

遥感卫星地面接收系统业务能力评估

张文庆, 彭兴会, 刘畅

(航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 随着航天事业的快速发展, 遥感卫星的发射数量越来越多, 遥感卫星地面接收系统面临着快速、稳定的接收新发射卫星下传数据的迫切需求; 在此背景下提出了一种遥感卫星地面接收系统业务能力评估方法, 建立基于 AHP 的业务能力评估指标体系; 结合业务特点, 阐述了系统单机状态评估模型、系统业务能力评估模型并确定了各级因素的影响权重; 实例分析结果表明, 此评估方法能够快速确定遥感卫星地面接收系统对于某遥感卫星数据接收业务能力状态, 给出系统最小化改进指引, 对系统资源的利用及优化提供了可行性建议。

关键词: 接收; 业务能力; 评估; 指标体系; 评估模型

Evaluation of Business Capability in Ground Receiving System for Remote Sensing Satellite

ZHANG Wenqing, PENG Xinghui, LIU Chang

(Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: With the rapid development of space industry, the number of remote sensing satellites is increasing. The remote sensing satellite ground receiving system is facing the urgent need to receive the downlink data of newly launched satellite quickly and stably. In this context, an evaluation method for the service capability of the remote sensing satellite ground receiving system is proposed. The evaluation index system of the operational capability based on Analytic Hierarchy Process (AHP) is established. Combined with the business characteristics, the system stand-alone state evaluation model and system business capability evaluation model is elaborated, and the influence weight of factors at all levels is determined. The analysis results for the example show that the evaluation method can quickly determine the operational capability status of a remote sensing satellite ground receiving system for a remote sensing satellite, and the minimization improvement guidelines for the system is obtained, the feasible suggestions for the utilization and optimization of the system resources are provided.

Keywords: receive; operational capability; evaluation; index system; evaluation model

0 引言

遥感卫星地面接收站主要承担遥感卫星数据的接收工作, 对于遥感数据的地面应用发挥着重要的作用。随着航天事业的飞速发展, 遥感卫星的发射数量越来越多, 同时, 伴随着国家对军民融合发展战略的大力推进, 地面接收资源的共享使用势必会成为未来的发展方向^[1-4]。如何快速评估已有地面接收系统是否具备接入某新型号卫星的业务能力, 以及如何快速定位已有地面接收系统无法接入该卫星的原因成为了重要而又棘手的问题。

本文以优化和提升遥感卫星地面接收系统的业务能力为目标, 运用多层次分析方法, 开展对遥感卫星地面接收系统的业务能力评估研究。建立了遥感卫星接收系统能力评估指标体系及能力评估模型, 并利用该评估模型实现遥感卫星地面接收系统的业务能力评估。通过实践案例验证模型的有效性, 分析遥感卫星地面接收系统对新型卫星的业务能力状态, 并提出最小化的改进建议。

1 遥感卫星地面接收系统组成

遥感卫星地面接收系统内设备种类繁多, 系统结构复杂, 按照系统功能组成可划分为天馈分系统、跟踪接收分系统、测试分系统、技术支持分系统和站监控管理分系统。系统组成^[5-7]示意图如图 1 所示。

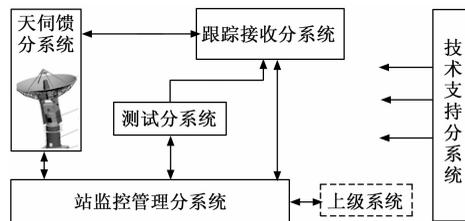


图 1 系统组成示意图

天馈分系统主要包括天馈子系统、座架子系统、伺服子系统以及附属设备等。主要负责控制天线跟踪卫星信号, 并传送给跟踪接收分系统。跟踪接收分系统主要包括低噪声

收稿日期: 2021-11-30; 修回日期: 2022-01-04。

作者简介: 张文庆(1988-), 女, 河北唐山人, 硕士, 工程师, 主要从事遥感卫星地面应用总体设计方向的研究。

引用格式: 张文庆, 彭兴会, 刘畅. 遥感卫星地面接收系统业务能力评估[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(5): 257-261.

