能作出定义。

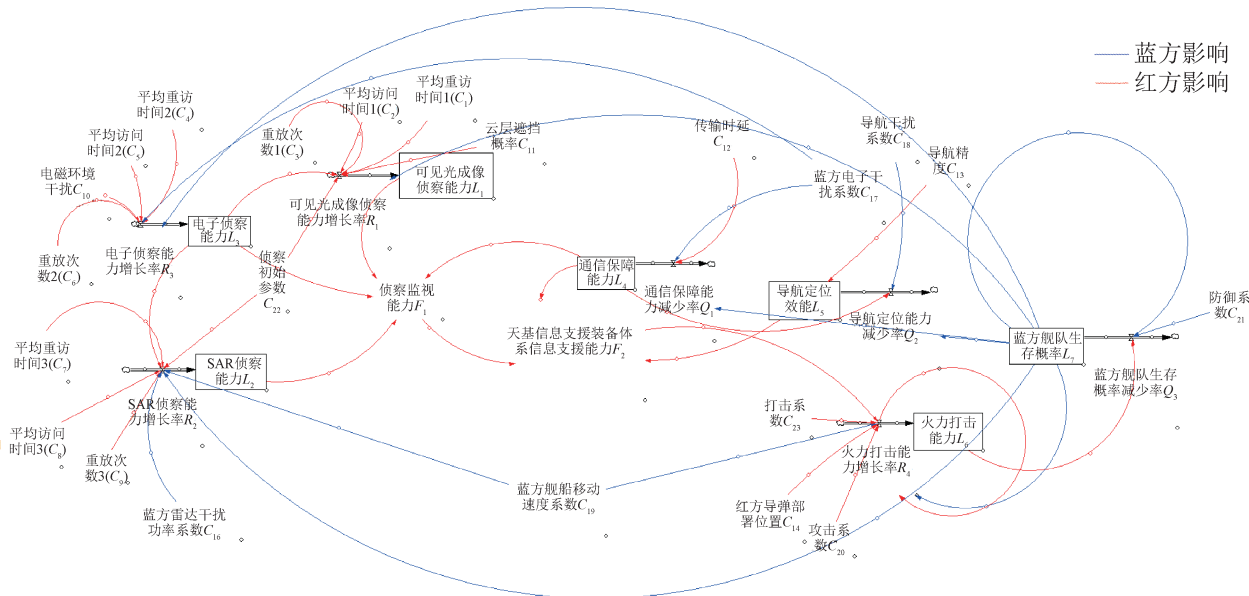


图 14 天基信息支援装备体系作战效能评估的 SD 模型

Fig. 14 SD model for evaluating operational effectiveness of space-based information support equipment system

2.3 天基信息支援装备体系的作战效能定义

根据本文基本假设，其打击过程包含了初期侦察阶段以及火力对抗阶段，而天基信息支援装备体系贯穿了全过程。为准确地描述其作战效能，本文将借鉴“针对时敏目标的杀伤链”^[17]。它是建立在观察-判断-决策-行动(observe-orient-decide-act, OODA)概念的基础上形成的特定作战概念，杀伤链分为发现、锁定、跟踪、定位、交战、评估6个阶段。

根据以上6个阶段，可以发现，对于天基信息支援装备体系的作战效能定义可以从2个方面出发：①体现在信息支援下火力打击杀伤链的闭环环路时长，②体现在面对蓝方干扰时表现出来的抗干扰能力上。作战能力为

$$\beta_{\text{作战效能}} = \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_{\text{best}}} \times 0.5 + \frac{F_2 - C_{23}}{F_{2\text{best}} - C_{23}} \times 0.5 \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中： T_0 为从杀伤链时间长度出发，仿真总时长； T 为模型仿真过程中，从开始侦察到打击结束花费的闭环环路时长； T_{best} 为对该作战过程做出最佳状态下完成打击的时间； C_{23} 为信息支援能力达到火力打击标准时的标准线； F_2 为最终完成打击时的信息支援能力值； $F_{2\text{best}}$ 为在最佳方案下的信息支援能力值。

