

硕 士 学 位 论 文

面向海上搜寻的遥感卫星系统效能评估方法 研究

**Research on the effectiveness evaluation method of remote sensing
satellite system for maritime search**

作 者 姓 名：_____周文博_____

学 科 专 业：_____信息与通信工程_____

学 号：_____1120200268_____

指 导 教 师：_____赵明_____

学 位 类 别：_____工学硕士学位_____

培 养 单 位：_____信息科学技术学院_____

答 辩 时 间：_____2023 年 6 月_____

大连海事大学

Dalian Maritime University

摘 要

随着我国卫星事业的蓬勃发展,使用遥感卫星实现全海域的遇险船舶搜寻逐渐成为了一种海上救援问题的解决手段。然而对于单颗遥感卫星来说,其携带载荷的成像范围较小,载荷类型有限,并且对一个固定区域的重访能力比较差,因此无法对海上遇险船舶进行有效搜寻。所以使用多颗遥感卫星组成的遥感卫星系统对海上遇险船舶进行搜寻可以有效地解决这个问题。

由于现有的遥感卫星众多,所以如何选取多颗遥感卫星组成搜寻系统,并最大化对一个区域的搜寻能力成为了搜寻任务的首要问题,因此需要对多颗遥感卫星执行搜寻任务的任务效能进行评估。在评估之前需要分析搜寻任务的具体需求与执行流程,从执行流程出发对任务对象进行划分,并结合任务对象之间的联系以及任务具体需求对效能评估体系进行构建。所以本文主要研究工作如下:

构建了面向海上遇险船舶搜寻的遥感卫星系统效能评估体系。详细介绍了遥感卫星系统的工作方式以及执行搜寻任务的具体流程。基于信息精确性、信息时效性、信息探测性、信息表现性四个维度构建了效能评估体系,建立了目标识别能力、卫星搜寻能力、任务响应能力、重访能力、覆盖能力、搜寻幅宽、图像质量共七个能力指标,详细介绍了各指标的计算方法以及影响因素。使用层次分析法建立了多指标的综合评估方法。

开发了海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件。针对搜寻任务工作流程,介绍了遥感卫星系统、地面站系统、搜寻船舶三类对象在任务仿真中需要考虑的模型。包括:卫星平台模型、卫星载荷模型、地面站模型、遇险船舶模型,并结合 STK 仿真软件设计了各模型对象的仿真模块。通过利用 STK 的 API 函数得到仿真数据,并设计了数据处理模块,包括可见性时间数据计算模块、区域覆盖性计算模块以及对象距离计算模块。根据海上遇险船舶搜寻任务的执行流程,依据可见性时间数据设计了任务仿真流程模块。结合所有设计的模块完成了遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件总体架构的设计。

开展了民用遥感卫星协同搜寻遇险船舶的仿真研究。通过查找相关资料,选取了 30 颗典型民用遥感卫星,五个地面站以及太平洋海域的运输船舶构建仿真案例。通过海上遇险船舶搜寻任务效能评估软件进行仿真,对仿真得到的原始数据以及中间数据进行展示并分析。最后利用层次分析法以及模糊理论进行了分析。

关键词: 遥感卫星系统; 海上遇险船舶; 效能评估; 层次分析法

Research on the effectiveness evaluation method of remote sensing satellite system for maritime search

Abstract

With the vigorous development of China's satellite industry, using remote sensing satellites to search for distressed ships in the entire sea area has gradually become a feasible method. However, for a single remote sensing satellite, its revisit capability for a fixed area is relatively poor and cannot effectively search for distressed ships at sea. Therefore, using a remote sensing satellite system composed of multiple remote sensing satellites can effectively solve this problem. To evaluate the system efficiency of the remote sensing satellite system for executing rescue missions for distressed ships at sea, it is necessary to first analyze the execution process of the search mission. Starting from the execution process of the mission, the task objects are divided and the evaluation system is constructed by combining the connections between the task objects. Therefore, the main research work of this article is as follows:

A remote sensing satellite system performance evaluation system for the search of ships in distress at sea was constructed. The remote sensing satellite system and its specific process of performing search tasks are introduced in detail, and the efficiency evaluation system is constructed based on four dimensions: information accuracy, information timeliness, information detection and information expression. Seven capability indicators, including target recognition capability, satellite search capability, mission response capability, revisit capability, coverage capability, search width and image quality, were established, and the calculation methods of each index were introduced in detail. A multi-indicator comprehensive evaluation method was established using analytic hierarchy.

Developed multi-star collaborative search simulation and efficiency evaluation software for ships in distress at sea. For the search mission, the models that need to be considered in the mission simulation of remote sensing satellite system, ground station system and search ship are introduced. Including: satellite platform model, satellite load model, ground station model, ship in distress model, and combined with STK simulation software, the simulation module of each model object is designed. By using STK's API functions to obtain simulation data, the data processing module is designed according to the task execution process, including the visibility time data calculation module, the area coverage calculation module, and the object distance calculation module. According to the execution process of the search task of ships in distress at sea, the task simulation process module is designed based on the visibility time data. Combined

with all the designed modules, the overall architecture of multi-star collaborative search simulation and performance evaluation software for ships in distress was designed.

The simulation research of civil remote sensing satellites on collaborative search for ships in distress was carried out. By searching for relevant data, 30 typical civil remote sensing satellites, five ground stations and transport ship construction simulation cases in the Pacific Sea were selected. The search mission performance evaluation software of ships in distress at sea is simulated, and the raw data and intermediate data obtained by the simulation are displayed and analyzed. Finally, analytic hierarchy and fuzzy theory are used for analysis.

Key Words: Remote sensing satellite systems; Ships in distress at sea; Performance evaluation; Analytic hierarchy

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外相关研究现状及进展	2
1.2.1 国内外卫星系统分析仿真工具.....	2
1.2.2 国内外卫星系统效能评估现状及进展	2
1.3 本文主要研究内容.....	4
1.4 论文章节安排.....	4
2 面向海上搜寻的多星协同效能评估体系构建	6
2.1 多星协同搜寻遇险船舶任务介绍	6
2.2 多星协同效能评估体系维度分析	7
2.2.1 信息精确性维度分析.....	8
2.2.2 信息时效性维度分析.....	9
2.2.3 信息探测性维度分析.....	9
2.2.4 信息表现性维度分析.....	10
2.3 效能评估体系指标计算方法	10
2.3.1 目标识别能力指标计算方法.....	10
2.3.2 卫星搜寻概率指标计算方法.....	12
2.3.3 任务响应能力指标计算方法.....	12
2.3.4 重访能力指标计算方法.....	14
2.3.5 覆盖能力指标计算方法.....	15
2.3.6 搜寻幅宽指标计算方法.....	15
2.3.7 图像质量指标计算方法.....	16
2.4 综合评估方法介绍.....	16
2.4.1 层次分析法.....	17
2.4.2 模糊理论	19
2.5 本章小结.....	19
3 基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件	21
3.1 基于遇险船舶多星协同搜寻任务的对象模块设计	21
3.1.1 卫星平台模型介绍及软件实现.....	21
3.1.2 卫星载荷模型介绍及软件实现.....	24
3.1.3 地面站模型介绍及仿真实现.....	30
3.1.4 遇险船舶模型介绍及软件实现.....	31
3.1.5 数据处理模块设计	33
3.1.6 指标计算模块设计	35

3.2 海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件介绍	37
3.2.1 软件总体架构设计	37
3.2.2 软件操作流程	40
3.2.3 软件场景设置	40
3.3 本章小结	42
4 海上遇险船舶多星协同搜寻任务案例	43
4.1 任务对象模型参数介绍	43
4.2 仿真案例仿真数据分析	46
4.3 仿真案例指标维度分析	50
4.4 综合评估方法应用	51
4.5 本章小结	54
结论	55
参考文献	57

图表目录

图目录

图 2.1	搜寻任务工作流程	6
图 2.2	效能评估指标体系	8
图 2.3	重访时间组成	14
图 3.1	卫星平台模型	22
图 3.2	卫星模型插入界面	23
图 3.3	星座生成界面	23
图 3.4	线阵相机成像原理图	24
图 3.5	线阵光学载荷视场角	25
图 3.6	线阵式光学载荷模型软件仿真实现	26
图 3.7	面阵凝视光学载荷成像模型	27
图 3.8	面阵式光学载荷模型仿真实现	27
图 3.9	SAR 载荷成像原理图	28
图 3.10	天线波束角	29
图 3.11	SAR 载荷模型插入界面	29
图 3.12	SAR 成像模型仿真实现	30
图 3.13	地面站模型软件实现	31
图 3.14	遇险船舶尺寸设置界面	31
图 3.15	搜寻船舶航线设置示意图	32
图 3.16	搜寻船舶仿真模型实现	32
图 3.17	搜寻船舶航线环境设置界面	33
图 3.18	搜寻任务工作流程	34
图 3.19	可见性时间与任务时间影响关系	35
图 3.20	目标识别能力指标显示界面	35
图 3.21	任务响应时间数据展示界面	36
图 3.22	重访时间数据展示界面	36
图 3.23	搜寻幅宽数据展示界面	37
图 3.24	软件架构图	37
图 3.25	软件工作流程	38
图 3.26	软件显示区界面	39
图 3.27	软件界面	39

图 3.28 软件使用流程图.....	40
图 3.29 场景操作界面.....	41
图 3.30 软件运行场景功能.....	41
图 4.1 仿真案例仿真示意图.....	45

表目录

表 2.1 任务与二维周期数对应表.....	11
表 2.2 指标标度表.....	18
表 4.1 光学卫星卫星参数表.....	44
表 4.2 SAR 卫星参数表.....	44
表 4.3 地面站参数表.....	44
表 4.4 搜寻船舶参数表.....	45
表 4.5 地面站指令上注仿真原始数据表.....	46
表 4.6 高轨静止卫星指令上注仿真原始数据表.....	47
表 4.7 地面站指令上注仿真中间数据表.....	47
表 4.8 光学载荷搜寻原始数据.....	48
表 4.9 光学载荷协同 SAR 载荷搜寻原始数据.....	49
表 4.10 高轨静止卫星指令上注仿真中间数据表.....	49
表 4.11 指标权重表.....	52
表 4.12 等级与归一化数值对应表.....	53
表 4.13 指标结果表.....	53

1 绪论

1.1 研究背景

随着人类对海洋的开发越来越深入，人类对于海洋的利用率也在逐步提高。对于海洋的利用主要体现在三个方面：资源勘探业、捕鱼业、运输业。在海洋开发的行业中，船舶是必不可少的要素，勘探船舶、捕鱼船舶、运输船舶占据了海洋中航行船舶很大一部分比例。但是随着开发的深入，以及海洋环境的复杂性，开发过程中会受到各种各样的影响，其中影响最大的就是海洋中瞬息万变的气候环境。恶劣的气候环境对小型捕鱼船舶、勘探船舶以及运输船舶都会带来不可预估的后果，严重的会导致船舶遇险，失去和地面之间的通信。为此各国对于海上遇险船舶的救援也越来越重视。

近年来我国卫星事业的蓬勃发展，卫星的数量在不断地增加，功能也在不断地完善。地形测绘卫星、高分辨率成像卫星、气象卫星在各自的领域都发挥着越来越重要的作用。使用遥感卫星对海上遇险船舶进行搜寻也成为了现在解决海上救援问题的一种重要手段。早在 1979 年 11 月，苏联、美国、加拿大和法国签署了一项联合备忘录，组成了第一个国际卫星救援系统，针对海上遇险船舶进行搜索救援。

现有的四大导航系统：美国全球定位系统、俄罗斯“格洛纳斯”系统、欧洲“伽利略”系统以及中国自主研发的“北斗”系统都在海上救援中发挥着重要的作用。但是也存在一定的缺点，一方面 LEO 系统的信号延时较大，由于 LEO 系统高度大概在 500km-1000km 之间，并且大部分只提供定位和识别功能，且单颗卫星对地球的覆盖范围较小，很大程度上影响了系统的可用性。而对于 GEO 系统，该系统不能对地球的南北极进行覆盖，因此对于南北极的遇险船舶来说不能有效地开展搜寻^[1-2]。

另一方面，在极端恶劣的条件下，海上遇险船舶通信设备发生故障，或者遇到了极端恐怖组织的袭击关闭了通信设备以及需要获取海上遇险船舶的详细图像信息时，导航系统不能满足此类需求。考虑到这些问题，使用现有的不同轨道的遥感卫星相互协同工作，对海上遇险船舶进行搜寻。可以实现对海上遇险船舶进行定位，并且还可以获取海上遇险船舶的图像信息，便于对海上遇险船舶进行救援。

对海上遇险船舶搜寻任务的需求进行分析，并从不同的角度对卫星系统的任务完成能力做出科学的评估，成为了任务效能评估的主要研究问题。由于卫星系统中功能的多样性以及在进行效能评估过程中出现的主观性，建立好一个完整可信赖的效能评估体系并选择好一个评估方法尤为重要。另外执行搜寻任务的卫星系统中各部分对象组成较为

复杂,同一类对象可能出现很多种不同的子对象,如何对任务中的系统组成进行模型仿真实现也是需要考虑的问题。

1.2 国内外相关研究现状及进展

1.2.1 国内外卫星系统分析仿真工具

在对卫星系统的仿真中,不能缺少仿真工具的使用,在多数航天大国,都有已经完善成型的航天器专业仿真设计软件,例如美国 Analytical Graphics 公司研发的航天仿真软件 STK,法国 EADS 公司开发的 Systema 系统、欧洲航天局的 Orion 系统、法国阿尔卡特公司开发的 AS3M 系统和西班牙 GMV 公司出品的 Flexplan 软件等^[3]。

国内也引进了不少国外的先进软件,并且也有我国自主研发的软件比如:北京航空航天大学星座系统仿真软件系统、国防科技大学的多卫星系统综合建模和效能仿真和分析软件系统、哈工大的分析与仿真验证一体化、小卫星设计系统等。

其中使用最广泛的为 STK 仿真软件,该仿真软件功能众多,在卫星遥感和卫星通信的仿真中发挥着很大的作用。并且 STK 仿真软件提供了一套完整的 API 接口,便于开发人员实现对 STK 仿真软件的二次开发,具有很好的灵活性。

在本课题中为了实现对海上搜寻任务的效能评估,通过对 STK 仿真软件进行二次开发,得到可以实现海上遇险船舶搜寻这一特定任务的效能评估软件。

1.2.2 国内外卫星系统效能评估现状及进展

在本课题中,对卫星系统的效能进行评估占据了很大一部分工作。由于卫星系统效能的评估涉及国家机密,在获取国外相关信息方面有一定的困难。目前能获取到的资料有澳大利亚国防部的克莱尔等一些数据,克莱尔通过对多卫星对地的覆盖能力来判断卫星系统的效能,具有较大的局限性。近些年,随着国内卫星事业的发展,对卫星系统效能评估的研究也愈来愈多。

吴炜琦等人为有效地构建海洋目标探测卫星体系,建立了一套能够对各类卫星进行分析和评估的效能模型,初步建立了以目标探测概率为度量的通用效能体系^[5]。为后续卫星系统探测海洋目标这一任务对探测概率的分析提供了基础。

李畅等人从地球静止轨道卫星本体的角度出发,主要研究了太阳光对卫星的影响。并基于 ADC 模型对地球静止卫星的可用度、可信度以及能力进行效能体系建立。从三个角度提出了如何提高地球静止轨道卫星效能:降低卫星故障率,加快卫星在轨故障诊断以及提升探测器抗阳光能力^[6]。但是此种评估方式只适用于对单颗高轨静止卫星单体的效能评估,不能用于执行具体任务的体系评估中。

梁桂林^[7]等人借鉴了 DoDAF 体系对卫星地面系统的各部分能力进行了效能评估体系建立, 并使用 ADC 模型对体系的综合效能进行评估, 完善了对卫星地面系统执行能力的评估方法。

孟锦^[8]等人考虑到 ADC 模型不能反映卫星系统的动态变化过程, 建立了 ADC 动态模型。并在可用性中对卫星性能老化这一角度展开分析, 建立了卫星老化模型, 分析了卫星性能老化对效能的影响。此文的分析角度从卫星性能老化的影响出发, 讨论了一个具体方面对效能评估的影响, 并不适用于卫星系统执行具体任务时的对体系的效能评估。

孙凯等人从任务完成能力、资源占有率、侦察时效性三个维度^[9]建立了 10 项指标描述地球观测卫星系统的性能评估体系, 分析了各项指标对总体效能评估的影响。但是缺少了遥感卫星成像特性对效能评估的影响, 并且并未得出一个综合的评估结果用来比较不同卫星系统的效能。

刘晨涛^[10]等人从对地覆盖效能、卫星任务规划效能、卫星通信效能、星地资源调度效能四个维度建立了 18 个指标。使用层次分析法确定各指标的权重, 由 ADC 模型对卫星的综合效能进行计算。刘等人建立的效能指标体系虽然涵盖了卫星从规划到调度以及星间通信的各部分模块, 但是也并未涉及对地观测系统中成像特性对效能的影响。并且建立的多项指标例如卫星受地面站时间比、卫星平均每天可见地面站时间、地面站平均每天可见卫星时间存在冗余, 会对效能的分析结果产生影响。

郑义成^[3]、王玉菊^[11-13]等人针对卫星探测舰船目标这一具体任务, 分析了任务目的, 从任务完成能力以及侦察时效性两个评估准则, 并建立了七个指标。同时对一些定性数据使用模糊理论进行归一化处理, 最终通过层次分析法得到最终评估结果, 提供了一个比较完善的对海上舰队目标探测任务进行评估的方法。但是同样忽略了卫星系统执行探测任务时成像特性对总体任务效能的影响, 并且建立的时间性指标中未能对卫星系统执行任务的总体时间进行细化区分, 忽略了对时效性的要求。

秦国政^[14]等人从时间链和精度链两个维度构建了卫星效能评估体系, 并结合层次分析法进行计算。并在时间链角度对任务时间进行了细化处理, 但是在对成像信息的处理中, 缺少对图像信息的主观判断评估。同时忽略了成像特性与地面站之间的处理关系。

刘锋^[15]等人对卫星系统主要执行的任务进行划分, 构建了卫星系统任务分析模式以及任务模型, 从卫星获取信息这一角度出发, 建立了效能评估体系。

巫兆聪等人使用模糊理论对空间分辨率、时间分辨率、谱段范围和光谱分辨率进行了模糊函数设计^[17], 提供了对定性指标进行模糊处理的方法。

基于以上文献分析, 本课题在建立效能评估体系时从以下两个方面考虑: 考虑卫星系统从任务制定到完成任务整个过程的影响因素; 考虑卫星成像特性对效能评估的影响。

1.3 本文主要研究内容

在完成效能评估工作以前，需要对卫星系统执行搜寻任务中各部分对象的作用进行分析，分析不同对象需要考虑的具体特性。并对卫星系统执行搜寻任务的流程进行介绍。

基于对卫星系统效能评估文献的理解，目前的卫星系统效能评估有两个问题：第一大多忽略了卫星的成像特性对效能评估的影响；第二在建立指标体系时，缺少对各指标的单独分析，并在指标的计算中缺少对具体定性指标的处理。本课题中在完善指标体系时从这两方面进行考虑进行完善。

因此，本文的主要研究内容可以分为：

为了开展面向海上搜寻的遥感卫星系统效能评估方法研究，需要对遥感卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的任务对象以及具体流程进行介绍。依据遥感卫星系统执行搜寻任务时的具体流程分析信息精确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性四个维度在任务执行过程中的具体体现，并考虑在各维度中需要建立的指标。