放大器、下变频器、矩阵开关、解调器、跟踪接收机等设备。主要负责完成卫星的自动跟踪及卫星数据的接收、解调、传输。测试分系统主要包括测试上变频器、调制器、功率计、频谱仪等设备。主要负责为系统关键指标的自动化测试提供硬件支持。技术支持分系统主要包括时频设备、气象监测设备、机柜等。主要负责为系统的正常运行提供支撑。站监控管理分系统主要包括站控服务器、网络设备、串口服务器、站控软件、数据库等。主要负责对系统进行统一的运行控制与集中管理,协调各个分系统共同完成数据接收任务^[8-10]。

2 基于 AHP 的业务能力评估指标体系设计

随着遥感卫星数量的极具增加,针对于遥感卫星数据接收的地面系统也越来越复杂,系统内设备种类繁多,各型号卫星的跟踪接收任务共用一套地面接收系统,系统内部资源呈现共享状态。因此系统业务能力评估指标体系的建立并不是简单的将系统中各个离散的指标因素进行叠加、组合,而是根据卫星对地面资源的需求以及系统业务逻辑关系来确定指标因素的重要性、权重和指标因素层级关系,建立一套分层的业务能力评估指标体系。

层次分析法(AHP, analytic hierarchy process),是 20 世纪 70 年代初,美国运筹学家匹茨堡大学教授萨蒂提出的一种将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法^[11-12]。本文结合遥感卫星地面接收系统特点,借鉴 AHP 的分层决策思想,建立多层次的遥感卫星地面接收系统业务能力评估指标体系。遥感卫星地面接收系统由众多子系统组成,且各子系统间存在多种关联关系,是一个复杂的大系统^[13-14]。本文从系统工程思想出发,采用体系架构分析方法构建遥感卫星地面接收系统的业务能力模型,进而分析提取业务能力评估指标。

影响系统能力的指标存在多种类型,各类指标对于系统接收能力的应用权重也不同,需要建立基于某型号卫星地面系统接收能力的评估指标体系,来实现系统对该卫星的数据接收能力的评估。影响系统能力的设备类型包括:天线、信道设备、调制解调器、测试设备、仪器设备、技术支持设备等,各类设备又包含了多个影响设备状态的模块。能力评估系统获取接收设备上报的基础数据,评估系统资源中各设备类型的功能状态及可用数量;结合卫星跟踪接收所需最低资源指标,评估当前系统接收业务能力的状态;根据卫星资源需求以及系统业务逻辑关系,提取系统关键指标因素,建立能力评估系统指标体系^[15-20]。该指标体系可分为四层,单因素为系统底层因素能够通过系统采集获取因素数据;一级因素为单因素按照单机属性划分的单因素的集合,二级因素为一级因素按照设备、功能类型属性划分一级因素的集合,三级因素为二级因素按照卫星资源需求属性划分的二级因素的集合,遥感卫星地面接

收系统业务能力评估体系分层结构示意图如图 2 所示。

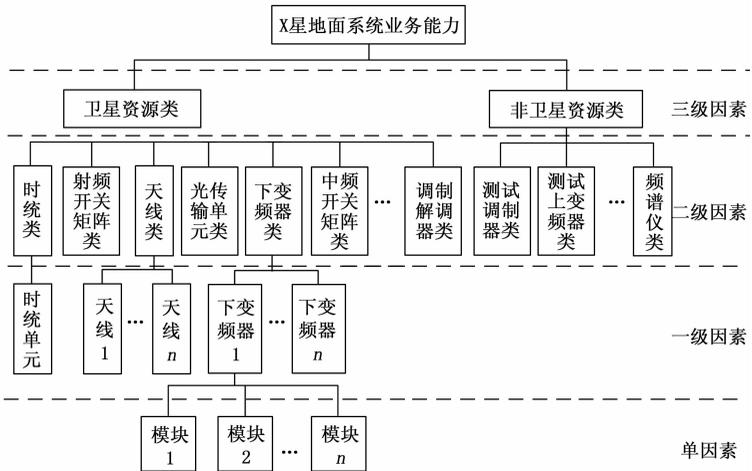


图 2 业务能力评估体系分层结构示意图

3 系统能力评估模型

3.1 系统单机状态评估模型

1) 根据系统可收集的所有影响系统单机状态的因素,建立系统单机状态单因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 此因素对应评估指标体系中的底层单因素,能够通过监控系统实现所有因素的采集工作;