3 实验验证分析

本文采用STK与Matlab进行联合仿真获取指标数据作为SD模型的输入，并以Vensim软件对SD模型进行驱动，结合对天基信息支援装备体系的作战效能定义实现对于天基信息支援装备体系作战效能评估的SD模型的验证与分析。其中实验模拟时间为120h，时间步长为1h，选取典型作战案例进行分析验证，获取丰富样本数据为后续作战效能评估的研究打下良好基础。

3.1 仿真场景获取数据

为了确保获取到丰富的仿真数据, 将结合具体相关资料以及作战实际, 确定支援方案所用到的侦察卫星平台、通信卫星平台和导航卫星星座, 以及相关的载荷性能、攻击武器等组成要素, 其具体组成如表 4~6 所示。

表 4 光学成像卫星的载荷参数

Table 4 Load parameters of optical imaging satellite

编号	半视场角/(°)	最大侧摆/(°)
G_1	15	25
G_2	15	20
G_3	20	25
G_4	20	20
G_5	15	30

表 5 电子侦察卫星的载荷参数

Table 5 Payload parameters of electronic reconnaissance satellite

编号	覆盖幅宽/km	位置误差/m
D_1	2 000	1
D_2	3 000	1.5
D_3	2 500	1
D_4	4 000	2

表 6 雷达成像卫星的载荷参数

Table 6 Payload parameters of radar imaging satellite

编号	俯仰角范围/(°)	排除角范围/(°)
S_1	30~60	45,45
S_2	35~65	50,40
S_3	40~60	45,45
S_4	30~65	45,45

为了对天基信息支援装备体系的各项武器装备进行作战性能分析, 本文针对以上的载荷参数列表, 并且考虑到评估对象涉及到不同卫星类型, 将对不同类型的卫星进行数量上的变化搭配。对导航卫星选用策略是无失效卫星、3 颗卫星失效以及 6 颗卫星失效, 对光学成像卫星、电子侦察卫星与 SAR 雷达卫星则采用抽取固定数量的卫星参与作战的方式形成不同的作战方案如表 7 所示。总方案数为 $16 \times 5 \times 5 \times 3 = 1\ 200$, 故设定共 1 200 种作战方案。

表 7 作战方案组成方式

Table 7 Composition of operational plans

方案	光学成像	电子成像	雷达成像	导航卫星缺失
1	$G_1 G_2 G_3$	$D_1 D_2 D_3$	$S_1 S_2 S_3$	6
2	$G_1 G_2 G_4$	$D_1 D_2 D_4$	$S_1 S_2 S_4$	4
3	$G_1 G_2 G_5$	$D_1 D_3 D_4$	$S_1 S_3 S_4$	0
4	$G_1 G_2 G_4$	$D_2 D_3 D_4$	$S_2 S_3 S_4$	
5	$G_1 G_2 G_5$	$D_1 D_2 D_3 D_4$	$S_1 S_2 S_3 S_4$	
6	$G_1 G_4 G_5$			
7	$G_2 G_2 G_4$			
8	$G_2 G_2 G_5$			
9	$G_2 G_4 G_5$			
10	$G_3 G_4 G_5$			
11	$G_1 G_2 G_3 G_4$			
12	$G_1 G_2 G_3 G_5$			
13	$G_1 G_2 G_4 G_5$			
14	$G_1 G_4 G_4 G_5$			
15	$G_2 G_4 G_4 G_5$			
16	$G_1 G_2 G_4 G_4 G_5$			

目标区域为蓝方舰船的活动区域, 包括的海洋与岛屿等环境, 其仿真时间为 120 h, 经过模拟仿真, 共获得 1 200 组不同编配方案的底层指标数据, 进行归一化处理以后如表 8 所示。

表 8 作战方案的指标值

Table 8 Indicator values for operational plans

指标	方案					
	1	2	3	4	...	1 200
C_1	0.61	0.61	0.61	0.61	...	0.79
C_2	0.63	0.63	0.63	0.63	...	0.79
C_3	0.83	0.83	0.83	0.83	...	1
C_4	1.00	1.00	0.97	0.96	...	0.52
C_5	0.73	1.00	0.69	0.50	...	0.73
C_6	0.64	0.50	0.57	0.54	...	1.00
C_7	1.00	1.00	1.00	1.00	...	0.50
C_8	0.50	0.50	0.50	0.50	...	0.89
C_9	0.50	0.50	0.50	0.50	...	1.00
C_{10}	0.27	0.27	0.27	0.27	...	0.27
C_{11}	1.00	1.00	1.00	1.00	...	0.50