为了实现面向海上搜寻任务的遥感卫星系统效能评估，需要对搜寻任务的执行过程进行仿真，并根据仿真得到原始数据，用于效能评估指标体系中指标的计算。首先需要介绍遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三类对象的主要功能及在搜寻任务中需要考虑的模型参数，并根据 STK 仿真软件提供的对象模型，完成三类对象的模块化设计。然后根据指标计算过程中需要的原始数据，结合 STK 仿真软件的实现功能完成数据计算模块设计，最后将其汇总完成软件的开发。

通过查找现有的民用卫星的资料，选取一定数量的卫星进行实际任务仿真，测试对象模型参数的完整性、效能评估指标体系的合理性、以及仿真软件的可用性。

1.4 论文章节安排

第一章介绍了课题的背景以及论文的主要研究内容，并阐述了论文的研究目的和研究意义，介绍了论文中使用到的仿真工具，并通过对国内外研究现状的分析，总结目前卫星系统效能评估体系出现的主要问题。

第二章介绍了遥感卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的具体流程，并从信息精确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性四个维度建立了七个指标表征从任务开始到任务结束阶段各类对象的联系。

第三章介绍遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三类对象的主要功能及在搜寻任务仿真中需要考虑的模型参数，并根据 STK 仿真软件提供的对象模型，完成三类对象的模块化设计。结合 STK 以及仿真任务流程完成了数据处理模块以及任务仿真模块的

设计，最后将所有模块整合，完成了基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件。

第四章通过查找现有的遥感卫星资料、地面站资料，构建了一个遥感卫星系统协同搜寻遇险船舶的仿真案例，并通过开发的仿真与效能评估软件得到仿真数据，对仿真数据进行分析。并利用层次分析法得到最终的评估结果。

2 面向海上搜寻的多星协同效能评估体系构建

2.1 多星协同搜寻遇险船舶任务介绍

为了开展面向海上搜寻的遥感卫星系统效能评估方法研究，需要对遥感卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的任务对象以及具体流程进行介绍。

对海上遇险船舶搜寻任务的具体流程进行介绍，具体流程如图 2.1 所示。

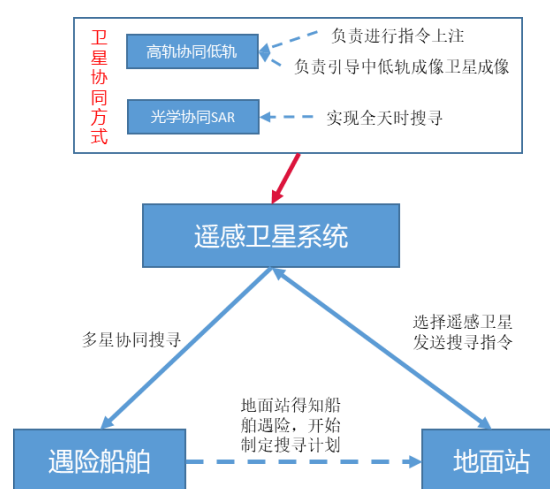


图 2.1 搜寻任务工作流程

Fig.2.1 Search task workflow

首先当地面机构发现船舶遇险或者需要完成船舶的搜寻任务时，向地面站发送搜寻指令。地面站受到搜寻指令后选取多颗携带不同类型载荷的卫星组成遥感卫星系统，并对遥感卫星系统进行任务制定，各遥感卫星协同对船舶进行搜寻。地面站系统完成搜寻任务的制定后，向遥感卫星系统发送搜寻命令。

遥感卫星系统接收到搜寻指令后，根据地面站划定的搜寻区域进行搜寻船舶搜寻。由地球同步卫星进行大范围搜寻，发现类似目标后协同中低轨道卫星进行识别。

当遥感卫星系统对遇险船舶识别确认后，向地面站反馈搜寻信息。地面站向地面机构返回搜寻结果。

执行搜寻任务的对象主要包含三部分：遥感卫星系统、地面站系统、搜寻船舶。对各类对象的作用以及工作方式介绍，详细了解各类对象之间的联系。

在本课题中，遥感卫星系统是由多颗遥感卫星组成的卫星系统，这些遥感卫星可以处于不同的轨道，携带不同的成像载荷。遥感卫星系统主要包含两部分功能：搜寻遇难

船舶、与地面站进行通信。遥感卫星系统中的各种类卫星协同工作对遇险船舶进行搜寻,协同方式包括高轨协同低轨、光学载荷协同 SAR 两种方式。

不同轨道的卫星协同工作可以加快搜寻任务响应时间。轨道类型大致可以分为地球同步轨道、圆形轨道、太阳同步轨道等。对于地球同步轨道卫星,其主要功能为对固定区域进行搜寻,但是由于此类卫星分辨率较低,无法得到搜寻目标的清晰图像,所以容易产生搜寻目标识别错误。临界倾角轨道、圆形轨道卫星、太阳同步轨道卫星等中低轨道卫星往往具有较高的分辨率,但是其探测范围较小,对大区域内的目标进行搜寻时由于目标位置不确定,所以耗费时间较长。高轨协同中低轨道的方式实现地球同步轨道卫星发现搜寻目标,并由中低轨道卫星进行识别确认,加强了对搜寻目标的响应能力以及识别能力。

不同成像载荷协同可以实现全天候对搜寻目标进行成像。载荷方式主要分为光学载荷和 SAR 载荷。根据成像原理的不同,光学载荷受太阳高度角的影响,在夜晚的成像能力较差,但 SAR 载荷不受太阳高度角的影响,在夜晚有很好的成像能力。使用光学载荷协同 SAR 载荷的方式对搜寻船舶进行搜寻时,可以实现全天候的搜寻,提高夜晚搜寻能力。

地面站系统的主要任务是负责与遥感卫星系统进行信息交互。主要包含两个方面:将地面对遥感卫星系统的指令发送到卫星系统;接收遥感卫星系统下传的数据信息。遇险船舶发挥着信息来源的作用。

本课题研究的重点在于对遥感卫星系统体系执行任务的能力进行效能评估,具体体现在遥感卫星系统中各种类卫星的协同工作以及卫星与地面站之间的联系中。

通过对搜寻任务的各部分对象以及工作流程进行介绍,得到效能评估的重点为:不同轨道高度遥感卫星以及不同载荷遥感卫星的协同工作能力,遥感卫星系统、地面站系统以及遇险船舶之间的联系。

2.2 多星协同效能评估体系维度分析

本课题针对海上遇险船舶救援任务研究了遥感卫星系统的效能评估方法,从遥感卫星系统与地面站系统进行信息交互这个角度出发进行维度选取。从信息本身出发,信息是否准确有效决定了任务的完成情况,信息的表现形式影响了地面站系统对信息的判定,基于此选取信息精确性维度和信息表现性维度。获取信息的时间反映了遥感卫星系统之间的协同能力以及遥感卫星系统与地面站系统之间的信息交互效率,因此选取信息时效性维度。获取信息的范围角度反映了遥感卫星系统对搜寻区域的搜寻能力,因此选取信息获取性维度。

基于以上分析,面向海上遇险船舶搜寻任务的遥感卫星系统效能评估体系从四个维度进行建立:信息精确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性。依据遥感卫星系统执行搜寻任务时的具体流程分析信息精确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性四个维度在任务执行过程中的具体体现,并考虑在各维度中需要建立的指标。所建立的指标体系如图 2.2 所示。

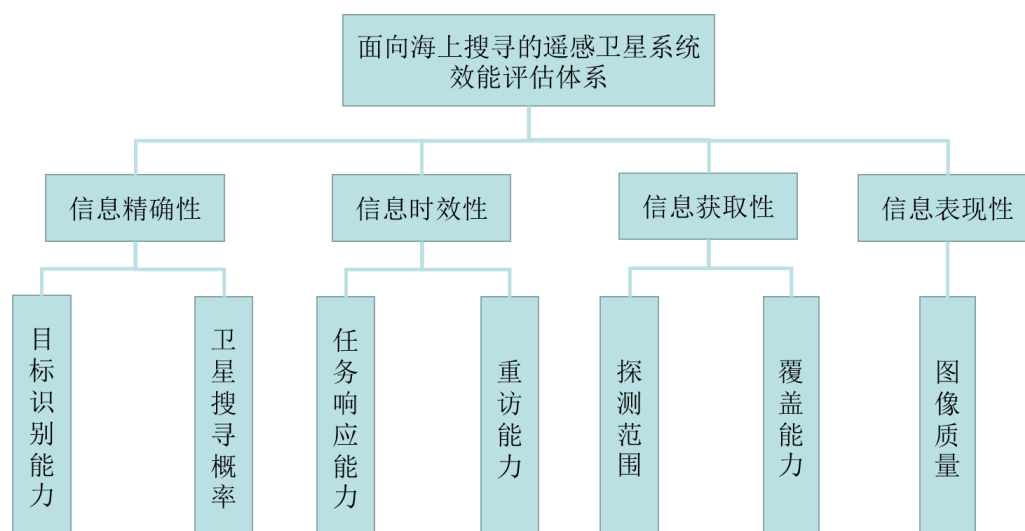


图 2.2 效能评估指标体系

Fig.2.2 Effectiveness evaluation index system

2.2.1 信息精确性维度分析

信息精确性维度主要描述了遥感卫星系统与遇险船舶之间的信息联系,反映了遥感卫星系统获取到的遇险船舶信息的准确性以及在获取信息过程中的有效性。

信息的准确性体现当遥感卫星系统中的成像卫星获取到遇险船舶的图像信息后,通过获取到的图像信息对遇险船舶进行识别。因此信息的识别能力作为遥感卫星系统成像特性的主要评估因素,可以使用成像时的图像分辨率数据进行具体表征。当图像分辨率越高时,从图像中得到的信息越准确,基于此提出目标识别能力指标,由遥感卫星系统的分辨率进行表征。

获取信息过程中的有效性体现在遥感卫星中实现了对搜寻区域的搜寻但并未搜寻到遇险船舶的情况。遥感卫星系统执行任务过程中在固定的区域对遇险船舶进行搜寻,会出现实现了区域的搜寻但是并没有搜寻到船舶的情况,这种情况受到卫星轨道运行位置以及载荷探测范围的影响,为了表征这种情况出现的概率,基于此提出卫星搜寻概率指标,它反映了过顶搜寻区域时对遇险船舶完成搜寻的概率问题。一般地,当卫星搜寻

概率越大,即过顶搜寻区域时搜寻到遇险船舶的概率越大,任务遥感卫星系统获取到的信息越有效。

基于以上分析对信息精确性提出两个指标:目标识别能力、卫星搜寻概率。

2.2.2 信息时效性维度分析

信息时效性维度主要表征的是遥感卫星系统完成遇险船舶搜寻的响应能力,涵盖了遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三类对象的联系。时效性一方面主要指遥感卫星系统响应时间的快慢,另一方面也指在执行搜寻任务时各卫星相互协同对目标进行搜寻的信息获取频率。

从遥感卫星系统与地面站系统、遇险船舶之间的联系进行分析:遥感卫星系统执行任务中与地面站的工作流程比较复杂,包括了从任务规划、指令上注、数据传输、数据处理等各个环节,各个环节都会影响整体搜寻任务的时间。此外遥感卫星系统与遇险船舶的联系体现在对遇险船舶的成像等待以及成像时长两个环节中。基于此提出任务响应能力指标。该指标表征单颗卫星从任务开始阶段到任务结束阶段所花费的时间,反映了每颗卫星完成任务响应能力,同时遥感卫星系统的任务响应能力也与单星的任务响应能力相关。

从遥感卫星系统与遇险船舶之间的联系分析:在遥感卫星系统执行任务过程中,当第一颗卫星完成搜寻任务时认为系统已经完成了对搜寻任务的响应。但考虑到单颗卫星的信息有限,所以制定一个总任务时间,在这个时间段内对遇险船舶持续成像,提高图像信息的有效性。所以每颗卫星之间对遇险船舶的成像时间间隔反映了遥感卫星系统对遇险船舶的信息更新率,也表征了卫星之间的协同工作能力,基于此提出重访能力指标。

基于以上分析,本课题在信息时效性维度提出两个指标:任务响应能力、重访能力。

2.2.3 信息探测性维度分析

信息探测性反应了遥感卫星系统空间域的行为特征,也就是遥感卫星系统在执行任务过程中的作用范围,即单颗卫星或者整个卫星系统可以探测的对象空间。

探测范围决定于卫星与地球的相对位置关系、探测载荷观测视场,以及载荷自身的观测特性,还受任务时效性要求的影响。影响探测范围的主要因素包括卫星运行轨道和遥感器的的工作频/谱段、视场角、指向调节能力,以及系统的任务控制能力。

遥感卫星系统在对固定区域的搜寻中,当单星的平均探测范围越大时,搜寻到遇险船舶的可能性越大;同时遥感卫星系统整体对固定区域的覆盖能力越强,说明对区域内遇险船舶的搜寻可能性越大。从这两个角度对卫星系统获取信息的范围能力进行评估。

基于以上分析,提出信息探测性维度的两个指标为探测幅宽和覆盖能力。其中探测幅宽为多星平均的探测幅宽,反映了单星对效能的影响。覆盖能力为卫星系统在执行任务时对搜寻区域的覆盖能力,反映了多卫星协同工作对效能的影响。

2.2.4 信息表现性维度分析

信息表现性用于描述遥感卫星的形式域特征,反映了遥感卫星得到的信息以图像、声像等形式表征出来,在多大程度上可以被使用者接收。

在卫星系统执行搜寻任务的过程中,在一定程度上获取到的信息表现形式越多,越容易获取到大量的搜寻船舶信息。在多卫星协同执行搜寻任务过程中,不同类型的搜寻卫星携带不同类型的载荷对海上遇险船舶进行搜寻,得到的图像表现形式也不同,可以使用图像质量来表征不同载荷图像的表现形式。

2.3 效能评估体系指标计算方法

2.3.1 目标识别能力指标计算方法

影响遥感卫星系统目标识别能力的因素主要包括分辨率、侧摆角度、俯仰角度、成像条件、目标与背景对比度,以及信息处理水平等。上述因素中,分辨率是关键影响因素,分辨率影响了对目标的识别程度,并且侧摆角度和俯仰角度本身会对分辨率产生影响,在考虑分辨率时需要同时考虑侧摆角度和俯仰角度的影响,因此使用分辨率作为目标识别能力的表征。

分辨率的大小和卫星携带的载荷类型有关,分辨率计算可以分为光学成像卫星和 SAR 成像卫星两种,其中光学成像主要考虑可见光成像。在卫星系统执行遇险船舶搜寻任务时,根据计算得到不同载荷搜寻到遇险船舶时的分辨率大小。为了便于对后续分辨率数据的分析,将不同载荷搜寻到遇险船舶时得到的不同的分辨率数据进行计算,将计算结果进行统计。在本课题中考虑光学载荷和 SAR 载荷两种载荷的分辨率。

当光学载荷无侧搜寻遇险船舶时,目标物体处于星下点时,此时探测载荷位于遇险船舶的正上方,此时光学载荷的分辨率计算公式为:

$$GSD = \frac{H \times d}{f} \quad (2.1)$$

其中 H 为探测器到目标的距离; d 为探测器光敏元尺寸; f 为探测器焦距。当探测器固定时,其探测器光敏元尺寸和探测器焦距固定,当卫星探测到目标时得到其与目标的距离,计算得到其分辨率大小。

当光学载荷摆动时探测到目标时，其光学载荷的分辨率计算公式为：

$$GSD = \frac{H \times d}{f \cos \theta} \quad (2.2)$$

其中 θ 为侧摆角和俯仰角的合成角，并根据公式求出卫星在探测到遇险船舶时的分辨率大小。

计算 SAR 类型载荷时，分辨率分别包括距离向分辨率和方位向分辨率，其距离向分辨率的计算公式为：

$$GSD_r = \frac{c}{2B} \quad (2.3)$$

GSD_r 为距离向的分辨率， c 为光速大小； B 为发射信号带宽，当 SAR 载荷类型确定时，发射信号带宽确定，根据公式计算出距离向分辨率。

其方位向分辨率主要由合成孔径得到，其计算公式为：

$$GSD_a = \frac{L_a}{2} \quad (2.4)$$

其中 L_a 为天线方位向口径长度，当 SAR 载荷确定时，卫星分辨率也已经确定，根据公式得到其分辨率。

对光学载荷的识别能力进行计算根据计算得到光学载荷的分辨率数据，依据 Johnson 准则，计算卫星系统的卫星识别能力。首先计算跨越目标特征尺寸的二维周期数，可以依据公式求得。其中 W_{tgt} 为遇险船舶宽度； L_{tgt} 为遇险船舶船舶长度。

$$dc = \sqrt{W_{tgt} L_{tgt}} \quad (2.5)$$

根据公式求得某个分辨率下对遇险船舶进行发现、识别、确认的探测概率大小。其中 N_p 表示进行发现、识别、确认的跨越目标特征尺寸的二维周期判据数，如表 2.1 所示。

表 2.1 任务与二维周期数对应表

Tab.2.1 Tasks and two-dimensional number of cycles corresponding table

任务	二维周期数
发现	1.5
识别	6.0
确认	12

依据任务需求确定 N_P 的值, 所求得 $P(N)$ 即为 C_1 。

$$P(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_P}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{N}{N_P}\right)}}{1 + \left(\frac{N}{N_P}\right)^{2.7+0.7\left(\frac{N}{N_P}\right)}} \quad (2.6)$$

2.3.2 卫星搜寻概率指标计算方法

遥感卫星系统对指定搜寻区域的遇险船舶进行搜寻时, 由于遇险船舶的运动情况是未知的, 并且卫星系统每次扫视指定区域的路径也存在一定的随机性, 可以将遥感卫星系统对区域内遇险船舶的搜寻视为一种随机搜索方式。因此使用卫星搜寻概率指标来表征这种随机搜索方式的概率大小。

对于搜寻遇险船舶的遥感卫星系统而言, 影响遥感卫星系统搜寻概率的主要因素包含三类, 第一类是搜寻区域与目标特性的相关参数; 第二类是卫星轨道高度、轨道倾角、访问间隔、观测带宽等卫星平台的相关参数; 第三类是光学、SAR 等有效载荷的相关参数^[5]。

卫星搜寻概率主要体现在经过特定搜寻区域时搜寻到目标的概率, 即卫星系统的探测概率。在卫星经过搜寻区域时, 由于轨道限制或者卫星机动能力的限制, 不能每次都搜寻到目标。卫星系统的机动能力以及卫星载荷类型都会对目标搜寻能力造成影响, 当机动能力强, 并且载荷的探测范围较大时, 经过搜寻区域的次数会增加, 同时搜寻到船舶的可能性也会增加。

本课题中对该指标进行计算时, 利用 STK 仿真软件的可见性计算功能进行计算, 具体公式为:

$$C_2 = \frac{N_1}{N} \quad (2.7)$$

其中 N_1 为经过特定区域时实际探测到海上遇险船舶的次数, 在 STK 软件中为卫星系统与遇险船舶的可见性次数。 N 为经过特定搜寻区域的次数, 在 STK 软件中为卫星系统与搜寻区域的可见性次数。