2) 根据遥感卫星地面接收系统业务能力评估指标体系,将所有的单因素按照单机归属属性划分成 s 个因子集 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in_i}\}, i=1, 2, \dots, s$, 此因素对应评估指标体系中的一级因素,表示系统单机状态;

3) 根据遥感卫星地面接收系统业务能力评估指标体系,将所有的一级因素按照设备种类属性划分成 t 个因子集 $UU_k = \{UU_{k1}, UU_{k2}, \dots, UU_{kn_k}\}, k=1, 2, \dots, t$, 此因素对应评估指标体系中的二级因素;

4) 为系统单机状态因素建立因素评判等级集,对于每一个因素 U_i 建立因素评判等级集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{好, 较好, 一般, 差}\} = \{0.95, 0.85, 0.65, 0.125\}$, 其中,“好” $\in [0.9, 1.0]$,“较好” $\in [0.8, 0.9)$,“一般” $\in [0.5, 0.8)$,“差” $\in [0, 0.5)$ 。

5) 根据因素评判等级集,算出一级因素内各单因素的评判等级,其模糊关系评判矩阵 R_i 为:

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i1} & \dots & r_{i4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{in_i,1} & \dots & r_{in_i,4} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中: (r_{i1}, \dots, r_{i4}) 为一级因素 U_i 中第一个单因素对应的评判等级集,是专家对该单因素根据历史经验和测试结果进行统计分析,得出的该单因素的指标模糊向量。

6) 对于每一个一级因素 U_i 建立其中各单因素相对于 V 的权重分配为:

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in_i}\}, i=1, 2, \dots, s$$

其中: $a_{i1} + a_{i2} + \dots + a_{in_i} = 1$ 。单因素的权重分配根据历史经验及设备厂商提供的设备测试结果确定。

7) 算出一级因素的模糊关系评判向量:

$$B_i = A_i \cdot R_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{i4}\}, i = 1, 2, \dots, s \quad (2)$$

8) 结合因素评判等级集 V 以及计算出的一级因素模糊关系评判向量 B_i , 确定一级因素 U_i 的能力状态评分:

$$C_i = \sum_{j=1}^4 B_{ij} \cdot V_j \quad (3)$$

C_i 反映系统第 i 个一级因素的单机状态评分。

9) 计算各个二级因素 UU_k 的状态评分:

$$D_k = \frac{p_k}{n_k} \quad (4)$$

其中: p_k 为在二级因素 UU_k 中状态为“好”、“较好”、“一般”的一级因素数量之和。

3.2 业务能力评估模型

由于各类型号的卫星对于接收系统的业务能力需求不一致, 需要结合卫星的接收资源需求和当前接收系统已有的资源总量, 建立针对某颗卫星的地面接收系统业务能力评估模型。卫星的接收资源需求集合即为对接收系统内部二级因素资源需求的集合。

1) 确定业务能力评判等级集 $W = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4\} = \{\text{优, 良, 中, 差}\} = \{0.99, 0.9, 0.5, 0.1\}$, 其中, “优” $\in [0.99, 1.0]$, 表示系统所有资源状态好, 能够完成该卫星的接收业务, 针对某卫星的业务能力为优; “良” $\in [0.9, 0.99]$, 表示系统中存在非卫星需求类资源故障现象, 但不影响系统对于该卫星的接收业务, 针对某卫星的业务能力为良; “中” $\in [0.5, 0.9]$, 表示系统中存在卫星需求类资源故障现象, 但剩余卫星需求类资源能够支持系统完成对于该卫星的接收业务, 针对某卫星的业务能力为中; “差” $\in [0, 0.5)$, 表示系统中存在卫星需求类资源故障现象, 且剩余卫星需求类资源无法支持系统完成对于该卫星的接收业务, 针对某卫星的业务能力为差。

2) 根据遥感卫星地面接收系统业务能力评估指标体系, 将所有的二级因素按照卫星资源需求属性划分成 2 个三级因素子集 $G = \{G_1, G_2\} = \{\text{卫星资源类, 非卫星资源类}\}$, 其中, G_1 中包含所有完成卫星接收业务必须的二级因素 UU_1 , G_2 中包含所有完成卫星接收业务非必须的二级因素 UU_{K-1} ; 建立三级因素评判等级集 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} = \{\text{好, 较好, 一般, 差}\} = \{0.9, 0.8, 0.5, 0\}$, 其中, “好” $\in [0.9, 1.0]$, “较好” $\in [0.8, 0.9)$, “一般” $\in [0.5, 0.8)$, “差” $\in [0, 0.5)$;