3.2 模型检验

模型测试的目的是检测模型的结构行为是否与现实经验一致, 主要方法包括直观检验, 运行检验, 历史检验等方法。本文将选取直观检验与运行检验两种方式进行模型检验。

3.2.1 直观检验

该方法主要是通过对相关资料的查阅，并对作战过程进行分析，以此检验模型与该装备体系在实际作战任务中的内部机制是否一致，因果关系是否合理等问题。

根据上文中作战方案的设置，选取方案序号为400的作战方案，该方案下的所有卫星均处于全负荷运行状态。以方案400为例，对模型进行模拟仿真，其结果如图15所示。

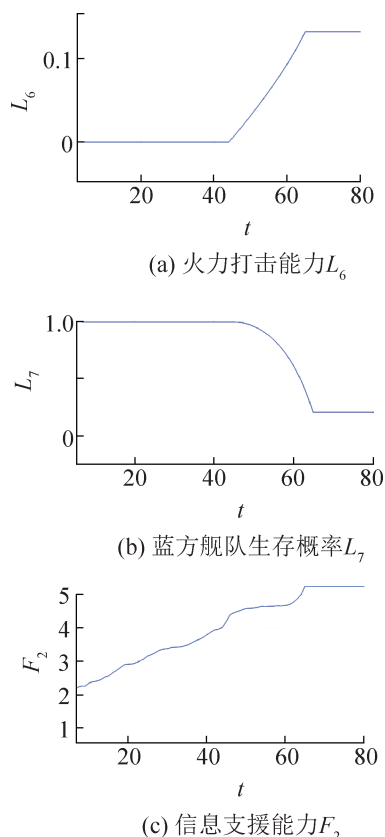


图15 方案400的仿真结果

Fig. 15 Simulation results of Plan 400

由火力打击能力 L_6 与蓝方舰队生存概率 L_7 的变化趋势可以发现，进入到第45个时间单位侦察效果达到打击要求，开始对蓝方舰船进行攻击，于64个时间单位结束战斗。

由信息支援能力 F_2 变化趋势可以看出，从侦察开始受到电磁环境干扰与气候影响，信息支援能力一直有所波动。于第45个时间单位信息支援能力上升趋势增大，反映了在电子侦察探测到蓝

方舰船后可见光成像侦察与SAR成像侦察参与到侦察任务中这一过程。在第45个时间单位时，蓝方舰船受到对红方干扰较为明显，随着时间的流逝其受到破坏的程度加深，其干扰性能下降，红方的火力打击逐渐提高直至击毁蓝方舰船。

通过以上的作战分析可以发现该SD模型能够较为真实的反应整个远程精确打击的作战过程。

3.2.2 运行检验

由于天基信息支援装备体系在作战任务中的影响因素较多且相互之间关系复杂，因此具有对参数变动不敏感以及对作战策略变动的抵抗性等特点，所以SD模型具备稳定性。

由天基信息支援装备体系的指标体系和存量流量方程可知，可见光成像侦察、SAR成像侦察以及电子侦察的3种指标(平均访问时间、平均重访时间、重访次数)在性质上是一致的，故在进行运行检验分析时以可见光成像侦察的平均访问时间为例，对天基信息支援装备体系的SD模型进行运行检验，以天基信息支援装备体系信息支援能力为因变量，对平均访问时间进行仿真，将该变量的值以0.1为步长从0.1到0.9，以1~9进行排序。其结果如图16所示。

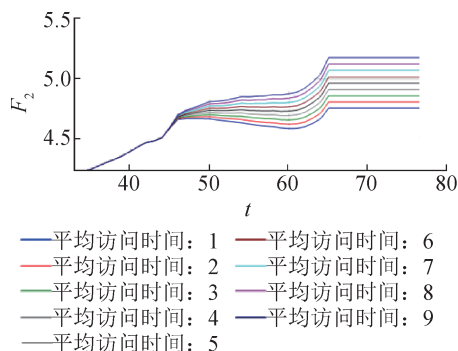


图16 平均访问时间的敏感性分析

Fig. 16 Sensitivity analysis of average visit time

由图16可以发现，对于不同的变量值 F_2 ，信息支援能力虽然所呈现的值有所不同，但是变量未出现不稳定的地方。

3.2.3 模型检验分析

本文采用了直观检验与运行检验两种方式对

天基信息支援装备体系作战效能评估的SD模型进行验证, 结果表明, 该SD模型在一定场景下具备真实且稳定的反映天基信息支援装备体系的作战过程的能力。与此同时, 也验证了SD方法在作战效能评估领域中, 能够针对不同的评估对象, 在作战过程分析的基础上, 结合相关领域资料构建出合理可靠的作战效能评估模型。