2.3.3 任务响应能力指标计算方法

任务响应能力是描述卫星探测系统时间域行为特性的指标, 指卫星探测系统响应任务要求的快慢, 反映系统响应的及时性、灵活性及应急能力, 通常用任务响应时间来表征。遥感卫星系统的任务响应时间是从地面进行任务规划开始, 一直到第一颗搜寻卫星

搜寻到遇险船舶的时间。建立单星任务响应时间的计算公式，由此求得遥感卫星系统的任务响应时间，卫星的任务响应时间根据环节不同具体可以划分为：计划制定时间、指令上注等待时间、指令上注时间、搜寻等待时间、成像时间、数传等待时间、数据传输时间。

$$T_{response} = T_{计划制定} + T_{指令上注等待} + T_{指令上注} + T_{搜寻等待} + T_{成像时间} + T_{数传等待时间} + T_{数据传输} \quad (2.8)$$

在实际仿真中，计算各环节的具体时间，将第一颗卫星完成搜寻任务的响应时间作为卫星系统的最快响应时间。下面对各个时间段进行具体描述。

计划制定时间是由地面通知地面站向卫星系统发送搜寻指令后，需要对组成的遥感卫星系统进行任务制定。任务制定时间受到遥感卫星系统卫星数量的影响，由于卫星数量的不同，计划制定时间会随着卫星数量的增加而变大。

指令上注等待时间是指在地面站完成任务制定后，到卫星进行指令上注之间的等待时间。指令上注等待时间的主要影响因素是地面站与卫星之间的通信方式以及卫星在轨道中所处的位置。目前通信方式有三种：中继卫星通信、高轨静止卫星通信以及地面站通信。当中继卫星与卫星通信时，地面站可以通过中继卫星实时与卫星进行指令上注。当高轨静止卫星通信时，卫星运行到可以和高轨静止卫星通信的位置时才可以进行指令上注。当地面站进行通信时，卫星需要运行到地面站的通信范围内才可以进行指令上注。在搜寻任务执行的初始时刻，当卫星所在卫星的星下点经纬度坐标距离我国较近时，其指令上注等待时间相对较短。

指令上注时间为不同的通信方式下向卫星发送搜寻指令的时间，一般情况下由于搜寻指令相对简单，所以设定为一个固定值大小。

搜寻等待时间指对卫星完成指令上注后，到卫星搜寻到遇险船舶的时间，该时间和卫星载荷的探测范围以及完成指令上注后卫星运行位置有关，当卫星的运行位置与搜寻区域接近时，其等待时间越小。

成像时间受载荷探测范围以及轨道运动的影响，并且成像时间还会受到载荷成像特性的影响，载荷在执行探测任务时如果实时探测会造成庞大的数据量，影响数据的传输与处理。

数传等待时间为卫星对遇险船舶成像后，到卫星运行到可以与地面站进行数据传输位置的等待时间。其主要影响因素为卫星对遇险船舶进行成像后的轨道运动。

数据传输时间为卫星将成像数据传输到地面站需要花费的时间，此时间与卫星的数据传输速率以及对遇险船舶的成像时间有关。

2.3.4 重访能力指标计算方法

重访能力可以反映遥感卫星系统对海上遇险船舶搜寻时的时间分辨率。一般情况下，重访能力的大小与卫星数量的多少有直接的关系。卫星数量越多，重访能力越强。同时还和载荷的探测范围以及卫星的机动能力有关。但由于使用数量较多的卫星会造成卫星资源的浪费，因此需要根据不同卫星系统的重访能力，对卫星系统进行优化，在充分利用卫星资源的前提下提高卫星的重访能力。

对重访时间进行求解有两种方法，一是解析法，通过建立重复探测能力参数与卫星性能参数之间的解析关系来评估重复探测能力，二是仿真方法，即通过仿真和统计方式来定量分析重复探测能力。对于单星系统而言，可以采用建立重访时间参数和卫星性能参数的解析关系来对重访时间进行求解；对于多星系统而言，其在覆盖特性上呈现明显的不规则性，故使用仿真方法求得重复时间。

在进行重访时间的表征是有两种方法，一种为卫星系统对目标多长时间重访一次，另外一种是在固定时间内对探测目标重访几次。在本课题中，使用第一种表征方法。

遥感卫星系统大多由不同轨道的星座携带不同的载荷组成，对重访时间的计算还可以根据轨道以及载荷的不同进行分别计算。评估不同类型下卫星的重访能力。

在本课题中，重访时间的计算方法为：以第一颗搜寻到船舶的时间为起点，到最后的一颗搜寻到船舶的时间为截止时间。统计这段时间内各搜寻卫星搜寻到目标的时间，具体时间计算为上一颗卫星搜寻到船舶的开始时间到下一颗卫星搜寻到船舶的开始时间，并进行统计，统计完成后计算其平均值。以此方式计算的重访时间可以分为卫星搜寻时间和卫星等待时间，分别进行计算，如图 2.3 所示。

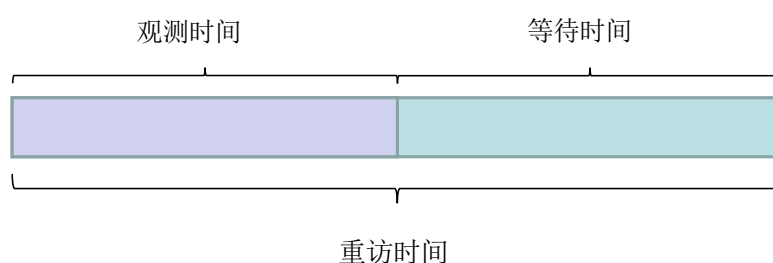


图 2.3 重访时间组成

Fig.3.3 Revisit time composition

2.3.5 覆盖能力指标计算方法

覆盖能力指遥感卫星系统在执行任务时对搜寻区域的可以实现覆盖的覆盖范围。

在本课题中,当遇险船舶失踪时,根据失踪时长以及船舶的航速会划定一定的区域,并通知卫星系统对该区域执行搜寻任务。如果卫星系统的覆盖能力较弱,只能实现对部分区域的覆盖,那么可能会漏掉一些重要的信息,导致搜寻任务的失败。因此,卫星系统的覆盖能力越强,对于搜寻任务的成功率就越高。

覆盖能力取决于卫星载荷搜寻范围的大小、卫星轨道参数、机动能力。卫星的轨道是指卫星在地球上的运行轨迹,不同的轨道会对卫星的覆盖能力产生不同的影响。例如,地球同步轨道的卫星可以实现对地球表面的全面覆盖,但是对于北极和南极地区的覆盖能力较弱。而极地轨道的卫星可以实现对极地地区的全面覆盖,但是对于赤道地区的覆盖能力较弱。

由于参数众多,使用解析法求解覆盖能力指标会比较复杂,需要进行大量的计算和分析。因此在本课题中,采用了一种更加简单和直接的方法来计算覆盖能力。STK 仿真软件提供了区域覆盖性计算功能。它可以直接模拟遥感卫星系统在特定环境中对特定区域的覆盖情况,将任务时间内对搜寻区域的覆盖率作为覆盖能力指标的计算结果。

2.3.6 搜寻幅宽指标计算方法

搜寻幅宽为单颗卫星在轨运行时,对地面可以搜寻的范围垂直于卫星运行方向的宽度,它会影响卫星系统的空间分辨率以及时间分辨率。

搜寻幅宽决定于卫星与地球的相对位置关系、探测载荷观测视场,以及载荷自身的观测特性,还受任务时效性要求的影响。影响搜寻幅宽的主要因素包括卫星运行轨道和遥感器的的工作频/谱段、视场角、指向调节能力,以及系统的任务控制能力。轨道倾角影响卫星星下点轨迹的纬度分布范围,而轨道高度则影响到遥感器的视野。一般地,轨道倾角越靠近 90 度、轨道高度越高,卫星的探测范围越大。

在本课题中搜寻幅宽可以计算载荷直接对应范围即载荷瞬时可视范围,并考虑载荷有侧摆和无侧摆两种情况下的搜寻幅宽,搜寻幅宽可以对单星对地面的覆盖程度进行表征。

当载荷没有侧摆时,通过视场角度参数和载荷对地距离进行计算,其搜寻幅宽的计算公式为:

$$W = 2H \tan \frac{\theta}{2} \quad (2.9)$$

考虑载荷有摆动时计算载荷的搜寻幅宽，此时搜寻幅宽表示载荷在有摆动的情況下，卫星可以对地面进行探测的最大宽度， α 为卫星摆动角度。其计算公式为：

$$W = 2H \tan\left(\alpha + \frac{\theta}{2}\right) \quad (2.10)$$

对各个卫星的搜寻幅宽计算后，得到平均搜寻幅宽最为指标的最终结果。

2.3.7 图像质量指标计算方法

图像质量是指图像的视觉效果和表现能力，它受载荷传感器、透镜、外界环境的影响。环境条件通过影响使用载荷的类型从而对卫星探测产生影响，同时不同成像载荷成像的图像质量也不同。在搜寻任务中，使用图像质量对卫星系统的表现能力进行表征。

在对图像质量进行表征时，考虑根据图像的生成方式这个角度进行表征，本课题中的成像载荷按成像原理不同可以细分为：可见光载荷、红外载荷、高光谱载荷、SAR 载荷。一般地可以认为在相同分辨率的情况下，可见光载荷所成像的图像质量最好，并且所表现的信息也会更多，其次为高光谱载荷，最后为红外载荷和 SAR 载荷。

因此，在进行图像质量表征时，分为四个级别，从最高级到最低级为：可见光载荷、SAR 载荷、高光谱载荷、红外载荷。

2.4 综合评估方法介绍

在对效能评估体系进行完善以后，建立了四个维度的九个指标来表征卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的任务效能，结合任务执行过程从九个方面分别进行评估分析。

在任务执行初期，需要地面人员对任务进行规划分析，并向卫星系统发送指令，等待卫星系统返回搜寻结果。任务响应能力指标对从任务规划到地面收到搜寻数据整个过程的时间维度进行了表征。

地面站接收到返回的目标信息后，对目标信息进行处理。目标识别能力、图像质量两个指标对收到的搜寻目标图像所反映的信息进行了表征。在对整个搜寻卫星系统执行任务时相互协同工作的角度，目标搜寻能力、重访时间、覆盖能力三个指标对卫星协同工作的能力进行了表征。

以上是对单个指标进行分析的分析思路，在进行体系的效能评估时，也可以将多个指标进行结合，得到一个最终的数值。因此需要选择一个适当的评估方法，既可以兼顾多指标的独立性，又可以将多指标进行结合得到最终结果。

目前使用的系统效能评估方法中，使用最多的方法为 ADC 模型法以及层次分析法。

ADC 模型法是美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的系统效能模型，该模型将系统效能定义为系统性能满足一组规定任务要求程度的量度，它是可用度，可信赖度及能力的函数^[28]。具体表现在 A 表示了系统的可用性，即系统的在未使用之间的状态；D 则表示了在 A 已经给定的情况下是否可以完成任务；C 则表示了完成任务的程度。

层次分析法结合了定量分析和定性分析。它的基本原理是根据任务执行过程中需要考虑的各方面因素，将各方面因素进行统筹划分，划分为几个具体的维度因素，再从这几个维度出发向下扩展建立具体的评估因素，形成一个递接的、有序的层次结构。每一层的因素根据对描述任务的重要性建立重要性权值，最后计算最低层相对于对高层的重要性权值，所谓评估因素的评价依据。

通过介绍两种方法的原理，并结合本课题要实现的主要目标：对卫星系统执行海上船舶搜寻任务进行效能评估，在选择评估方法时选用层次分析法进行评估。

在使用评估方法的目的的角度进行分析，使用评估方法的主要目的是将建立的多个指标进行综合，得到最终的评估结果。同时在建立指标体系时，使用的建立方法和层次分析法的基本原理相符合，使用层次分析法将多个指标进行综合得到最终的评估结果。

ADC 模型法从任务执行的前期考虑了卫星系统可用性，在任务执行过程中考虑了卫星系统的可信性，即是否可以完成搜寻任务，最后对考虑了完成任务的能力。而在本课题中，评估的重点为不同卫星系统完成任务时的能力，即对整个卫星体系执行特定任务时的能力进行评估。通过对不同卫星系统的能力进行评估，选择出适合某个区域的最优的卫星系统。因此，在执行搜寻任务之前，假定了搜寻卫星系统可以立刻进行搜寻任务并在任务执行中期假定搜寻卫星系统是一直可信的。本课题更关注的是通过建立的指标反映卫星系统在某个方面的效能以及在多个方面进行综合的执行任务的效能。

基于以上分析，在使用评估方法时，本课题选择层次分析法，将多个指标进行综合得到最终的任务效能评估结果。

2.4.1 层次分析法

结合本课题的目的以及层次分析法的基本使用在本课题使用层次分析法过程中有以下几个步骤：

(1) 建立层次结构

通过对卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的需求进行分析。并从卫星系统的主要功能为获取信息这一角度，分为四个维度：信息准确性、信息时效性、信息获取性、信息表现型。从以上四个维度建立不同的层次结构，以实现可以充分反映待评估任务的大致需求和内在联系。

(2) 构造判断矩阵

根据建立的层次结构, 获取使用该效能评估体系评估方法的专家的意见, 结合专家意见对同一维度的指标进行比较。依据标度表如表 2.2 所示, 建立指标层的构造矩阵, 同时再对四个维度进行比较建立构造矩阵。构造矩阵的建立要充分采纳使用本方法进行评估的专家的意见, 进行合理构造。由于专家的不同会产生差异性, 使用多数服从少数的原则完成构造。

表 2.2 指标标度表

Tab.2.2 Index scale table

标度	含义
1	表示两个指标相比, 前者比后者同样重要
3	表示两个指标相比, 前者比后者稍微重要
5	表示两个指标相比, 前者比后者明显重要
7	表示两个指标相比, 前者比后者强烈重要
9	表示两个指标相比, 前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

(3) 计算指标权重

各指标的权重计算可以转化为每个判断矩阵的特征向量计算, 计算方式如下:

$$\varpi_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (2.11)$$

$$\omega_i = a_{ij} / \sum_{j=1}^n \varpi_{ij} \quad (2.12)$$

$$\omega_i = a_{ij} / \sum_{j=1}^n \varpi_{ij} \quad (2.13)$$

最终得到特征向量: $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n)^T$

(4) 权重一致性检验

由于再判断矩阵进行构造时, 可能会出现三个指标相互矛盾的情况。比如有三个指标 A, B, C, 其中 A 比 B 重要, B 比 C 重要, 但是 C 又比 A 重要。为了防止这种情况的发生, 需要对得到的权重进行一致性的检验, 检验指标权重的正确性。检验原则为: 使用 CR 代表判断矩阵的一致性, 当 $CR < 0.1$ 时, 说明该判断矩阵具有较好的一致性。

计算方式如下:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (2.14)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.15)$$

2.4.2 模糊理论

在对效能评估体系进行完善时，建立了九个指标。在建立的指标中有一些指标的计算结果为数值型指标，例如目标识别能力、目标搜寻能力、覆盖能力。而还有一些指标得到的结果为时间数值，例如任务响应能力、重访能力。还存在一些指标的结果为一些等级的划分，例如数据传输能力、数据处理能力、搜寻幅宽、图像质量等。在对单个指标进行分析时，可以忽略出现的这种计算结果不统一的问题，但在应用层次分析法进行多指标计算综合效能评估结果时，就需要考虑将这些指标进行统一处理。主要处理的指标数据为时间数据和等级数据两种，在处理时采用模糊理论处理法进行处理。

使用模糊理论进行评估是运用模糊数学工具对事物做出综合评价，模糊数学是用比较准确的数学方法去描述存在的模糊现象^[51]。要实现此目的，最重要的为确定隶属函数，隶属函数的准确性决定了模糊评价的准确性。所以如何确定隶属函数成为了需要思考的问题。但是不管用什么方法确定，总之是要建立一个从该属性好坏到[0,1]的一个映射关系，用来反映一个属性的好坏程度，这种函数关系的建立必须要符合客观规律。在本课题中对于一些时间数据指标或者等级数据指标描述了卫星系统在某一方面的能力，使用模糊理论对这些数据进行归一化处理可以很好的解决指标数据不统一的问题。

在隶属函数以及隶属满意度的建立过程中，需要分析到需要描述的事物属性的优劣特性，在本课题中表现为一个指标所归一化的结果，由使用专家对隶属函数以及隶属满意度进行确定。对于时间指标来说，通过建立隶属函数的方式进行归一化处理；对于等级指标来说，通过建立模糊满意度的方式对指标进行归一化处理。

2.5 本章小结

本章首先介绍了遇险船舶搜寻任务的各部分组成，详细阐述了各部分在任务仿真中需要发挥的作用。并通过介绍任务执行流程，从四个维度信息准确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性出发分析任务需求，建立了七个指标：目标识别能力指标、卫星搜寻概率指标、任务响应能力指标、重访能力指标、覆盖能力指标、搜寻幅宽指标、图像质量指标，这些指标表征了遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三者的联系以及遥

感卫星系统自身的协同性。并对各指标的计算方法以及指标的影响因素进行描述。同时介绍了使用模糊理论将一些定性数据进行定量化处理的方法，以及层次分析法的基本使用，提供了多指标综合评估的计算方法。

3 基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件

上章中介绍了遥感卫星系统搜寻海上遇险船舶任务的任务具体流程,并从任务需求角度以及各对象之间的联系角度出发构建了面向海上搜寻的遥感卫星系统效能评估体系。为了实现对面向海上搜寻任务的遥感卫星系统效能进行评估,需要对搜寻任务的执行过程进行实际仿真。根据任务实际仿真得到原始数据,并用于效能评估指标体系中指标的计算,通过对指标的分析完成效能评估。

在进行任务实际仿真中,首先需要考虑遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三类对象的主要功能及在搜寻任务中需要考虑的对象模型参数,并根据 STK 仿真软件提供的对象模型,完成三类对象的模块化设计。根据任务工作流程以及指标计算过程中需要的原始数据,结合 STK 仿真软件的实现功能完成数据计算模块的设计以及指标计算模块的设计,最后完成软件的总体框架设计并进行开发。在开发过程中,使用 C++ 编程语言对 STK 仿真软件二次开发完成基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件。

3.1 基于遇险船舶多星协同搜寻任务的对象模块设计

本节对任务中三类对象如何在软件中进行实际仿真进行了详细的介绍,介绍了三类对象在仿真任务中需要考虑的模型参数以及各参数的影响因素。并结合 STK 仿真软件中已有的对象模型结合需要考虑的参数,对三类对象的仿真模块进行设计。对于遥感卫星系统的模块化实现,需要考虑其卫星平台模型以及卫星载荷模型。

实现三类对象的仿真后,通过任务的工作流程进行数据处理模块的设计,主要包含对可见性时间数据的处理。最后根据处理后的数据结合各指标的计算方法进行指标计算模块的设计。

3.1.1 卫星平台模型介绍及软件实现

遥感卫星系统在搜寻任务中发挥的功能包括搜寻遇险船舶以及与地面站进行通信。所以将遥感卫星系统中卫星功能的不同分为搜寻卫星和通信卫星两类,其中搜寻卫星是携带光学载荷、合成孔径雷达载荷等执行海上遇险船舶搜寻任务的成像卫星。通信卫星主要实现各成像卫星之间以及通信卫星与地面站之间的指令传输。

在对搜寻任务进行仿真时,通信卫星可以由中继卫星或者高轨静止卫星实现通信功能。通信卫星发挥作用主要包括:地面站向卫星系统发送探测指令;高轨静止卫星向低轨卫星发送探测指令。在任务的仿真中将高轨静止轨道卫星作为通信卫星,只考虑其轨道参数。