3) 确定卫星资源类 G_1 的评判系数: $\alpha = 1$, 以及非卫星资源类 G_2 的评判系数 $\beta = 0.027$ 。三级因素的评判系数根据专家的技术分析结果确定。

4) 建立卫星资源需求集 $M_l = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$, $l = 1, 2, \dots$, 且 $l = t$, 其中, m_1 对应二级因素 UU_1 的资源需求数量; 建立系统资源总量集 $Z_k = \{z_1, z_2, \dots, z_k, z_t\}$, $k = 1, 2, \dots, t$, 其中, z_k 为系统内第 k 个二级因素的资源总量;

5) 根据卫星资源需求和系统资源总量, 计算各类二级因素 UU_k 状态的评判等级集 $Y_k = \{y_{k1}, y_{k2}, y_{k3}, y_{k4}\} = \{\text{好,$

较好, 一般, 差}\} = \{0.9, 0.8, 0.5, 0\}, $k = 1, 2, \dots, t$;

其中: “好” $\in \left(\frac{z_k-1}{z_k}, 1.0\right]$, “较好” $\in \left[\frac{1+m_l}{z_k}, \frac{z_{k-1}}{z_k}\right]$, “一般” $\in \left[\frac{m_l}{z_k}, \frac{1+m_l}{z_k}\right)$, “差” $\in \left[0, \frac{m_l}{z_k}\right)$, 当 m_l 和 z_k 表示为同一个二级因素对应的资源需求值和资源总量值, 当二级资源 UU_1 的资源需求数据不在 M_l 中时, 计算评判等级时令 $m_l = 0$ 进行计算。

6) 确定二级因素 UU_k 评判指标系数: $\epsilon = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_l\} = \{1, 2, 3, 5\}$;

7) 结合二级因素 UU_k 的状态评分, 确定各个二级因素的评判等级指标 y_k , 以及相应的评判指标系数, 得到二级因素的评判指标集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$, 以及评判指标系数集 $\epsilon_k = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k\}$; 其中, $k = 1, 2, \dots, l$ 对应的 y_k 分别对应 UU_1 的评判指标, ϵ_k 分别对应 UU_l 的评判指标系数;

8) 计算三级因素 G_1 的能力状态值:

$$E_1 = \frac{\sum_{k=1}^l \epsilon_k \cdot y_k}{\sum_{k=1}^l \epsilon_k} \quad (5)$$

其中: $k = 1, 2, \dots, l$

9) 计算三级因素 G_2 的能力状态值:

$$E_2 = \frac{\sum_{k=l}^t \epsilon_k \cdot y_k}{\sum_{k=l}^t \epsilon_k} \quad (6)$$

其中: $k = l, (l+1), \dots, t$

10) 结合三级因素评判等级集 X 和能力状态值, 确定 G_1, G_2 的评判等级指标为 θ_1, θ_2 ;

11) 计算针对该卫星的系统业务能力值:

$$F = \alpha \cdot \theta_1 + \beta \cdot \theta_2 \quad (7)$$

4 实例分析

4.1 系统组成

本文以某遥感地面接收地面站的接收系统为例, 对该系统是否能够接收某新型号卫星的业务能力进行评估。在发射某新型号卫星之前, 地面接收系统的管理人员使用业务能力评估方法, 对当前系统的业务能力状态能否满足新卫星的接入进行评判, 并得出当前系统对于该新卫星的业务能力等级。若能力等级较低, 则表明该系统不具备新卫星的接入能力。此时通过系统能力评估模型的判断, 给出影响新卫星接入的主要因素, 以便系统管理人员能够精准的完善系统业务能力, 实现该新型号卫星的快速接入。

地面接收系统的设备组成如表 1 所示。

根据系统设备组成及卫星需求数据, 列举影响系统对于该卫星的业务能力的因素, 如表 2 所示。

4.2 业务能力评估

根据当前系统业务能力评估指标体系, 建立系统因素集:

1) 系统单因素集 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$, 其中 u_n 为系统可监控的所有设备的关键模块状态; 例如, 电源模块、光功率模块、解调模块等, 由于系统监测点众多, 此处不

表 1 系统设备组成列表

分系统	设备类型名称	编号	总量	卫星需求
天馈	S/X 双频天线	1~4	4	1
跟踪接收	室外 S 发送光端机	1	1	0
	室内 S 接收光端机	1	1	0
	S 下变频器	1	1	0
	室内 X 接收光端机	1~10	10	4
	室外 X 发送光端机	1~10	10	4
	X 下变频器	1~10	10	4
	高速解调器	1~10	10	4
	中频开关矩阵	1	1	1
	射频开关矩阵	1	1	1
	测试	室内 X 发送光端机	1~4	4
室外 X 接收光端机		1~4	4	0
测试上变频器		1~4	4	0
调制器		1~4	4	0
频谱仪		1	1	0
功率计		1	1	0
保障	时统单元	1	1	1
	小型气象站	1	1	0

再一一列举；

2) 系统一级因素集 $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{in}\}$ 为系统各个单机状态, 其中 U_{in} 为各个一级因素包含的单因素; 一级因素包含: X 下变频器 1、测试上变频器 1、室内 X 接收光端机 1、室内 X 发射光端机 1、解调器 1、调制器等, 由于系统单机众多, 此处不再一一列举;

表 3 X 下变频器设备各级因素权重及单因素评判值

二级因素	一级因素	权重	单因素	权重	单因素评判值			
					好 V_1	较好 V_2	一般 V_3	差 V_4
X 下变频器类	X 下变频器 1	0.1	控制模块	0.185 6	0.7	0.2	0.1	0
			时钟模块	0.293 3	0.6	0.2	0.2	0
			本振模块	0.236 9	0.8	0.2	0	0
			电源模块 1	0.141 6	0	0	0.2	0.8
			电源模块 2	0.142 6	0.8	0.2	0	0
	X 下变频器 2	0.1	控制模块	0.185 6	0.7	0.2	0.1	0
			时钟模块	0.293 3	0	0	0.3	0.7
			本振模块	0.236 9	0.8	0.2	0	0
			电源模块 1	0.141 6	0.7	0.1	0.2	0
			电源模块 2	0.142 6	0.8	0.2	0	0
	X 下变频器 3	0.1	控制模块	0.185 6	0	0.1	0.1	0.8
			时钟模块	0.293 3	0	0	0.2	0.8
			本振模块	0.236 9	0	0	0.3	0.7
			电源模块 1	0.141 6	0.7	0.1	0.2	0
			电源模块 2	0.142 6	0.8	0.2	0	0
	X 下变频器 4	0.1	控制模块	0.185 6	0.8	0.1	0.1	0
			时钟模块	0.293 3	0.7	0.2	0.1	0
			本振模块	0.236 9	0.8	0.2	0	0
			电源模块 1	0.141 6	0.7	0.2	0.1	0
			电源模块 2	0.142 6	0.8	0.2	0	0
...		
X 下变频器 10	0.1	控制模块	0.185 6	0.8	0.1	0.1	0	
		时钟模块	0.293 3	0.7	0.2	0.1	0	
		本振模块	0.236 9	0.8	0.2	0	0	
		电源模块 1	0.141 6	0.7	0.2	0.1	0	
		电源模块 2	0.142 6	0.8	0.2	0	0	

表 2 业务能力影响因素

三级因素	二级因素	一级因素
卫星资源类	S/X 双频天线	S/X 双频天线 1~4
	X 光端机	X 光端机 1~10
	X 下变频器	X 下变频器 1~10
	高速解调器	高速解调器 1~10
	中频开关矩阵	中频开关矩阵 1
	射频开关矩阵	射频开关矩阵 1
	时统单元	时统单元 1
非卫星资源类	S 测试光端机	S 测试光端机 1
	S 下变频器	S 下变频器 1
	X 测试光端机	X 测试光端机 1~4
	测试上变频器	测试上变频器 1~4
	调制器	调制器 1~4

3) 系统二级因素集 $UU_k = \{UU_{k1}, UU_{k2}, \dots, UU_{kn}\}$ 为系统各个设备类型状态, 其中 UU_{kn} 为各个二级因素包含的一级因素; 二级因素包含: X 天线类、X 下变频器类、室内 X 接收光端机类、解调器类等, 此处不再一一列举;