因此SD方法所建立的作战效能评估模型可以在一定程度上反映同天基信息支援装备体系相似的复杂装备体系在一定作战场景下的作战过程。

3.3 仿真分析

远程精确打击海上目标的过程中, 天基信息支援装备体系主要用到了侦察监视系统以及导航定位系统, 为了对这2个子系统的武器装备进行作战效能分析, 将根据每个系统自身的装配情况, 从仿真数据中获取的作战方案中选出典型的作战方案想定, 针对这2个子系统的装备进行分析讨论。

3.3.1 侦察监视系统

侦察监视系统包含了电子侦察、可见光成像侦察、SAR成像侦察3个主要功能模块。

(1) 可见光成像侦察: 从5个可见光成像卫星中选取4个卫星进行信息支援任务, 以此分析每一颗卫星对于信息支援任务的影响。其余武器装备选择以方案400为准。故选取方案25、50、75、100、125、400。

(2) SAR成像侦察: 从4颗SAR成像侦察卫星中选取3颗卫星进行信息支援任务, 其余武器装备的选择以方案400为准。故选取方案396、397、398、399、400。

(3) 电子侦察: 从4颗电子成像侦察卫星中选取3颗卫星进行信息支援任务, 其余武器装备的选择以方案400为准。故选取方案380、385、390、395、400。

可见光成像侦察、SAR成像侦察、电子侦察关于卫星选择、卫星成像的分析以及作战效能的情况见表9, 10及图17所示。

表9 卫星的选择

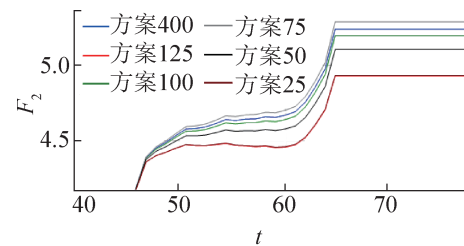
Table 9 Selection of satellites

方案 序号	缺失 卫星	方案 序号	缺失 卫星	方案 序号	缺失 卫星
25	G_5	396	S_1	380	D_4
50	G_4	397	S_2	385	D_3
75	G_3	398	S_3	390	D_2
100	G_2	399	S_4	395	D_1
125	G_1	400	无	400	无
400	无				

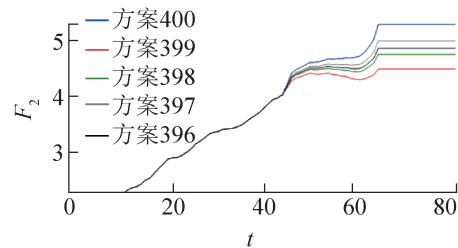
表10 作战效能值

Table 10 Operational effectiveness

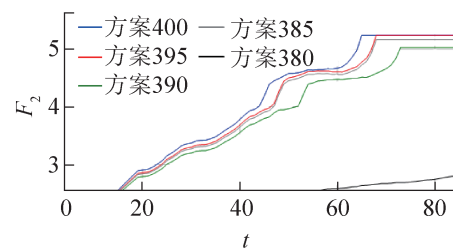
方案 序号	作战 效能值	方案 序号	作战 效能值	方案 序号	作战 效能值
25	0.87	396	0.83	380	0
50	0.95	397	0.88	385	0.95
75	0.99	398	0.78	390	0.88
100	0.98	399	0.68	395	0.98
125	0.87	400	1	400	1
400	1				



(a) 可见光成像卫星



(b) SAR成像卫星



(c) 电子侦察卫星

图17 卫星分析

Fig. 17 Analysis of satellites

由图17(a)可见,结合方案设定,编号为 G_1 与 G_5 的卫星的对 F_2 的值影响较大,且在进入作战对抗阶段时对于抗干扰能力的影响也是最大的,故针对卫星 G_1 与 G_5 性能的提升能够对最终信息支援能力的提升有更大的效益,其中,方案25,125走势基本一致。