在对搜寻卫星进行仿真时考虑卫星平台模型以及卫星载荷模型两方面因素。其中卫星平台模型包含了轨道模型和机动模型。两者是计算卫星位置、速度、探测和接收可见性等数据并进行仿真的依据。

在 STK 中实现卫星轨道模型的仿真时主要依据六参法确定轨道，各参数与形状和位置的关系如图 3.1(a)所示。其中半长轴、偏心率、倾角用来决定卫星轨道的形状。升交点经度、近地点幅角、平近点角用来决定卫星轨道的位置^[15]。

卫星在轨运行期间需要进行大量的姿态机动来完成预定的遥感任务、建立与中继卫星、地面站的姿态指向关系。卫星机动模型表示卫星姿态从一个状态转换为另一状态，在 STK 的仿真中构建模型的主要参数是机动角速度、机动范围、姿态稳定度等。卫星姿态表示卫星的指向性和指向范围，其主要参数是指向精度、调节范围等如图 3.1(b)所示。

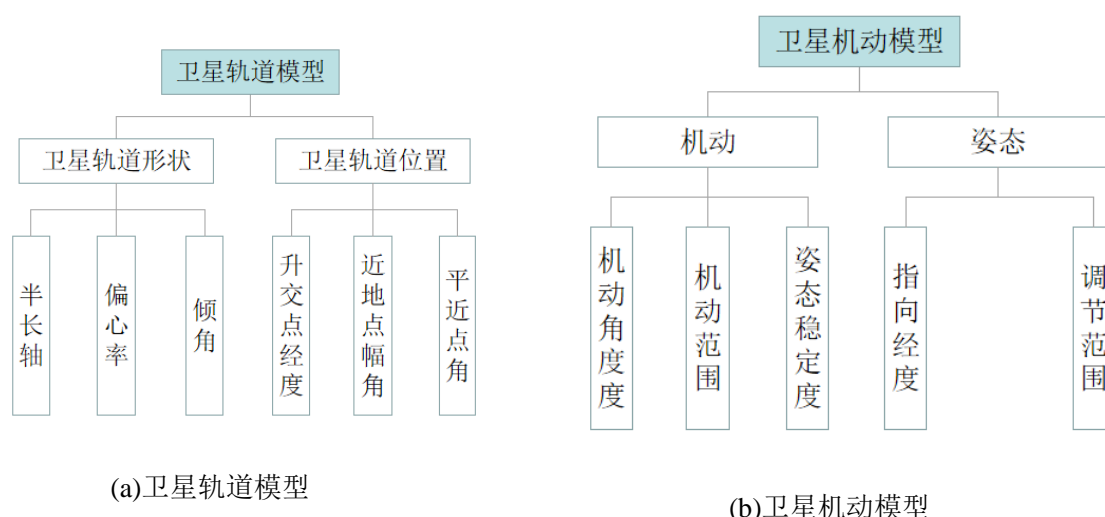
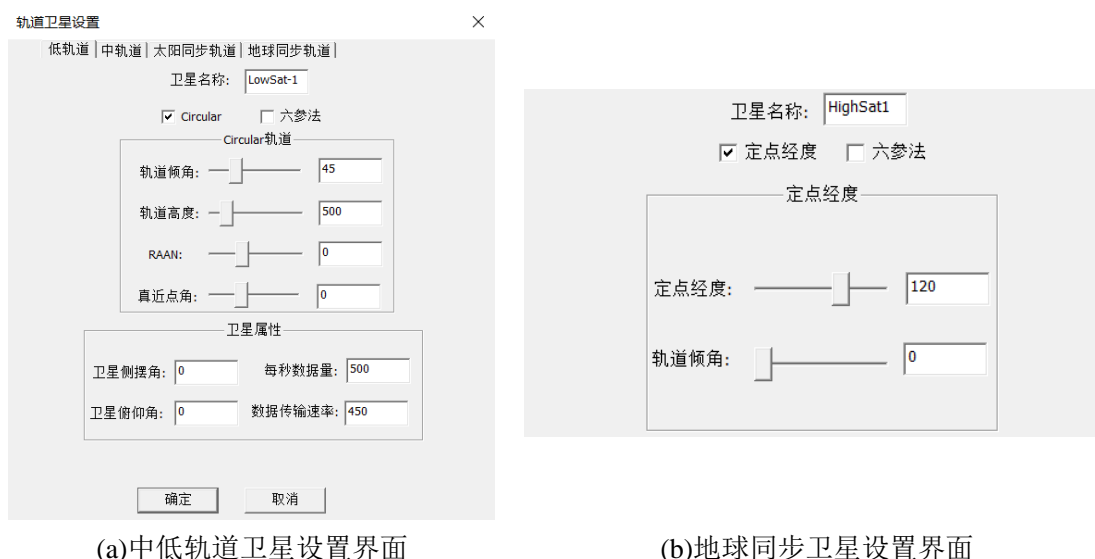


图 3.1 卫星平台模型

Fig.3.1 Satellite maneuvering model

效能评估软件对卫星轨道模型进行仿真时，由于在实际的场景中卫星数量众多，并且参数值多为小数，输入较麻烦，对六个参数进行输入需要耗费很多时间。因此在进行卫星平台的模块化设计时，从简化卫星平台模型参数输入的角度进行设计。

第一个方面，根据六个参数所代表的意义，将参数进行简化。中低轨道卫星的参数简化为轨道高度、轨道倾角、RAAN 以及真近点角。其中 RAAN 和真近点角决定了在轨道的位置，具体实现界面如图 3.2(a)所示。高轨静止轨道的参数简化为定点经度和倾角，具体实现界面如图 3.2(b)所示。



(a)中低轨道卫星设置界面

(b)地球同步卫星设置界面

图 3.2 卫星模型插入界面

Fig.3.2 Satellite model insertion interface

第二个方面，提供星座生成功能。一个星座中的卫星轨道高度、轨道倾角相同，并且多颗卫星在轨道中的分布为均匀分布。在一个星座的实现中可以根据一个卫星的参数完成整个星座的实现。在 STK 仿真软件中，提供了三种星座类型：Delta、Star 和 Custom。主要区别为升交点赤经（RAAN）的分布，Delta 星座轨道面的升交点赤经均分 $0\sim 360^\circ$ 范围。Star 星座轨道面的升交点赤经均分 $0\sim 180^\circ$ 范围。Custom 星座轨道面的升交点赤经均分范围由用户设置。在仿真软件中，对 STK 二次开发，同样提供了三种星座生成方式，具体实现界面如图 3.3 所示。



图 3.3 星座生成界面

Fig.3.3 Constellation generation function

第三个方面，提供多种轨道的插入界面。由于现有的卫星发射轨道为固定的几种轨道，效能评估软件提供了常见的几种轨道类型以供选择。

由于对遥感卫星系统执行搜寻任务的效能进行评估时主要关注卫星间的协同工作能力，所以卫星机动模型中的机动角速度、姿态稳定度作为整个体系的影响因素时影响较小，所以在效能评估软件中实现机动模型仿真时主要考虑搜寻卫星中姿态模型的调节范围。具体为设定卫星的侧摆角度和俯仰角度。

3.1.2 卫星载荷模型介绍及软件实现

遥感卫星系统中的搜寻卫星携带的载荷模型根据工作方式的不同，可以分为光学载荷模型和合成孔径雷达载荷模型两大类。

光学载荷模型根据成像原理不同可分为线阵式光学载荷模型和面阵式光学载荷模型。在搜寻任务中，线阵式光学载荷应用在太阳同步轨道卫星、临界倾角轨道卫星、圆形轨道卫星上。面阵式光学载荷应用在高轨静止轨道卫星的光学载荷中。下面对任务中两类载荷模型成像原理及建立参数进行介绍。

(1) 线阵式光学载荷模型

线阵式光学载荷通过卫星轨道的推扫运动形成对地成像，可以对星下点范围进行成像，也可以通过卫星平台的机动对星下点两侧范围进行成像。线阵式光学载荷采用线阵式感光器件对地面进行成像，其瞬时视场可以看作一条线。线阵式光学载荷在推扫成像中会形成一个长条带，其基本成像过程如图 3.4 所示。

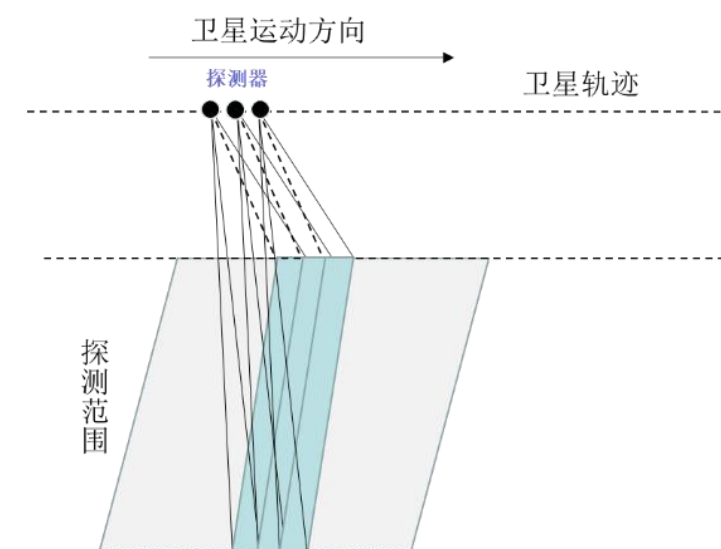


图 3.4 线阵相机成像原理图

Fig.3.4 Linear array camera imaging schematic

根据线阵可见光相机特点,将其成像过程等价为一个细长条形探测器推扫覆盖地面形成条带覆盖范围,其平行于卫星移动轨迹上的宽度很小,垂直于卫星移动轨迹的长度较长。加入侧摆角后在本课题中将其探测过程等效为一个圆锥体。

建立的线阵式光学载荷的模型参数有:地面分辨率、视场角、单次成像时间、最大侧摆角、最大俯仰角和数据率等。

地面分辨率是指光学载荷在地面上的最小可分辨尺寸,其由载荷的像元尺寸大小所决定。线阵推扫成像具有较高的地面分辨率,由于线阵式光学载荷拥有较高的分辨率,故在卫星系统中多用于对目标的识别确认。

视场角是线阵方向对地面所张的角,定义如图 3.5 所示,其决定了推扫成扫过条带探测范围,视场半角越大,探测范围越大。

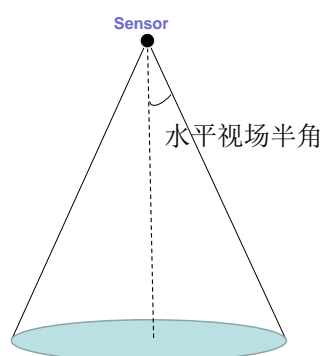


图 3.5 线阵光学载荷视场角

Fig.3.5 Field of view angle of line array optical load

单次成像时间指卫星携带的载荷对探测目标的成像时间。成像时间与数据率的乘积决定了总体数据量,成像时间越长,其扫描区域越大,对应的载荷产生的数据量就大。为了避免庞大的数据量造成的资源浪费,在载荷实际工作中,载荷的单次成像时间为一个固定的很小的值。

最大侧摆角度定义了载荷推扫中可以偏离星下方向的最大角度,可以调节载荷的探测方向,改变推扫成像区域,侧摆角度为载荷沿自身坐标系 Y 轴的摆动角度。

俯仰角度同侧摆角度相同,可以调节载荷的探测方向改变推扫成像区域,侧摆角度为载荷沿自身坐标系 Z 轴的摆动角度。

数据率是指在成像中图像数据记录的速率。数据率和成像时间直接决定了数据量,而数据量会直接影响后续该数据在何时间段内才能传输到地面。

另外,根据成像波长类型,可分为可见光全色,可见光多光谱以及红外等。可见光载荷卫星是目前应用最多的成像卫星,此类卫星通过相机对海上遇险船舶成像,直观获取目标特征信息,并提取目标尺寸、形态、纹理、细节结构等特征,但是由于成像原理,这类探测方式受昼夜和云量的影响较大。

红外成像探测卫星根据海面的红外线分布和的红外线分布的不同实现对的探测。并且红外成像载荷利用光学辐射信息成像实现对特定区域的观测,但是其分辨率低于可见光探测卫星,且同样受云量的影响。

STK 仿真软件中提供了不同种类的载荷定义方式,主要包含 Simple Conic、SAR、Rectangular、Half Power、Custom 和 Complex Conic 五种。由于在实际仿真中会考虑侧摆的影响,因此在效能评估软件中使用 Simple Conic 定义方式生成一个圆锥体,用于线阵式光学载荷在侧摆情况下的仿真实现,并且输入线阵光学载荷的分辨率大小。线阵式光学载荷模型实现界面图 3.6(a)如所示,仿真实现如图 3.6(b)所示。



(a)线阵式光学载荷设置界面

(b)线阵式光学载荷仿真实现

图 3.6 线阵式光学载荷模型软件仿真实现

Fig.3.6 Simulation and realization of linear array optical load model

(2) 面阵式光学载荷模型

面阵光学载荷采用面阵式感光器件对地面进行成像。面阵式光学载荷放置于地球同步轨道卫星上,对固定区域进行成像,并通过摆动对不同区域进行观测。

面阵式光学载荷的瞬时视场为矩形探测区域,利用卫星的摆动实现不同区域的监视成像,其成像模型如图 3.7 所示。

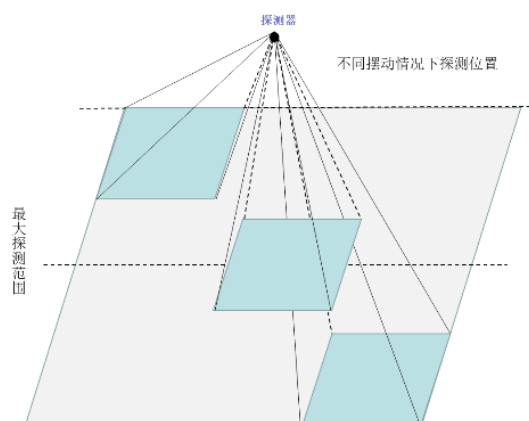
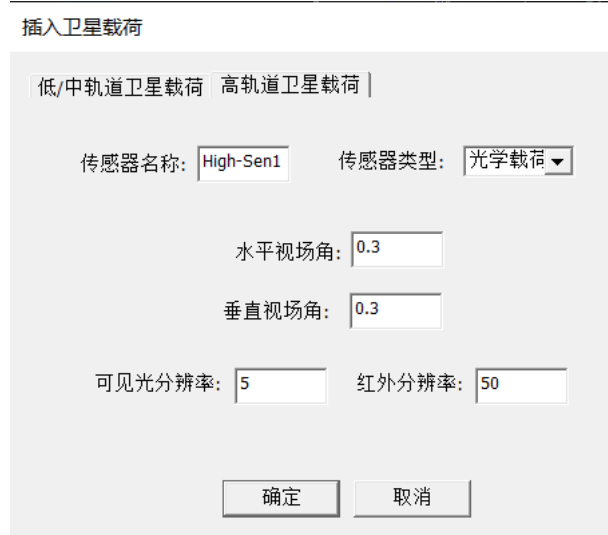


图 3.7 面阵凝视光学载荷成像模型

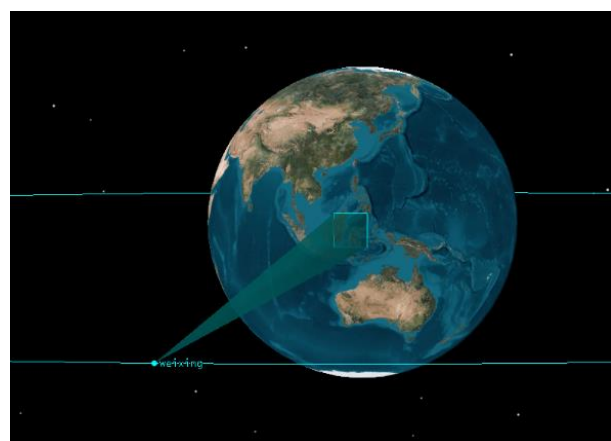
Fig.3.7 Array staring optical load imaging model

面阵式光学载荷的仿真模型参数与线阵式光学载荷模型参数类似，有地面分辨率、视场角、成像时间、最大摆动角度以及数据率。但与线阵式光学载荷模型不同的是面阵式光学载荷的视场角分为垂直视场角和水平视场角。根据成像波长类型，面阵式光学载荷可分为可见光全色和红外两种类型。

在效能评估软件中使用 STK 中 Rectangular 方式定义面阵式光学载荷模型，并输入面阵式光学载荷的分辨率大小。模型实现界面如图 3.8(a)所示，模型的仿真实现如图 3.8(b)所示。



(a)面阵式光学载荷设置界面



(b)面阵式光学载荷仿真实现

图 3.8 面阵式光学载荷模型仿真实现

Fig.3.8 Simulation and realization of face array optical load model

(3) 合成孔径雷达载荷模型

合成孔径雷达载荷与光学载荷的区别除了工作方式的差别外，还表现在成像范围中，合成孔径雷达载荷只能以一个固定范围的角度进行成像。目前我国研制的 SAR 卫星采用单侧视天线，卫星只能单向正侧视成像^[15]。在遥感卫星系统执行搜寻任务过程中，主要使用到了 SAR 载荷的三种成像方式，分别为条带模式、聚束模式和扫描模式。

条带式 SAR 是 SAR 的标准工作模式，其天线照射方向相对于卫星平台运动方向保持固定，天线波束以卫星平台速度沿航迹运行，使天线在地面上均匀扫过条形地带，条带式 SAR 在地面上成像的足迹是一个椭圆形，卫星运动使椭圆形向前推进形成条形探测区域。

聚束式 SAR 通过对天线波束的指向进行控制，使天线波束在整个数据采集期间始终照射地面一小块区域，实现对固定区域的重复观测，这种成像方式是一种高分辨率成像模式，其成像过程等价于对一块固定区域进行探测，不论卫星在轨迹中的何种位置，卫星都可以通过改变卫星的姿态来对固定区域进行探测。

扫描式 SAR 成像方式提高了成像幅宽，增大了探测范围，通过将天线在距离不同向子测绘带之间循环切换，将合成孔径时间分配到不同的子测绘带，以实现了对大区域的扫描观测^[18]。三种成像模式的成像原理如图 3.9 所示。