由图17(b)可见,可以发现缺失卫星 S_4 对于天基信息支援装备体系的信息支援能力影响是最大的。并且可以发现在进行对抗干扰过程中卫星 S_4 的缺失使得天基信息支援装备体系的抗干扰能力有较大程度的下降,因此在作战方案制定过程中优先保障卫星 S_4 会使得任务的执行效果大大提升。

由图17(c)可见,编号为 D_4 的卫星缺失对于天基信息支援装备体系的信息支援能力有着巨大的影响,根据作战过程分析可以发现,该信息支援任务是由电子侦察作为主导的协同侦察任务,因此卫星 D_4 的缺失使得电子侦察系统在既定的时间范围内未能及时发现舰船,致使最终蓝方舰船的逃脱,故在作战方案的制定过程中必须优先保障卫星 D_4 。

3.3.2 导航定位系统

导航定位系统是由24颗卫星组成的卫星星座,为了将其对天基信息支援装备体系的信息支援能力进行分析,本文在将随机去除6和3颗卫星,即方案1200和方案800,以分析讨论其性能的下降对于最终的能力值的影响,结果如图18所示,作战效能值如表11所示。

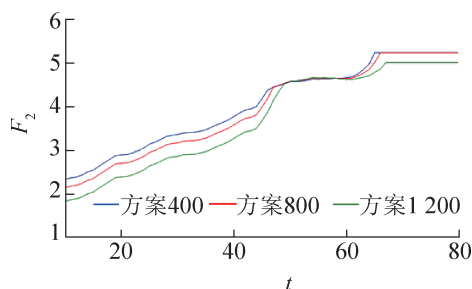


图18 导航定位卫星的分析

Fig. 18 Analysis of navigation and positioning satellites

表11 作战效能值

Table 11 Operational effectiveness			
方案序号	400	800	1200
作战效能值	1	0.99	0.90

如图18所示,导航卫星星座的卫星缺失数量在3颗时,其信息支援能力差距并不大,仅仅是在任务完成时间上有轻微的延后,但是对于整体作战效果影响不大。但是当卫星缺失数量达到6颗时,其信息支援能力在开始对抗时明显乏力,其抗干扰能力大大下降,以至于其信息支援能力大打折扣。故在作战过程中尽可能减少导航卫星的故障率是较为重要的,其故障数目最好控制在3颗以内。

4 结论

本文提出一种基于系统动力学模型的天基信息支援装备体系作战效能评估方法。将侦察打击时间的占比与信息支援能力 F_2 的按权重的累加和作为作战效能的评价指标。仿真模拟结果显示,在远程精确打击任务中天基信息支援装备体系的各个子系统对于作战任务都有着不用程度的影响,其中电子侦察系统有着至关重要的影响。在此基础上对可见光成像卫星、SAR成像卫星以及导航定位卫星在典型作战方案中的不同表现进行分析,对作战方案做出了建议意见。本文对2个重要的子系统的几个典型作战方案进行了仿真分析,其分析结果对于作战方案的制定与优先级的确立有指导意义。

虽然本文采用了直观检验与运行检验对模型进行了检验分析,但是由于仿真系统获取数据的局限性,该模型在方程的确立、权重的准确性、相互关系的分析上仍旧存在局限性。因此未来研究及改进的地方有以下几点:

(1) 指标权重的确立上,没有考量指标与指标之间的相互关系,未来可以在指标的相互关系上进行分析,使得仿真结果更加接近于复杂的现实场景。

(2) 模型参数的设置上, 在专家经验的基础上, 将详细仿真(即建立更加具体化的仿真实体)与SD模型相结合进行互相验证, 使得模型更加完善且合理。

(3) 系统动力学的方法能够大量的产生作战效能数据, 但是对于大批量的作战方案的推理分析有着较大的困难, 未来的研究方向可以向着依据SD模型所产生的大量仿真数据, 进行贝叶斯网络学习, 利用贝叶斯网络对动态数据分析推理的能力, 对天基信息支援装备体系的建设发展提出指导性意见。

参考文献:

- [1] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 138-143.
Li Deren, Shen Xin. Research on the Development Strategy of Real-time and Intelligent Space-based Information Service System in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 138-143.
- [2] 梁家林, 熊伟. 基于作战环的武器装备体系能力评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(8): 1810-1819.
Liang Jialin, Xiong Wei. Capabilities Assessment of the Weaponry System Based on Combat Ring[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1810-1819.
- [3] 韩驰, 熊伟, 刘文文, 等. 基于结构方程模型的天基信息系统效能评估[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(8): 1799-1810.
Han Chi, Xiong Wei, Liu Wenwen, et al. Effectiveness Evaluation Method of Space-based Information Systems Based on SEM[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(8): 1799-1810.
- [4] 胡笛, 李浩悦, 李健. 基于改进支持向量回归机的天基信息系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(7): 78-82.
Hu Di, Li Haoyue, Li Jian. Research on Effectiveness Evaluation of Space-based Information System Based on the Improved SVR[J]. Fire Control & Command Control, 2020, 45(7): 78-82.
- [5] 韩驰, 熊伟. 基于改进灰狼算法优化SVR的航天侦察装备效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(10): 2902-2910.
Han Chi, Xiong Wei. Operational Effectiveness Evaluation of Space Reconnaissance Equipment Based on SVR Optimized by Improved Grey Wolf Optimizer [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(10): 2902-2910.
- [6] 钟永光, 贾晓菁, 李旭, 等. 系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] 贾书伟, 严广乐. 基于SD-GM循环预测理论的机动车污染物收费政策效应分析[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(9): 2436-2450.
Jia Shuwei, Yan Guangle. Effects of the Policy of Air Pollution Charging Fee Based on System Dynamics and Grey Model Approach[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2019, 39(9): 2436-2450.
- [8] 杨兵, 陈树江, 陈希. 基于系统动力学的网络空间联合应急处置指挥体系效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(12): 118-122.
Yang Bing, Chen Shujiang, Chen Xi. Effectiveness Evaluation of Command System of United Emergency Disposal in Cyberspace Based on System Dynamics[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018, 39(12): 118-122.
- [9] 孔红山, 张明清, 唐俊. 系统动力学C³I系统作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(8): 60-63.
Kong Hongshan, Zhang Mingqing, Tang Jun. Operational Effectiveness Assessment of C³I System Based on System Dynamics[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(8): 60-63.
- [10] 欧阳帅捷. 基于系统动力学的海上信息系统效能评估[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
Ouyang Shuaijie. Operational Effectiveness Evaluation of Maritime C⁴Isr System Based on System Dynamics [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.
- [11] 翟豆豆. 基于系统动力学的装备体系建模与仿真[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
Zhai Doudou. Equipment System Modeling and Simulation Based on System Dynamics[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.
- [12] 潘星, 左督军, 张跃东. 基于系统动力学的装备体系贡献率评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 112-120.
Pan Xing, Zuo Dujun, Zhang Yuedong. Contribution Rate Evaluation Method of Equipment System-of-systems Based on System Dynamics[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 112-120.
- [13] 陈国卫, 周雨菁, 任蕾. 面向系统性能最大化的装备经费结构SD优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(4): 1022-1029.
Chen Guowei, Zhou Yujing, Ren Lei. SD Optimization of Equipment Cost Structure Facing System Performance Maximization[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(4): 1022-1029.
- [14] Jia Niping, Yang Zhiwei, Yang Kewei. Operational

- Effectiveness Evaluation of the Swarming UAVs Combat System Based on a System Dynamics Model[J]. IEEE Access, 2019, 7: 25209-25224.
- [15] 韩驰, 熊伟. 航天侦察装备体系指标关联信息挖掘研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2372-2380.
Han Chi, Xiong Wei. Research on Association Information Mining of Space Reconnaissance Equipment System Index[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2372-2380.
- [16] 贾仁安, 伍福明, 徐南孙. SD流率基本入树建模法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 18(6): 18-23.
Jia Renan, Wu Fuming, Xu Nansun. Modeling of RATE Variable Fundamental in Tree for System Dynamics[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1998, 18(6): 18-23.
- [17] 黄汉文. 移动目标打击链研究[J]. 航天电子对抗, 2015, 31(2): 27-30.
Huang Hanwen. Study on Kill Chain of Moving Target [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2015, 31(2): 27-30.