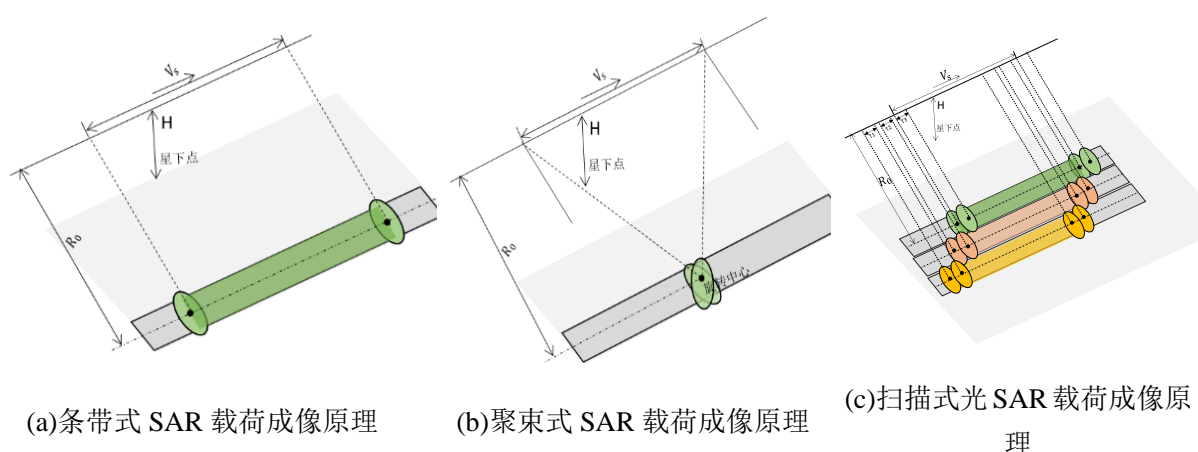


图 3.9 SAR 载荷成像原理图

Fig.3.9 Working principle diagram of scanning SAR

考虑在遥感卫星系统中 SAR 载荷需要考虑的载荷参数，主要包括分辨率、天线波束角以及天线波束入射角。

空间分辨率分为方位分辨率和距离分辨率。方位分辨率为在航向方向上可以区分两个物体的最小分辨率，距离向分辨率为雷达分辨两个近距离目标的能力。

天线波束入射角也叫视角，是雷达波束与垂直表面直线之间的夹角如图 3.10 所示，改变入射角以获取不同的成像宽幅，入射角会随着近距离到远距离的改变而改变，依次影响成像几何。

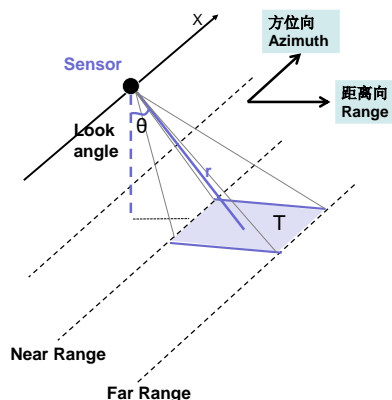


图 3.10 天线波束角

Fig.3.10 Antenna beam angle

天线波束角以及天线波束入射角主要决定了 SAR 载荷的探测范围。STK 仿真软件中提供了 SAR 载荷探测范围的定义方式，使用前向排除角、后向排除角、最大俯仰角和最小俯仰角四个角度确定。效能评估软件基于此实现对三种成像模式下 SAR 载荷的仿真实现。

SAR 载荷模型的实现界面如图 3.11 所示。条带成像模式的仿真实现如图 3.12(a)所示。扫描成像模式的仿真实现如图 3.12(b)所示。聚束模式的仿真实现如图 3.12(c)所示。其中条带式 SAR 载荷和扫描式 SAR 载荷的区别在于成像幅宽的不同。

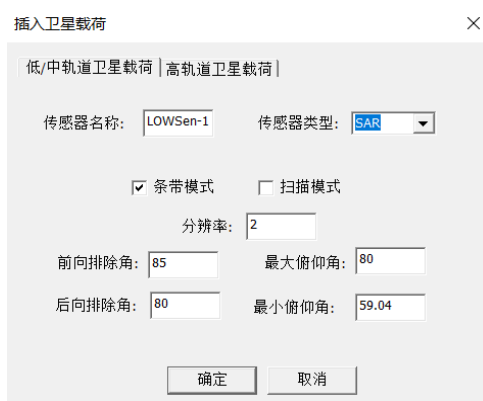


图 3.11 SAR 载荷模型插入界面

Fig.3.11 SAR payload model insertion function

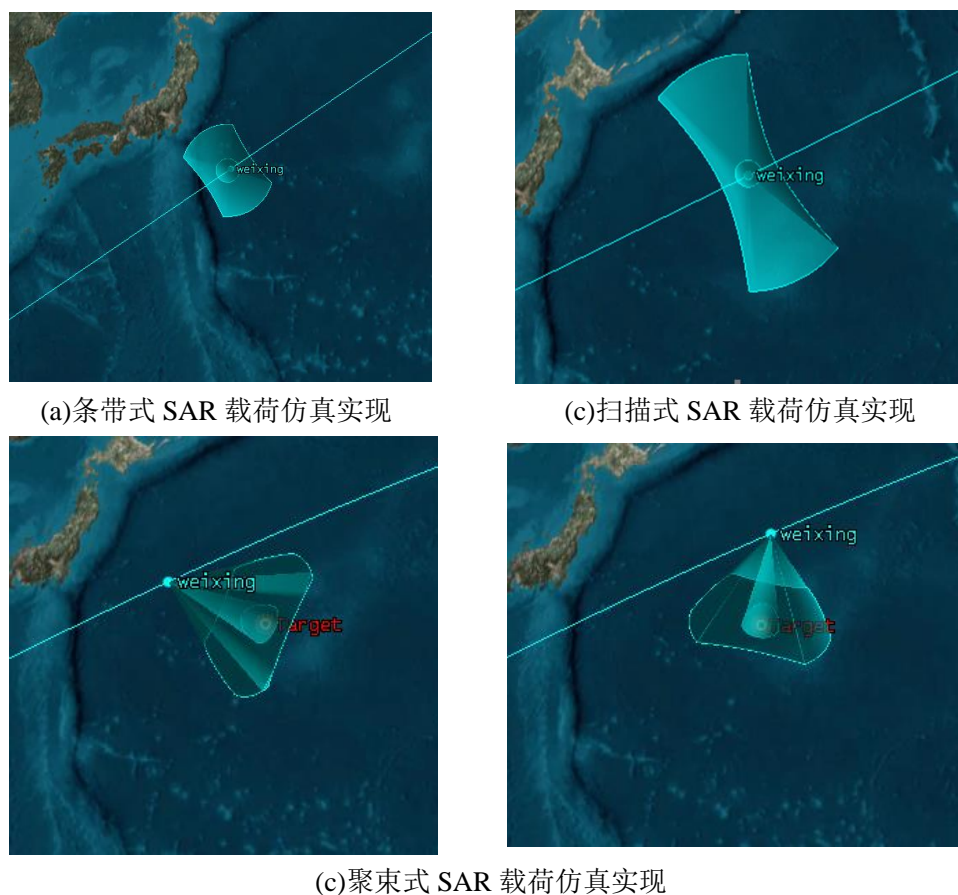


图 3.12 SAR 成像模型仿真实现

Fig.3.12 SAR imaging model simulation implementation

3.1.3 地面站模型介绍及仿真实现

地面站在搜寻任务中主要负责与卫星的信息交互，主要包含两个方面：将地面对卫星系统的指令发送到卫星系统；接收卫星系统下传的数据信息。所以在搜寻任务执行中地面站模型需要考虑的参数包括地面站经纬度坐标、天线覆盖角度以及数据传输速率。天线覆盖角度决定了对卫星数据的接收范围，当卫星位于天线指向范围内时，地面站与卫星之间可以进行通信，星地通信时长取决于卫星位于地面站天线指向角内的时间。同时天线覆盖角度以及数据传输速率共同决定了卫星运行到轨道的什么位置可以实现与地面站的通信。

STK 仿真软件中提供了 Facility 对象实现地面站，通过输入经纬度坐标确定地面站对象位置，通过为地面站添加 Sensor 实现天线覆盖角度。在效能评估软件中地面站模型的实现中，使用相同的方式对地面站模型进行仿真实现。同时设定地面站的数据传输速

率可以匹配各卫星的数据传输速率。地面站模型实现界面如图 3.13(a)所示。仿真实实现如图 3.13(b)所示。

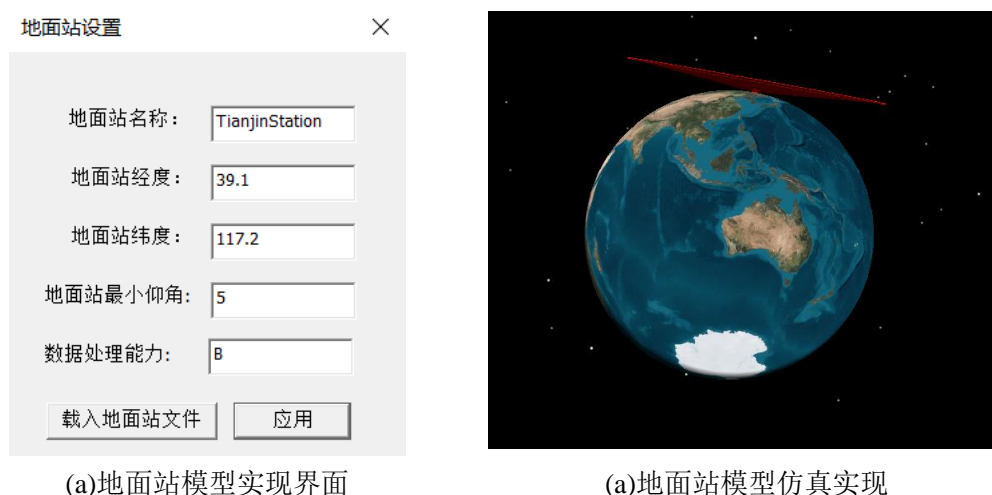


图 3.13 地面站模型软件实现

Fig.3.13 Earth station model insertion function

3.1.4 遇险船舶模型介绍及软件实现

在搜寻任务中，遇险船船舶为遥感卫星系统的信息获取目标。考虑任务中遇险船舶模型的仿真时，从尺寸大小、移动航迹、搜寻区域、航线环境属性四个角度进行仿真。STK 仿真软件中提供了 Ship 对象，效能评估软件中使用 Ship 对象作为搜寻船舶模型的软件实现。

尺寸大小主要表现在长和宽两方面，根据尺寸大小和卫星载荷分辨率对海上遇险船舶的辨识程度进行判断，设置界面如图 3.14 所示。

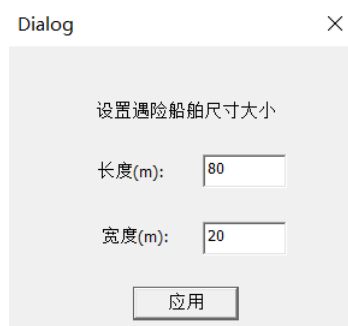
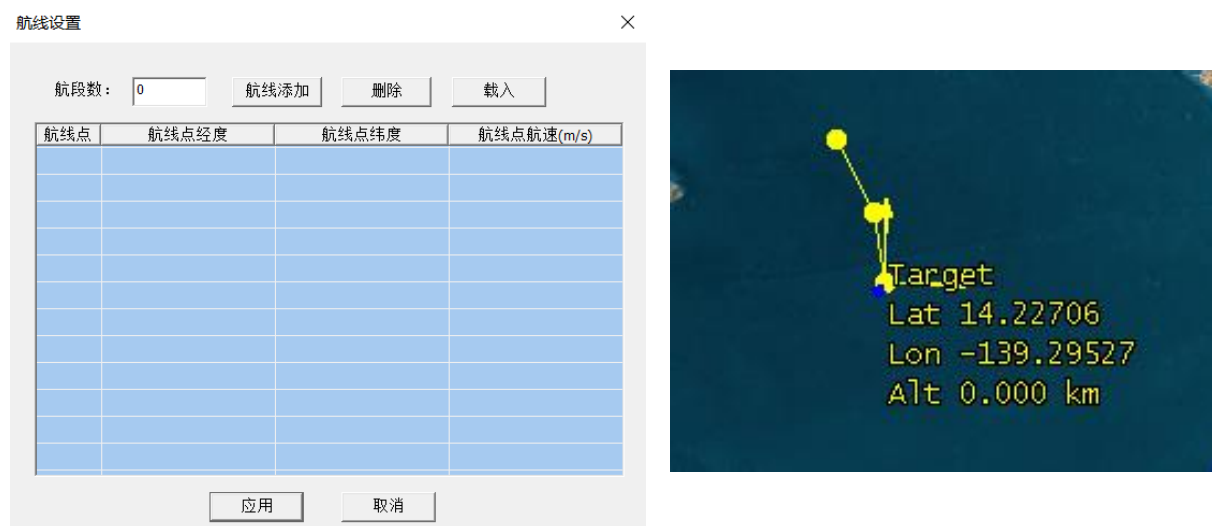


图 3.14 遇险船舶尺寸设置界面

Fig.3.14 Size setting interface for ships in distress

移动航迹即为遇险船舶的预估的运动轨迹，由航线点和航线速度两者确定。定义航线时有两种定义方法，一种为载入航线文件方式，界面如图 3.15(a)所示。一种在 3D 视图中直接进行航线划定，界面如图 3.15(b)所示。



(a)遇险船舶航线载入航线文件界面

(a)遇险船舶航线 3D 显示区插入界面

图 3.15 搜寻船舶航线设置示意图

Fig.3.15 Search vessel route setting

搜寻区域指在船舶发生遇险时，根据失去通信的最后位置，以及大致航速划定一个搜寻区域，作为船舶可能出现的区域。对于搜寻区域的确定由效能评估软件自动生成，以搜寻船舶的起始位置作为搜寻区域的中心，根据制定的搜寻时间以及航线的航速确定区域轮廓。搜寻船舶模型的软件实现如图 3.16 所示。

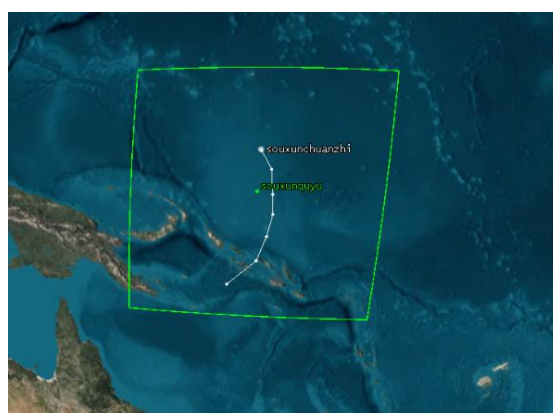
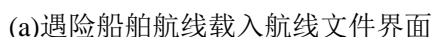


图 3.16 搜寻船舶仿真模型实现

Fig.3.16 Search ship simulation model implementation



(a)遇险船舶航线 3D 显示区插入界面

图 3.17 搜寻船舶航线环境设置界面

Fig.3.17 Search ship route environment settings interface

3.1.5 数据处理模块设计

效能评估软件的数据计算模块可以分为可见性时间数据计算模块、区域覆盖性计算模块以及对象距离计算模块，下面对三类模块的具体实现进行介绍。

(1) 区域覆盖性计算模块

区域覆盖性计算模块根据 STK 仿真软件提供的“Coverage”功能，计算遥感卫星系统对搜寻区域的覆盖率。具体实现为：将搜寻区域进行网格化划分，划分为小区域，计算遥感卫星系统在任务过程中对小区域的覆盖性，最后将结算结果合并处理计算遥感卫星系统对搜寻区域的覆盖性。

(2) 对象距离计算模块

对象距离计算模块主要根据 STK 仿真软件提供“Distance”功能，计算成像卫星在对遇险船舶进行成像时与船舶的距离。依据该距离结合卫星的星下点距离计算出侧摆情况下的侧摆角度，并实现对卫星摆动后分辨率的计算。

（3）可见性时间计算模块

效能评估软件在对任务进行仿真，通过调用 STK 仿真软件 API 接口实现可见性计算功能得到对象之间的可见性时间数据。可见性时间数据是 STK 仿真软件中一个重要的功能和数据类型，它描述了一个对象相对于另一个对象在可视范围内的时间段。

在效能评估软件中可见性时间数据根据计算对象的不同分为四种：高轨卫星和低轨卫星之间、低轨卫星和地面站之间、低轨卫星载荷和遇险船舶之间、低轨卫星载荷和搜寻区域之间。对于高轨卫星和低轨卫星之间以及低轨卫星和地面站之间的可见性时间数据代表了两者的可以相互通信的时间段；低轨卫星载荷与遇险船舶之间的可见性数据代表了卫星载荷可以探测到遇险船舶的时间段；低轨卫星载荷与搜寻区域之间的可见性时间代表了卫星载荷搜寻遇险区域的时间段。

通过处理各类对象之间的可见性时间数据作为搜寻任务仿真时的实际数据。根据任务执行流程对处理思路进行介绍，具体流程如图 3.18 所示。

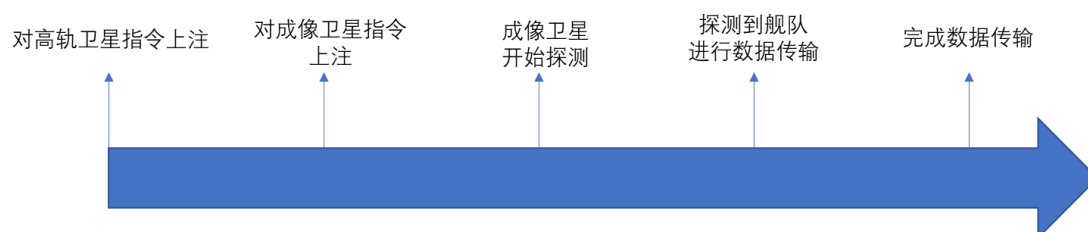


图 3.18 搜寻任务工作流程

Fig.3.18 Search task workflow

首先地面站向高轨静止卫星发送搜寻指令，引导高轨静止卫星开始执行搜寻任务。

根据软件中选取的成像卫星指令上注方式，处理高轨卫星和低轨卫星之间以及低轨卫星和地面站之间的可见性时间数据，得到每个成像卫星完成指令上注的时间。在高轨静止卫星进行指令上注时选取该成像卫星与高轨静止卫星最早的可见性时间数据为该成像卫星的指令上注开始时间。在地面站进行指令上注时选取该成像卫星与地面站最早的可见性时间数据作为该成像卫星的指令上注开始时间。

成像卫星完成指令上注后开始执行探测任务，处理低轨卫星载荷与遇险船舶之间的可见性时间数据。选取在指令上注时间之后的两类对象可见性时间数据作为低轨成像卫星探测到遇险船舶的成像时间。

低轨成像卫星在完成成像以后需要讲成像信息传输到地面站，处理低轨卫星和地面站之间的可见性时间数据。选取在卫星对遇险船舶成像时间以后该卫星与地面站最早的

可见性时间作为成像卫星与地面站数据传输的时间，同时该时间段还需要满足可以以特定的传输速率进行成像数据的传输。

以上介绍的三类可见性时间数据对任务的影响关系如图 3.19 所示。

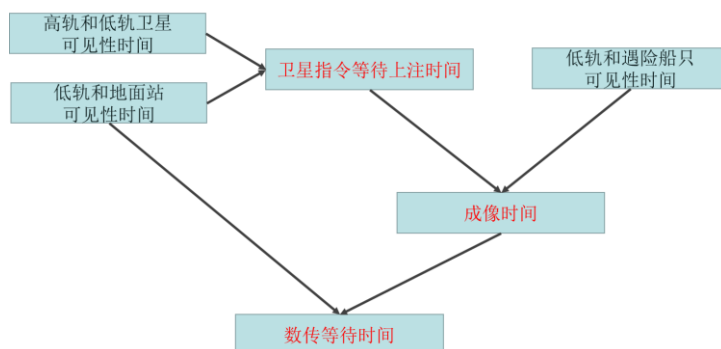


图 3.19 可见性时间与任务时间影响关系

Fig.3.19 The relationship between visibility time and task time

3.1.6 指标计算模块设计

指标计算数据模块主要功能为根据仿真得到的数据进行指标数据计算。在上述七个指标目标识别能力指标、任务响应能力指标、重访能力指标以及探测幅宽指标的计算结果不只是一个数值计算结果，需要用对此类数据进行展示，因此对这四个指标的指标计算方法进行介绍并对指标数据进行展示。

目标识别能力通过分辨率进行表征。在任务仿真时，系统的目标识别能力由搜寻到遇险船舶的第一颗遥感卫星的完成图像数据传输的分辨率进行表征，并通过约翰逊准则得到各个程度的概率计算，其指标显示界面如图 3.20 所示。

目标识别能力指标

第一颗成像卫星: CF-311

成像载荷类型: SAR

分辨率: 3

发现概率: 1

识别概率: 1

确认概率: 0.642

图 3.20 目标识别能力指标显示界面

Fig.3.20 User interface for target recognition capability indicator

遥感卫星系统的任务响应能力用第一颗搜寻到船舶并完成数据传输的卫星的任务响应时间作为最快响应时间，用来表征系统的任务响应能力，其指标显示界面如图 3.21 所示。

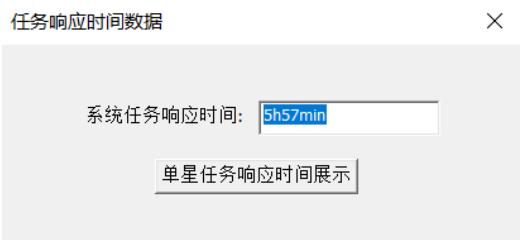


图 3.21 任务响应时间数据展示界面

Fig.3.21 User interface for task response time data display

重访时间根据轨道方式和载荷类型有两种统计方式，统计不同的统计方式下的重访时间并进行展示，展示界面如图 3.22 所示。

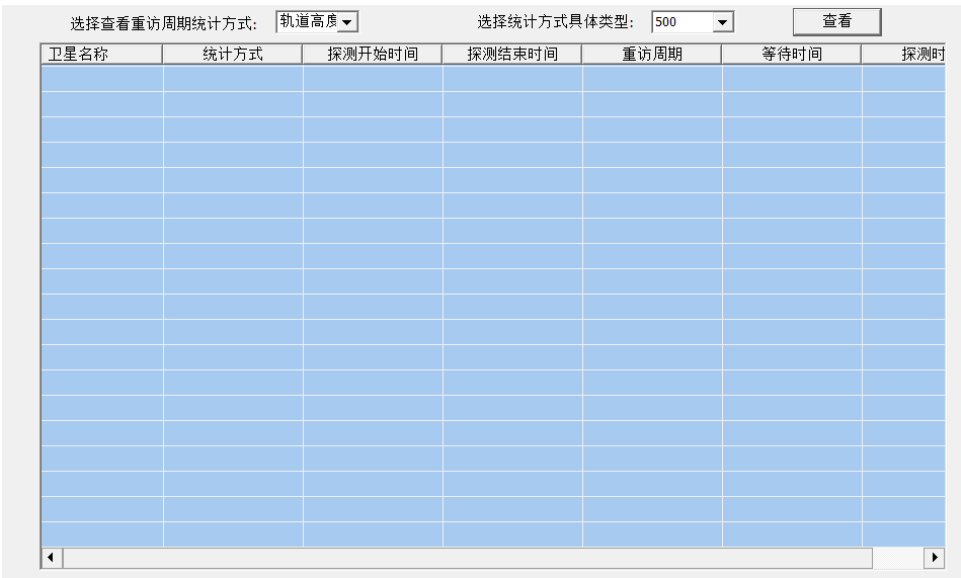


图 3.22 重访时间数据展示界面

Fig.3.22 User interface for revisit time data display

单颗遥感卫星的搜寻幅宽在进行计算时，考虑侧摆情况下可以实现的最大的搜寻幅宽作为指标计算结果，由于同一星座中的卫星携带载荷参数相同，因此在进行计算时，根据星座的不同进行搜寻幅宽的计算，并进行指标的展示，搜寻幅宽的展示界面如图 3.23 所示。

探测幅宽指标展示

卫星...	载荷类型	探测幅宽(km)
ZY-1	光学载荷	250
ZY-3	光学载荷	210
GF-1	光学载荷	180
TH-1	光学载荷	180
BJ-2	光学载荷	180
GJ-1	光学载荷	180
GF-3	SAR	250
1M-SAR	SAR	120
LT-1	SAR	150

图 3.23 搜寻幅宽数据展示界面

Fig.3.23 User interface for search bandwidth data display

3.2 海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件介绍

3.2.1 软件总体架构设计

上节针对遥感卫星系统搜寻海上遇险船舶这一特定任务分析了任务中各类对象所需考虑的模型参数，结合 STK 仿真软件完成了效能评估软件中各类对象仿真模块的设计，并介绍了使用到的 STK 仿真软件中的数据计算功能。基于此设计效能评估软件总体架构如图 3.24 所示。

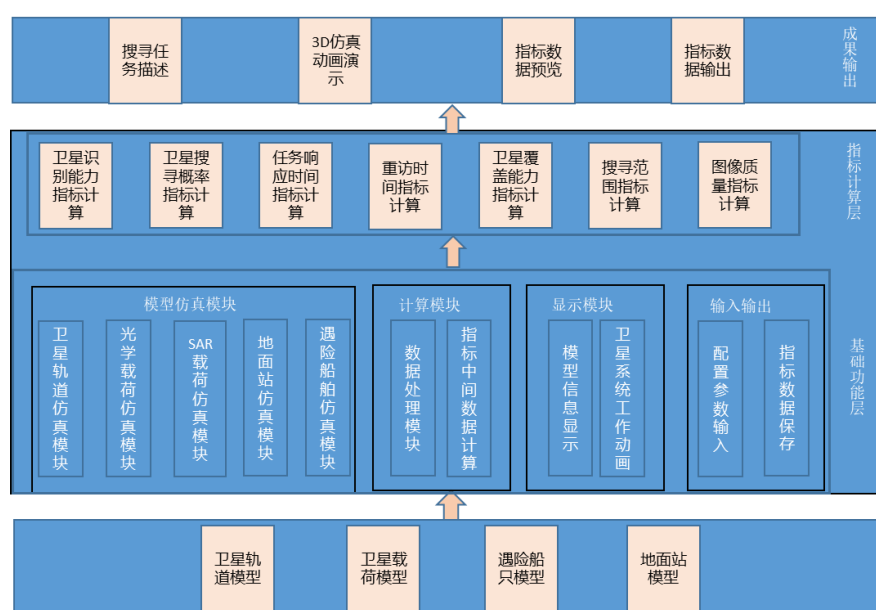


图 3.24 软件架构图

Fig.3.24 Software architecture diagram

其中总体架构可以分为四层：模型参数层、基础功能层、指标计算层、成果输出层。

模型参数层主要介绍了遥感卫星系统在执行海上遇险船舶任务过程中卫星系统、地面站系统、遇险船舶所要考虑的参数，为任务的仿真提供了模型基础。

基础功能层由上节建立的对象仿真模块以及基础计算模块组成，具体包括卫星平台模型仿真、卫星载荷模型仿真、地面站模型仿真、遇险船舶模型仿真。基础计算模块包含了基于 STK 仿真软件实现的可见性时间计算、覆盖性计算。同时还添加了显示信息模块、配置文件输入模块、数据保存模块。

指标计算层的主要目的为通过基础功能层中基础计算模块的原始数据，结合指标计算方法，对卫星系统执行搜寻任务的系统指标进行计算。

成果输出层的主要目的为实现全过程的动画仿真、指标计算结果的显示以及评估结果的显示，使用到了 STK 中提供的 3D 视图以及 2D 视图。

完成整体架构的设计后，对软件中任务的仿真流程进行介绍，在搜寻遇险船舶任务仿真中，软件依据此工作流程完成仿真，任务仿真流程如图 3.25 所示。

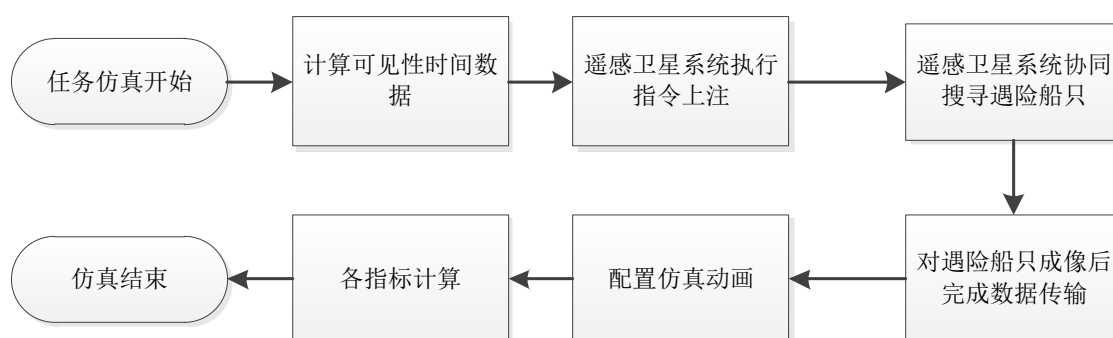
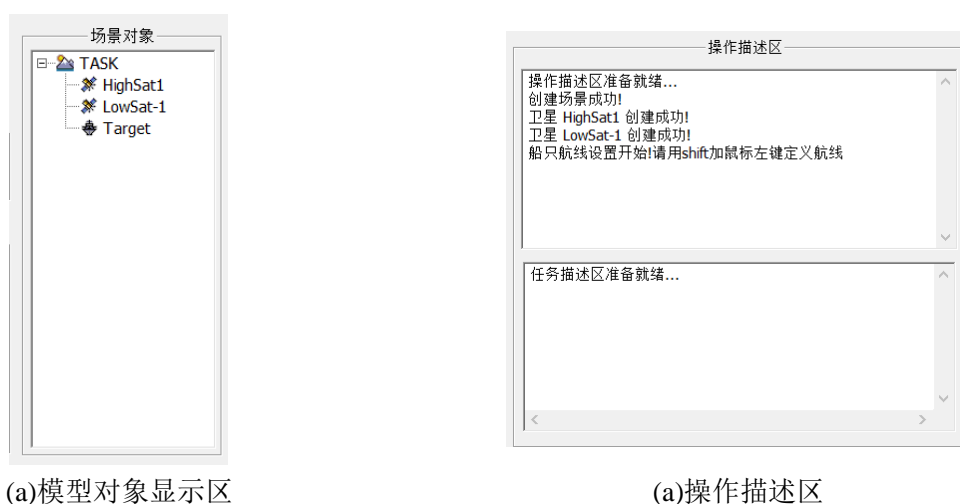


图 3.25 软件工作流程

Fig.3.25 Software workflow

对三类对象模型以及数据计算完成模块化设计后，使用 C++ 编程语言对软件界面进行开发。对 STK 仿真软件进行二次开发，整体界面如图 3.27 所示，界面上分为对象操作区、数据处理区和显示区三个部分。

对象操作区的主要功能为实现搜寻船舶模型、卫星模型以及地面站模型的仿真实现，并对模型特性进行设置，如图 3.26(a)所示。数据处理区为对原始数据和得到的指标数据保存和处理。显示区由 3D 画面、2D 画面和任务显示窗口组成。任务显示内容分为任务对象显示内容和任务执行显示内容，任务对象显示内容为对象的各种属性。任务显示内容显示执行搜寻任务过程中正在执行任务的卫星及其对应的探测载荷以及卫星系统的工作过程，界面显示如图 3.26(a)所示。



(a)模型对象显示区

(a)操作描述区

图 3.26 软件显示区界面

Fig.3.26 Software display area interface



图 3.27 软件界面

Fig.3.27 Software interface

3.2.2 软件操作流程

对软件的操作使用流程进行介绍，如图 3.28 所示。

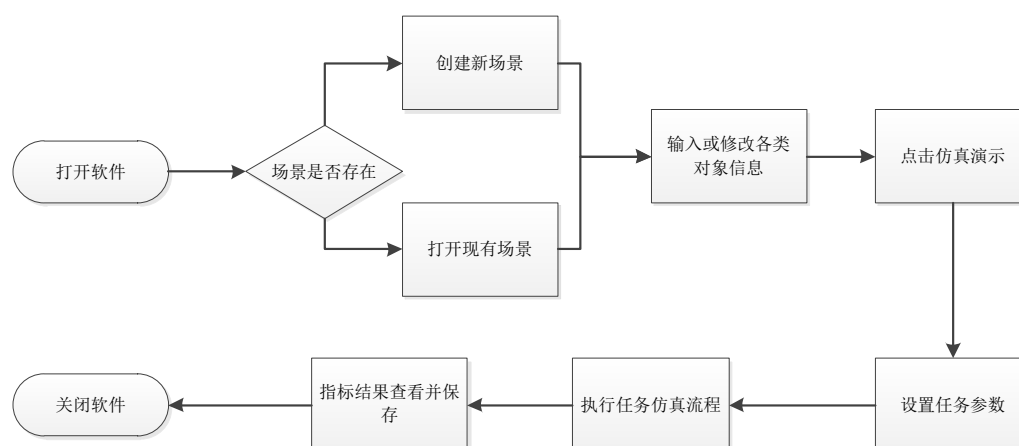


图 3.28 软件使用流程图

Fig.3.28 Software usage flow chart

在使用软件之前，对遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三类对象模块设计中的参数进行确定。

打开软件主界面，首先创建新的场景或者打开新的场景，根据需求设定场景的时间。

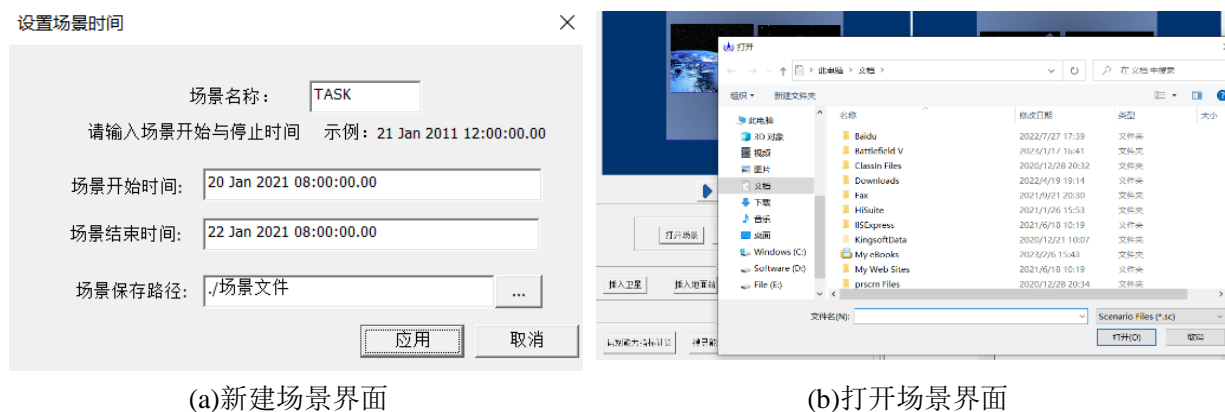
根据提供的卫星对象模型信息、地面站模型信息、遇险船舶模型信息将各类对象输入到软件中，并且可以根据需求对场景中的各类对象进行修改。

对象输入完成以后点击仿真演示，根据 STK 提供的可见性时间计算方式实现各类对象之间可见性时间数据计算，并根据软件的任务仿真流程进行任务的实际仿真，得到各中间数据，并对软件的动画演示进行配置。

点击各个指标计算按钮，根据中间数据进行各个指标数据的计算，将指标数据进行保存。

3.2.3 软件场景设置

STK 仿真软件中场景有两种打开方式，故在进行效能评估软件的开发过程中也提供了两种场景的打开方式。一种为新建场景，如图 3.29(a)所示。可以对场景的仿真时间进行设定，以及设定场景中各类文件的保存目录。另一种为载入已有的场景，如图 3.29(b)所示。



(a)新建场景界面

(b)打开场景界面

图 3.29 场景操作界面

Fig.3.29 The software enables the scene function

场景打开以后软件的运行界面如图 3.30 所示。其中 3D 显示区和 2D 显示区都可以通过鼠标拖动以及放缩查看，并通过 3D 显示区下的按键对场景动画进行开始、暂停、加速、减速、重置以及恢复视角操作。

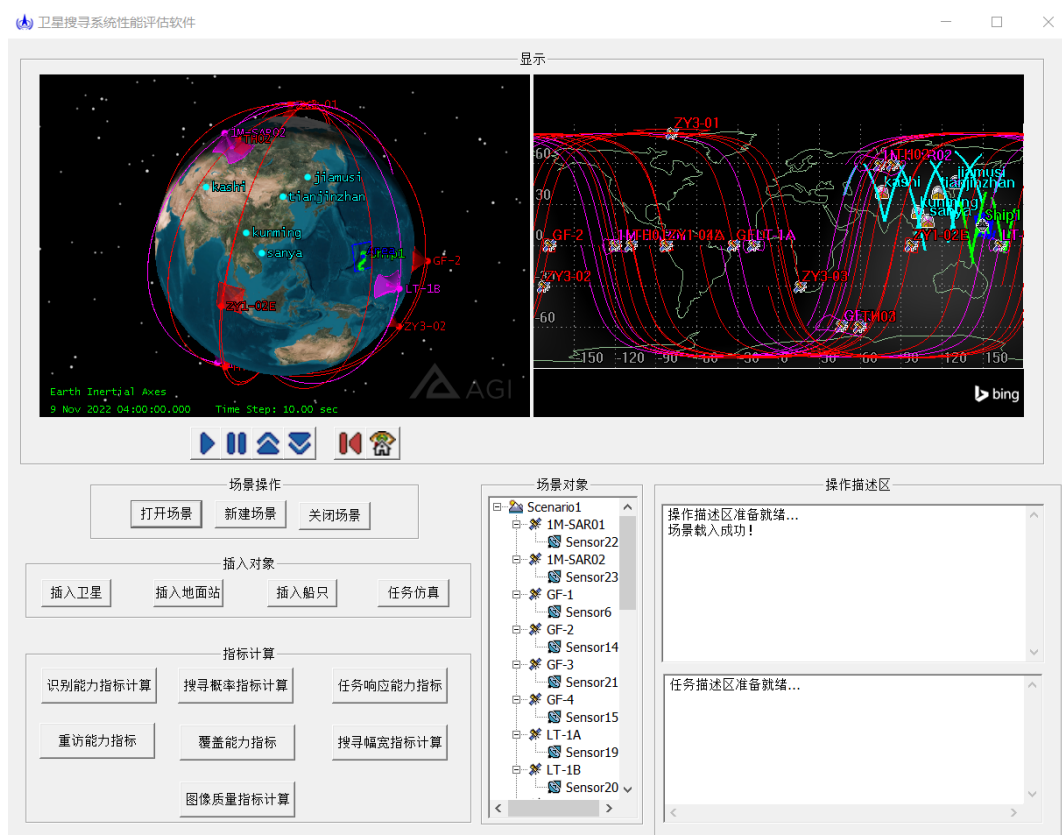


图 3.30 软件运行场景功能

Fig.3.30 Software running scenario functions

3.3 本章小结

本章介绍了多星协同执行海上遇险船舶搜寻任务过程中三类对象在仿真任务中需要考虑到的模型参数，并基于 STK 仿真软件对卫星平台模型、卫星载荷模型、地面站模型、遇险船舶模型进行了模块化设计。同时依据任务执行流程完成了数据处理模块设计以及指标计算模块的设计。对基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件的整体架构进行了设计，详细描述了每层架构的主要功能。介绍了效能评估软件的使用流程。

4 海上遇险船舶多星协同搜寻任务案例

以上章节对遥感卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的具体流程进行了介绍,并从遥感卫星系统、地面站系统、搜寻船舶三类对象的联系出发构建了从获遇险船舶信息角度的遥感卫星效能评估体系。介绍了多指标综合的评估方法以及指标归一化处理的模糊分析方法。分析了三类任务对象需要考虑的参数,并结合 STK 仿真软件中已有的对象模型完成了各任务对象的模块化设计,设计软件架构完成了基于 STK 的海上遇险船舶搜寻任务效能评估软件。本章中通过查找现有的民用卫星的资料,选取一定数量的卫星进行实际任务仿真,测试对象模型参数的完整性、效能评估指标体系的合理性、以及仿真软件的可用性。

根据所提供的仿真案例深入了解进行效能评估时的基本步骤,提供了对卫星系统执行任务时效能分析的分析思路。

4.1 任务对象模型参数介绍

对象模型参数的介绍分为三部分:卫星参数,包括卫星运行平台参数以及卫星载荷平台参数;地面站参数;搜寻船舶参数。

由于在执行搜寻任务时,高轨卫星会引导低轨成像卫星完成遇险船舶的搜寻,高轨卫星的分辨率通常较低,所以需要引导高分辨率的中低轨道成像卫星,在卫星星座的选取中,主要考虑这方面因素。通过查找现有的民用遥感卫星资料,得到遥感卫星的平台模型参数以及携带载荷模型参数,将选取的所有遥感卫星组成遥感卫星系统执行遇险船舶搜寻任务,卫星星座由 30 颗卫星组成,其中光学卫星 23 颗, SAR 卫星 7 颗,具体名称如下:

光学载荷卫星:资源一号(4 颗)、资源三号(3 颗)、高分一号(4 颗)、高分二号、高分四号、天绘一号(3 颗)、北京一号(3 颗)、高景一号(4 颗)。

SAR 载荷卫星:L 波段差分干涉 SAR 卫星(2 颗)、1 米 C-SAR 卫星(2 颗)、高分三号(3 颗)。

根据我国的地理位置,并结合现有的地面站,选取了东西南北中五个方位的地面站,分别包含天津站、三亚站、喀什站、佳木斯站、昆明站;其中地面站天线探测范围高于地面 5 度。

选取现有的常见的运输船舶,其尺寸大小为长 80m、宽 20m,选取平均航速为 10m/s。

光学卫星组成的星座由多个小型星座,同一星座中的卫星均匀分布在轨道面中。各星座组成具体参数如表 4.1 所示。

表 4.1 光学卫星卫星参数表

Tab.4.1 Table of optical satellite parameters

星座名称	最高分辨率	最小探测幅宽	摆动角度	轨道倾角	轨道高度
资源一号(4 颗)	2.36m	54km	25°	98.5°	780 km
资源三号(3 颗)	2.1m	50 km	22°	97.421°	506 km
高分一号(4 颗)	2 m	60 km	35°	98.0506°	645 km
高分二号	0.8m	45 km	35°	97.9080°	631 km
高分四号	50 m	400 km	--	定点 105.6° E	
天绘一号(3 颗)	2 m	60km	15°	97.3°	500 km
北京二号(3 颗)	0.8m	24km	45°	--	651 km
高景一号(4 颗)	0.5m	12 km	25°	--	530 km

SAR 载荷卫星星座的平台参数参数如表 4.2 所示。

表 4.2 SAR 卫星参数表

Tab.4.2 Table of SAR satellite parameters

卫星名称	最高分辨率	探测幅宽	摆动角度	轨道倾角	轨道高度
L 波段差分干涉(2 颗)	3m	50km	10° ~60°	--	607km
1 米 C-SAR (2 颗)	1m	10km	10° ~60°	--	755 km
高分三号 (3 颗)	1m	10km	10° ~60°	--	755 km

对地面站的选取中，考虑卫星运动方向以及经过我国区域的常见位置，选取现有的位于东西南北中五个区域的地面站，提高地面站与卫星的通信效率。地面站具体参数如表 4.3 所示。

表 4.3 地面站参数表

Tab.4.3 Table of station parameters

地面站名称	所在经度	所在纬度	探测范围
天津站	117.2	39.1	高于地面五度
三亚站	109.5	18.2	
喀什站	75.9	39.4	
昆明站	102.7	25.0	
佳木斯站	130.3	46.8	

在进行遇险船舶选取时，考虑深远海的运输船舶航线，选定中国到澳大利亚之间的航线作为遇险船舶的所在位置。介绍搜寻船舶航线如表 4.4 所示。

表 4.4 搜寻船舶参数表

Tab.4.4 Table of search vessel parameters

航线点	航线点经度	航线点纬度	航线点速度
A	149.74	15.11	10m/s
B	149.83	13.80	10m/s
C	149.67	12.83	10m/s
D	148.80	12.11	10m/s
E	147.80	11.83	10m/s
F	147.21	11.00	5m/s
G	147.48	9.90	5m/s
H	148.51	9.72	5m/s

在任务仿真软件中将遥感卫星对象、地面站对象、遇险船舶对象插入到新建场景中，其软件中仿真场景的 3D 显示如图 4.1 所示。

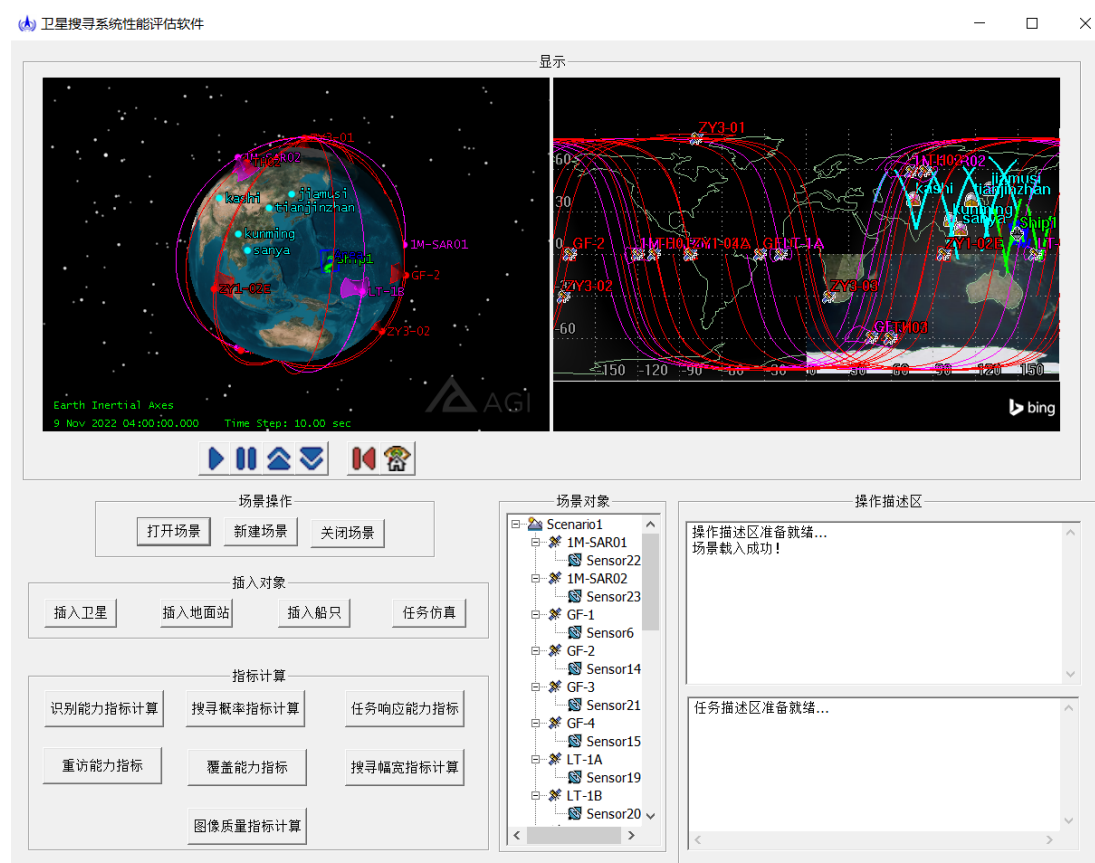


图 4.1 仿真案例仿真示意图

Fig.4.1 Simulation case simulation diagram

4.2 仿真案例仿真数据分析

在海上遇险船舶搜寻任务效能评估软件中对上节中的各类对象进行仿真实现后,进行任务执行过程的仿真。根据软件的工作流程进行数据的计算以及动画的配置。对仿真得到的遥感卫星系统对遇险船舶的成像时间数据进行展示。

从任务效能评估的重点出发,分析高轨协同低轨成像卫星以及光学载荷协同 SAR 载荷两种情况下对任务效能的影响。高轨协同低轨主要体现在高轨卫星实现对低轨卫星的指令上注方面。

(1) 指令上注方式对任务效能影响

在搜寻任务仿真中,设定了两种指令上注的方式:高轨静止卫星与中低轨道卫星完成指令上注、地面站与中低轨道卫星完成指令上注,依据两种上注方式展示遥感卫星系统对海上遇险船舶的成像时间数据。

当指令上注方式为地面站上注时,由于地面站只存在与我国境内,遥感卫星只有运行到我国上空时才可以完成指令上注,这大大浪费了遥感卫星可以实现搜寻的时间。遥感卫星系统对遇险船舶的成像时间数据如表 4.5 所示。

表 4.5 地面站指令上注仿真原始数据表

Tab.4.5 Raw simulation data table

日期	卫星名称	载荷类型	搜寻成像开始时间	搜寻成像结束时间	最高分辨率
9 Nov 2022	GF-311	SAR	17:36:03	17:38:36	3m
	1M-SAR02	SAR	18:09:02	18:11:40	3m
	ZY-02D	光学	20:24:41	20:26:50	15m (红外)
10 Nov 2022	LT-1A	SAR	00:57:48	00:59:43	3m
	ZY3-02	光学	02:55:29	02:56:13	8m (红外)
	GF-311	SAR	05:59:41	06:02:17	3m
	1M-SAR02	SAR	06:32:46	06:35:26	3m
	TH02	光学	07:09:15	07:10:33	2.21m (侧摆)
	GJ13	光学	07:01:27	07:01:42	0.8m (侧摆)
	BJ213	光学	08:24:27	08:27:49	1.3m (侧摆)
	BJ212	光学	08:48:40	08:52:06	1.1m (侧摆)
	ZY-02D	光学	08:51:43	08:53:53	2.95m (侧摆)

当指令上注方式为高轨静止卫星完成指令上注时,高轨静止卫星与低轨遥感成像卫星的可见性时间窗口较大,节省了遥感卫星系统进行搜寻的时间。遥感卫星系统对遇险船舶的成像时间数据如表 4.6 所示。

表 4.6 高轨静止卫星指令上注仿真原始数据表

Tab.4.6 Raw simulation data table

日期	卫星名称	载荷类型	搜寻成像开始时间	搜寻成像结束时间	最高分辨率
9 Nov 2022	LT-1A	SAR	12:43:34	12:45:30	3m
	ZY3-02	光学	14:57:23	14:58:39	2.6m
	GF-2	光学	15:09:43	15:12:08	1.8m
	GF-311	SAR	17:36:03	17:38:36	3m
	1M-SAR02	SAR	18:09:02	18:11:40	3m
	ZY-02D	光学	20:24:41	20:26:50	15m (红外)
10 Nov 2022	LT-1A	SAR	00:57:48	00:59:43	3m
	ZY3-02	光学	02:55:29	02:56:13	8m (红外)
	GF-311	SAR	05:59:41	06:02:17	3m
	1M-SAR02	SAR	06:32:46	06:35:26	3m
	TH02	光学	07:09:15	07:10:33	2.21m (侧摆)
	GJ13	光学	07:01:27	07:01:42	0.8m (侧摆)
	BJ213	光学	08:24:27	08:27:49	1.3m (侧摆)
	BJ212	光学	08:48:40	08:52:06	1.1m (侧摆)
	ZY-02D	光学	08:51:43	08:53:53	2.95m (侧摆)

根据任务仿真软件得到两种指令上注情况下的遥感卫星系统对遇险船只的原始数据，并根据指标计算方法对数据进行处理，得到更加直观的中间数据，比较两种方式会影响的能力，处理后的数据如表 4.7 所示。

表 4.7 地面站指令上注仿真中间数据表

Tab.4.7 Intermediate simulation data table

数据类型	地面站指令上注	高轨卫星指令上注
第一颗成像分辨率	3m	3m
最高分辨率	0.8m	0.8m
任务响应时间	5h57min	52min
搜寻船舶次数	12	15
搜寻区域次数	33	38
卫星搜寻概率	0.36	0.39
区域搜寻率	81%	92%
平均搜寻重访时间	2.56h	1.54h

将数据进行处理后，从分辨率、任务响应时间、重访时间三类数据角度进行分析。

从分辨率角度分析：两种指令上注方式下第一颗完成对遇险船舶成像，并将数据回传给地面站的卫星分辨率都为 3m，结合遇险船舶的尺寸长度并依据约翰逊准则，计算发现、识别和确认的概率为 100%、100%、64.2%，在针对该仿真案例中的遇险船舶，可以达到对遇险船只进行识别。因此可以得到结论在使用不同的指令上注的方式下，由于其中低轨道的成像分辨率普遍较高，不会对目标识别能力产生太大影响。

从任务响应时间的角度分析：从中间数据可以发现，由于指令上注的影响，使用高轨静止卫星进行指令上注的任务响应时间比使用地面站上注的任务响应时间快了五个小时。这是由于高轨静止卫星所在轨道高度较高，在与中低轨道进行指令上注时其可以通信的时间窗口较长，所以指令上注时间较快。较快的完成指令上注后，遥感成像卫星可以较快的在高轨静止卫星的引导下对遇险船舶进行搜寻。但是由于使用地面站进行上注时地面站所在位置都在我国境内，并且由于地球曲率的影响，遥感成像卫星的星下点位置需要在我国附近才能实现指令上注，会在指令上注等待阶段花费更多的时间。大大浪费了遥感卫星等待接收搜寻指令的时间。

从重访时间的角度进行分析：由于高轨静止卫星执行指令上注提前了遥感成像卫星搜寻遇险船舶的开始时间，增加了遥感成像卫星执行搜寻任务的时长以及搜寻到遇险传中的概率。所以在一定程度上也影响了重访时间的大小，使遥感卫星系统获取遇险船舶信息的更新能力得到了提高。

（2） 载荷协同方式对任务效能分析

在遥感卫星系统执行遇险船舶搜寻任务时，考虑到了光学载荷协同 SAR 载荷的方式对遇险船舶进行搜寻，所以在高轨静止卫星完成指令上注的情况下，展示光学载荷协同 SAR 载荷的方式的原始数据以及处理后的数据，对遥感卫星系统执行搜寻任务的影响进行分析。

光学载荷卫星在执行搜寻任务时，需要考虑太阳高度角、温度差、反射率带来的成像影响，基于此，光学载荷卫星仿真时的原始数据如表 4.8 所示。

表 4.8 光学载荷搜寻原始数据

Tab.4.8 Intermediate simulation data table

日期	卫星名称	载荷类型	搜寻成像开始时间	搜寻成像结束时间	最高分辨率
9 Nov 2022	ZY3-02	光学	14:57:23	14:58:39	2.6m
	GF-2	光学	15:09:43	15:12:08	1.8m
	ZY-02D	光学	20:24:41	20:26:50	15m（红外）
10 Nov 2022	ZY3-02	光学	02:55:29	02:56:13	8m（红外）
	TH02	光学	07:09:15	07:10:33	2.21m（侧摆）
	GJ13	光学	07:01:27	07:01:42	0.8m（侧摆）
	BJ213	光学	08:24:27	08:27:49	1.3m（侧摆）
	BJ212	光学	08:48:40	08:52:06	1.1m（侧摆）
	ZY-02D	光学	08:51:43	08:53:53	2.95m（侧摆）

SAR 载荷在进行成像工作时，不会受到太阳高度角、温度差等因素的影响。光学协同 SAR 载荷进行遇险船舶搜寻时，任务仿真的原始数据如表 4.9 所示。

表 4.9 光学载荷协同 SAR 载荷搜寻原始数据

Tab.4.9 Intermediate simulation data table

日期	卫星名称	载荷类型	搜寻成像开始时间	搜寻成像结束时间	最高分辨率
9 Nov 2022	LT-1A	SAR	12:43:34	12:45:30	3m
	ZY3-02	光学	14:57:23	14:58:39	2.6m
	GF-2	光学	15:09:43	15:12:08	1.8m
	GF-311	SAR	17:36:03	17:38:36	3m
	1M-SAR02	SAR	18:09:02	18:11:40	3m
	ZY-02D	光学	20:24:41	20:26:50	15m (红外)
10 Nov 2022	LT-1A	SAR	00:57:48	00:59:43	3m
	ZY3-02	光学	02:55:29	02:56:13	8m (红外)
	GF-311	SAR	05:59:41	06:02:17	3m
	1M-SAR02	SAR	06:32:46	06:35:26	3m
	TH02	光学	07:09:15	07:10:33	2.21m (侧摆)
	GJ13	光学	07:01:27	07:01:42	0.8m (侧摆)
	BJ213	光学	08:24:27	08:27:49	1.3m (侧摆)
	BJ212	光学	08:48:40	08:52:06	1.1m (侧摆)
	ZY-02D	光学	08:51:43	08:53:53	2.95m (侧摆)

在两种情况下对原始数据进行处理，得到只有光学载荷以及光学载荷协同 SAR 载荷方式下的中间数据，如表 4.10 所示。

表 4.10 高轨静止卫星指令上注仿真中间数据表

Tab.4.10 Intermediate simulation data table

数据类型	光学载荷单独工作	光学载荷协同 SAR
第一颗成像分辨率	2.6m	3m
最高成像分辨率	0.8	0.8
最少响应时间	3h12min	52min
搜寻船舶次数	9	15
搜寻区域次数	33	38
卫星搜寻概率	0.27	0.39
平均搜寻重访时间	4.26h	1.68h
区域搜寻率	43.8%	92%

首先查看两种不同方式下的原始数据可以观察到，光学遥感卫星只能在白天才能实现有效的成像，虽然光学遥感卫星携带了红外成像，但是其分辨率较低，远不能达到任务中对遇险船舶的识别程度，当 SAR 协同光学载荷进行成像时，在夜晚可以有效的对其进行成像，并且 SAR 成像的分辨率可以对任务中的遇险船舶进行识别。

对中间数据进行分析，同样从目标识别能力、任务响应能力、重访能力以及卫星搜寻概率四个角度进行分析。

从目标识别能力的角度：对于只有光学载荷搜寻时，第一颗卫星成像并进行图像数据传输时的图像分辨率为 2.6m，依据约翰逊准则进行发现、识别、确认概率计算，计算结果为：100%、100%、71.4%，协同 SAR 载荷时的成像分辨率为 3m，经过计算，两种情况下都可以实现对海上遇险船舶的识别以及确认。

从任务响应能力的角度：由于通常情况下 SAR 载荷的成像幅宽较大，在协同搜寻时弥补了光学成像卫星成像幅宽小的缺点，并且 SAR 有三种工作模式，在三种工作模式下对遇险船舶的信息可以实现更有效的获取。同时由于成像原理的不同，SAR 在夜晚也可以实现成像，也会对任务响应时间造成影响。

从重访能力的角度：遥感卫星系统的重访能力和遥感卫星的数量以及载荷的探测幅宽有关，当使用 SAR 协同光学载荷进行搜寻的方式时，这两方面的因素都得到的提升，因此其重访能力也有了提高。

从卫星搜寻概率的角度：SAR 载荷的成像范围相比光学载荷的成像范围较大，协同工作时对区域的覆盖率也会有显著的提高。由于卫星搜寻概率同样也与载荷类型有关，在两种载荷方式协同时也提高了卫星的搜寻概率，使得卫星系统在对搜寻区域进行搜寻时搜寻到遇险船舶得概率增加。

经过分析得到使用光学载荷协同 SAR 载荷的方式对遇险船舶进行搜寻要比单一的使用光学载荷的搜寻能力要强。

4.3 仿真案例指标维度分析

根据由对仿真得到的中间数据进行处理分析，从四个方面进一步对该案例进行分析。

首先从任务响应能力角度，任务响应能力反映了一个卫星系统在执行搜寻任务时完成任务的能力。在两种情况下，由于卫星初始位置的不同、卫星载荷探测范围的不同，对一个区域进行搜寻时，使用较多种类的卫星且星下点位置接近搜寻区域可以大大的减小卫星系统完成任务的时间。除此之外，在对卫星系统执行指令上注以及数据传输过程中，与地面站的数据交互也会影响卫星系统完成任务的总体使用时间。基于此在针对设计完成搜寻任务的卫星系统时，从三个方面进行考虑，首先考虑使用星下点位置距离搜寻区域较近的卫星；另外考虑使用多种类的卫星进行搜寻工作；最后考虑卫星系统的通信方式，减少指令上注和数据传输的时间。

从目标识别能力角度，目标识别角度从获取到遇险船舶的图片信息来评估卫星系统执行任务时的影响，当图像的分辨率越高时，从图像中得到的信息就越丰富，可以对遇险船舶的类型以及遇险船舶的受损情况等其他方面进行信息确认。

从重访能力角度，重访能力主要反映了多卫星协同工作时，对一个搜寻遇险船舶获取信息的更新能力。当一个卫星系统的重访能力越强，则可以说明卫星系统在获取遇险船舶的信息时的更新速率更快，所获得的遇险船舶信息的准确性也就越高。比较两种不同数量卫星系统的重访能力，增加卫星数量可以在一定程度上提高卫星系统的重访能力。

从卫星搜寻概率角度，卫星搜寻概率主要反映的是卫星系统携带的载荷方式、卫星机动平台的摆动能力以及卫星的轨道平台等卫星系统本身对任务完成的影响。在一定程度上携带的载荷方式与机动平台的摆动能力决定了卫星系统经过需要搜寻区域的次数。次数的增加在一定程度上也提高了在这个固定区域内，对搜寻遇险船舶完成搜寻的能力，卫星搜寻概率越大，则代表该卫星系统在经过搜寻区域时搜寻到遇险船舶的可能性就越大。

4.4 综合评估方法应用

层次分析法的使用主要包括建立层次结构、确定判断矩阵和计算指标权重三部分^[51]。其中建立的层次结构与建立的效能指标评估体系相同。

在采纳了使用该评估方法进行任务评估的专家的意见，对各维度之间以及各维度具体指标之间的判断矩阵进行了确定。

信息精确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性四个维度的判断矩阵如下：

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{3}{4} & 2 & 3 \\ \frac{4}{3} & 1 & 3 & 4 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{2}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

信息精确性中卫星识别能力和卫星搜寻概率的判断矩阵如下：

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{5}{4} \\ \frac{4}{5} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

信息时效性中任务响应能力、数据传输能力、重访能力、数据处理能力的判断矩阵如下：

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ \frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

信息探测性中的卫星覆盖能力，搜寻幅宽的判断矩阵如下：

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

通过计算的判断矩阵，依据特征向量的计算方法计算各指标权重，得到结果。上述四个判断矩阵的特征向量求解为：

$$\omega = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.44 \\ 0.16 \\ 0.1 \end{bmatrix} \quad \omega_1 = \begin{bmatrix} 0.56 \\ 0.44 \end{bmatrix} \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} 0.66 \\ 0.34 \end{bmatrix} \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

由以上求解中，得到七个指标的权重如表 4.11 所示：

表 4.11 指标权重表
Tab.4.11 Table of index weight

指标	权重
卫星识别能力	0.17
卫星搜寻概率	0.13
任务响应能力	0.29
重访能力	0.15
卫星覆盖能力	0.12
探测幅宽	0.04
图像质量	0.10

建立的七个指标中，主要可以分为两种，定性指标和定量指标，其中卫星识别能力、卫星搜寻概率、卫星覆盖能力都为定量指标，不需要进行归一化处理，对于其他指标，借鉴使用专家的意见，进行模糊隶属函数以及模糊满意度对应的建立。

任务响应时间的模糊隶属函数公式：

$$C = \begin{cases} 1 & t \leq 0.5h \\ \frac{0.54}{t} + 0.06 & 0.5h < t < 6h \\ 0.1 & t > 6h \end{cases} \quad (4.6)$$

重访时间的模糊隶属函数公式：

$$C = \begin{cases} 1 & t \leq 0.75h \\ \frac{0.62}{t} + 0.06 & 0.75h < t < 6h \\ 0.1 & t > 6h \end{cases} \quad (4.7)$$

探测幅宽的模糊隶属函数公式：

$$C = \begin{cases} 0.2 & w < 20km \\ 0.00125w + 0.175 & 20 \leq w \leq 500 \\ 0.8 & w > 500km \end{cases} \quad (4.8)$$

图像质量的模糊满意度建立如下，为成像载荷依据成像类型不同建立的等级，分为四级，分别对应：可见光成像、高光谱成像、红外成像、SAR 成像，归一化数值如表 4.12 所示。

表 4.12 等级与归一化数值对应表

Tab.4.12 Index result table

等级	归一化数值
优	0.8
良好	0.6
一般	0.5
差	0.4

对中间数据中的数据依据指标的计算方法结合模糊理论计算，得到两种情况下的各指标计算结果，如表 4.13 所示。

表 4.13 指标结果表

Tab.4.13 Index result table

指标	只有光学	光学和 SAR
卫星识别能力	0.94	0.94
卫星搜寻概率	0.44	0.43
任务响应能力	0.25	0.85
重访能力	0.30	0.46
卫星覆盖能力	0.438	0.92
探测幅宽	0.55	0.7
图像质量	0.80	0.60

根据层次分析法的指标权重以及各指标的计算结果，得到两种情况下的综合评估数值为 0.42 和 0.74，此数值作为综合评估指标的计算结果。

4.5 本章小结

本章依据构建的效能评估体系以及开发的效能评估软件，查找了国内现有的卫星资料、地面站资料组成搜寻系统，对实际任务进行仿真，得到了仿真的原始数据，并对原始数据进行处理分析。并根据专家使用意见，构建各指标的判断矩阵计算各维度权重，根据专家意见建立隶属函数以及隶属满意度对应关系，介绍了层次分析法和模糊理论的具体使用，并从四个角度对搜寻任务进行分析。

结 论

目前,使用遥感卫星系统执行各种任务的需求越来越大,因此如何对卫星系统执行任务的能力进行评估成为了主要研究的问题。本文针对卫星系统对海上遇险船舶进行搜寻这一特定任务,分析了任务的执行流程并进行了各部分任务模型的介绍,并根据搜寻任务需求从信息准确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性四个维度建立了七个指标,这些指标表征了遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三者的联系。最后选取现有的遥感卫星组成一个搜寻任务的仿真案例,并通过开发的多星协同搜寻仿真与效能评估软件得到仿真结果,对仿真结果进行处理并分析。主要内容分为三部分:

(1) 面向海上搜寻的多星协同效能评估体系构建

本文首先介绍了遇险船舶搜寻任务的各部分组成,详细阐述了各部分在任务仿真中需要发挥的作用。并通过介绍任务执行流程,从四个维度信息准确性、信息时效性、信息获取性、信息表现性出发分析任务需求,建立了七个指标:目标识别能力指标、卫星搜寻概率指标、任务响应能力指标、重访能力指标、覆盖能力指标、搜寻幅宽指标、图像质量指标,这些指标表征了遥感卫星系统、地面站系统、遇险船舶三者的联系以及遥感卫星系统自身的协同性。

(2) 基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件设计

本文介绍了多星协同执行海上遇险船舶搜寻任务过程中三类对象在仿真任务中需要考虑到的模型参数,并基于 STK 仿真软件对卫星平台模型、卫星载荷模型、地面站模型、遇险船舶模型进行了模块化设计,同时依据任务执行流程完成了数据处理模块设计以及指标计算模块的设计。对基于 STK 的海上遇险船舶多星协同搜寻仿真与效能评估软件的整体架构进行了设计,详细描述了每层架构的主要功能。介绍了效能评估软件的使用流程。

(3) 海上遇险船舶多星协同搜寻任务案例分析

本文依据构建的效能评估体系以及开发的效能评估软件,查找了国内现有的卫星资料、地面站资料组成遥感卫星搜寻系统,对实际搜寻任务进行仿真,得到了仿真的原始数据。并从不同指令上注方式以及载荷协同方式两个方面对得到的原始数据进行处理分析,最后从目标识别能力、任务响应能力、卫星搜寻概率以及重访能力四个具体指标对仿真案例进行分析。依据查找到的资料介绍了层次分析法和模糊理论的具体使用。

通过对多星组成的遥感卫星系统执行海上遇险船舶搜寻任务的效能进行评估,提供了遥感卫星系统在执行此类搜寻任务时的效能分析思路:首先从任务的具体需求出发,判断此类任务中主要关注的维度,初步建立一个效能评估体系的框架。然后从各类对象

的联系进行出发，在每个关注的维度去细化可以反应该维度能力的指标，并去除掉存在大量冗余的指标，基于任务需求建立指标的计算方法，最终完成效能评估体系的构建。在完成效能评估体系的构建后，需要对体系进行可行性验证，通过建立解析式的方式对其验证存在一定的困难，所以利用仿真的方式进行验证。通过考虑任务中各类对象在任务仿真中需要考虑的参数，并结合影响的仿真软件进行任务仿真。通过仿真得到的数据进行指标数据的计算，以验证效能评估体系的可行性。

参考文献

- [1] 刘传润.北斗卫星导航定位系统的功能原理与前景展望[J].中国水运(学术版),2008(01):165-166.
- [2] 于素君,易昌华,李春芬,陈传庚.北斗卫星导航系统定位原理及其应用综述[J].物探装备,2020,30(01):59-63.
- [3] 郑义成. 卫星探测舰船目标效能评估技术研究[D].电子科技大学,2012.
- [4] 吴炜琦,张育林.光学侦察卫星的目标探测概率分析[J].国防科技大学学报,2006(04):14-17.
- [5] 吴炜琦,张育林.海洋目标探测卫星的通用效能模型初探[J].宇航学报,2006(04):814-818.
- [6] 李畅,赖鹏,李懋,贺景瑞.基于 ADC 模型的 GEO 光学卫星工作效能评估[J].舰船电子工程,2021,41(10):179-183.
- [7] 梁桂林,周晓纪,王亚琼.基于 ADC 模型的卫星地面系统效能评估[J].指挥控制与仿真,2018,40(05):62-68.
- [8] 孟锦,李千目,张宏,刘凤玉.基于 ADC 模型的侦察卫星效能评估研究[J].计算机科学,2009,36(06):41-43+67.
- [9] 孙凯,陈英武,李菊芳,姚峰.地球观测卫星系统性能指标及其仿真应用研究[J].计算机仿真,2009,26(04):59-62.
- [10] 刘晨涛,项磊,朱国权.基于层次分析法与 ADC 模型的对地观测卫星系统综合效能评估研究[C]//中国自动化学会控制理论专业委员会(Technical Committee on Control Theory,Chinese Association of Automation),中国系统工程学会(Systems Engineering Society of China).第三十一届中国控制会议论文集 B 卷.[出版者不详],2012:917-920.
- [11] 王玉菊,岳丽军,张居凤.基于 HLA 的卫星探测能力仿真评估系统研究[J].指挥控制与仿真,2009,31(03):94-97.
- [12] 王玉菊,岳丽军.基于模糊层次分析法的卫星探测效能评估算法[J].系统仿真学报,2012,24(08):1665-1668+1673.DOI:10.16182/j.cnki.joss.2012.08.012.
- [13] 王玉菊,岳丽军,蔡殊.卫星探测海洋目标的效能评估体系分析[J].电讯技术,2010,50(05):13-17.
- [14] 秦国政,马益杭,郝胜勇,付俊明,韩治刚.基于层次分析法的天基信息应用效能评估研究[J].指挥与控制学报,2015,1(03):335-340.
- [15] 刘锋.卫星系统任务效能评估方法研究[D].中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2017.
- [16] 杨峰.面向效能评估的平台级体系对抗仿真跨层次建模方法研究[D].国防科学技术大学博士学位论文,2003: 6-7.
- [17] 巫兆聪,徐卓知,杨帆.卫星应用需求满足度的模糊评估[J].应用科学学报,2015,33(03):299-308.
- [18] 魏青.合成孔径雷达成像方法与对合成孔径雷达干扰方法的研究[D].西安电子科技大学,2007.
- [19] 项磊,杨新,张扬,余晓刚.基于层次分析法与模糊理论的卫星效能评估[J].计算机仿真,2013,30(02):55-61.
- [20] 安雪滢,赵勇,杨乐平,张为华.基于模糊理论的卫星系统效能评估仿真研究[J].系统仿真学报,2006(08):2334-2337.

- [21] 杨军.基于模糊理论的卫星导航系统综合效能评估研究[J].宇航学报,2004(02):147-151+194.
- [22] 陈翼男,金伟其,赵琳,赵磊.基于目标任务性能的红外系统评价新方法[J].光学技术,2008(04):555-559.
- [23] 刘建业,孙应统,邢瑞阳,王华,李晓超.面向多任务的预警卫星系统效能评估[J].上海航天,2019,36(01):10-15.DOI:10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.01.002.
- [24] 申奇睿.面向任务的卫星效能评估方法研究[D].哈尔滨工业大学,2020.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.001971.
- [25] 冷猛.卫星对地观测需求分析方法及其应用研究[D].国防科学技术大学,2011.
- [26] 杨海涛.星座卫星通信系统效能评估方法研究[D].国防科学技术大学,2007.
- [27] Montenbruck O, Gill E, Lutze F. Satellite orbits: models, methods, and applications[J]. Appl. Mech. Rev., 2002, 55(2): B27-B28.
- [28] 王宇.基于ADC模型的星座卫星通信系统效能评估技术研究[D].国防科学技术大学,2007.
- [29] 贾志军,杨敏,孙洋,何爱林.卫星对地观测中的侧摆策略[J].四川兵工学报,2014,35(07):128-130.
- [30] 闫野,任萱,陈磊.卫星对地球覆盖情况的判据及算法探讨[J].宇航学报,1999(02):56-61.
- [31] 翁慧慧.卫星对地覆盖分析与仿真[D].解放军信息工程大学,2006.
- [32] 李帅,任迪.卫星系统体系仿真与效能评估技术发展研究[C]//中国自动化学会系统仿真专业委员会,中国系统仿真学会仿真技术应用专业委员会.第19届中国系统仿真技术及其应用学术年会论文集(19th CCSSTA 2018).中国科学技术大学出版社,2018:238-241.
- [33] 刘韬.如何计算光学对地成像卫星的空间分辨率[J].国际太空,2013(10):66.
- [34] 秦琰华,赵军民.CCD成像系统识别能力分析研究[J].弹箭与制导学报,2006(01):58-61.
- [35] 李霞,李智.基于STK的天基信息侦察系统仿真与效能评估[J].科技创新与应用,2023,13(12):75-79.DOI:10.19981/j.CN23-1581/G3.2023.12.017.
- [36] 何胜杰,郭强,王兴虎,程家林,陈韵竹,毛延静.基于ADC分析法优化的无人机效能评估方法[J].无人系统技术,2022,5(02):106-116.DOI:10.19942/j.issn.2096-5915.2022.2.021.
- [37] 吴颖霞,张建奇,杨红坚,王小兵,王晓蕊.Johnson 准则在红外成像系统外场识别性能评估中的应用[J].光子学报,2011,40(03):438-442.
- [38] 何红艳,乌崇德,王小勇.侧摆对卫星及 CCD 相机系统参数的影响和分析[J].航天返回与遥感,2003(04):14-18.
- [39] 王玉超,赵辰光,高越,王维峥,刘畅.基于HLA仿真的卫星效能层次分析方法应用研究[J].中国科技信息,2021(Z1):49-51+13.
- [40] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008(05):148-153.DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2008.05.018.
- [41] 朱爱萍.高分卫星轨道及其对地覆盖的可视化研究[D].山东科技大学,2018.DOI:10.27275/d.cnki.gsdku.2018.000026.
- [42] 冯海霞.光电成像系统目标获取性能模型研究[D].西安电子科技大学,2014.
- [43] 高越,李轩,温志军.光学卫星对海上移动目标揭示能力分析[J].电子测量技术,2017,40(02):1-4+9.DOI:10.19651/j.cnki.emt.2017.02.001.

- [44] 吕卫民,张天琦,臧恒波,李根.DoDAF 建模与效能评估综述[J].兵器装备工程学报,2021,42(09):26-33.
- [45] 黄璜,赵继广,魏斌.海洋目标单卫星探测系统分析[J].兵器装备工程学报,2019,40(01):118-123.
- [46] 刘国岁.合成孔径雷达的某些性能及其简析[J].雷达科学与技术,2008(02):81-86.
- [47] 蒋炜,陈新鹏,赵光俊,王炳辉,潘飏.北斗卫星导航系统的定位效能评估方法[J].现代雷达,2022,44(06):70-76.DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2022.06.013.
- [48] 张守玉,姜振东.基于 STK 的卫星轨道机动模型设计与仿真[J].计算机仿真,2004(10):25-27+72.
- [49] 徐俊,白向峰,周晓华.基于 STK 的侦察卫星覆盖仿真分析[J].软件导刊,2016,15(08):156-158.
- [50] S. S. Marcia. U.S. Space Programs: Civilian, Military, and Commercial. 2000.Congressional Research Service (CRS), New York, 2003: 102~180.
- [51] 张吉军.模糊层次分析法(FAHP)[J].模糊系统与数学,2000(02):80-88.
- [52] 杜文翔.北斗导航及 GPS 技术在航海定位中的应用[J].中国水运,2021(11):105-107.DOI:10.13646/j.cnki.42-1395/u.2021.11.039.
- [53] 樊鹏山,熊伟,李智.载荷侧摆情况下卫星覆盖区域计算方法研究[C]//中国自动化学会系统仿真专业委员会,中国系统仿真学会仿真技术应用专业委员会.2009 系统仿真技术及其应用学术会议论文集.中国科学技术大学出版社,2009:551-555.
游瑞蓉,王新伟,任鹏道,何军,周燕.约翰逊准则的视频监控目标检测性能评估方法[J].红外与激光工程,2016,45(12):276-281
- [54] 许宇栋,周敬博,尹嘉昭,谢剑锋,武炳阳.对地观测卫星任务规划策略及应用研究综述[J].无线电工程,2021,51(08):681-690.