4) 系统三级因素集 $G_i G_1, G_2\}$ 为系统资源能力状态, 其中 G_i 为各个三级因素中包含的二级因素; 三级因素包含: 卫星资源类和非卫星资源类;

由于系统过于庞大, 设备种类繁多, 此处以 X 下变频器设备为例进行分析, 其他设备认为状态均为“好”。

5) 各层级因素评判因素及单因素评判值确定: X 下变频器设备各级因素权重及单因素评判值列举如表 3 所示。

6) 按照表3的统计结果, 基于模糊关系矩阵计算一级因素能力评分: $C = \{0.822, 0.497, 0.753, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913, 0.913\}$;

7) 计算二级因素“X下变频器类”状态评分: $D=0.9$;

8) 该卫星对于此资源因素的需求数量为 $m=4$, 系统资源总数量 $z=10$, 计算二级因素“X下变频器类”评判等级集: $Y = \{\text{好, 较好, 一般, 差}\} = \{0.9, 0.8, 0.5, 0\}$, 其中, “好” $\in (0.9, 1.0]$, “较好” $\in [0.5, 0.9]$, “一般” $\in [0.4, 0.5)$, “差” $\in [0, 0.4)$;

9) 确定二级因素“X下变频器类”的评判等级为“较好”, 评判值 $y=0.8$, 评判指标系数为2; 其他二级因素评判等级均为“好”, 评判值为0.9, 评判指标系数为1;

10) 确定三级因素 G_1 的评判等级值为 $\theta_1=0.875$, 三级因素 G_2 的评判等级值为 $\theta_2=0.9$;

11) 计算针对该卫星的系统业务能力值:

$$F = \alpha \cdot \theta_1 + \beta \cdot \theta_2 = 0.8993$$

4.3 业务能力评估结果分析

基于定义的评判标准, 可以看出, 该地面接收系统当前对于该卫星的跟踪接收业务能力为“中”的水平, 表明系统中存在该卫星跟踪接收需求的资源出现了部分故障, 即故障资源为“X下变频器2”, 但其余的资源能够支持地面接收系统完成该卫星的接收业务。在系统实际运行中, 此结果与系统业务能力一致, 该方法及模型能够有效的评估当前系统对于一颗卫星的跟踪接收业务能力状态。

5 结束语

本文首先借鉴 AHP 的描述方法对遥感卫星地面接收系统进行系统研究及分析, 提炼出影响系统业务能力状态的关键因素, 建立了遥感卫星地面接收系统数据接收业务能力评估指标体系, 然后, 结合遥感卫星地面接收系统的特点, 以接收卫星数据的地面系统为评估对象, 设计了一套遥感卫星地面接收系统业务能力评估模型, 并通过遥感卫星地面接收系统的实例应用验证了模型的可行性, 结果表明, 本文论述的评估方法能够快速评估系统当前状态对新接入卫星的业务能力, 定位系统故障对新接入卫星业务能力的影 响, 为系统接入卫星的能力优化提供改进方向。同时, 使用该方法也能够评估系统当前状态对系统内已接入的卫星的业务能力, 对遥感卫星地面接收系统数据接收业务能力的评估及系统后续优化具有一定的参考价值。举一反三, 该方法同样能够扩展应用于测控数传一体化地面系统中进行系统业务能力的评估。

(上接第 237 页)

- [17] HONGKAI D, JIANJUN Y, ZHUORAN W, et al. Robust feature-free pose tracking and uncertainty-aware geometry reconstruction for spinning non-cooperative [J]. Robust feature-free pose tracking and uncertainty-aware geometry reconstruction for spinning non-cooperative, 2022, 102: 30-44.
- [18] CARLOS, A, BERENSTEIN, et al. A geometric approach to subpixel registration accuracy [J]. Computer Vision Graphics

参考文献:

- [1] FATOS X, XAVIER H, ADMIR B, et al. A simulated annealing algorithm for ground station scheduling problem [C] // Proc. of the 16th International Conference on Network-Based Information Systems, 2013. 24-30.
- [2] 刘莹, 章文毅, 马广彬, 等. 支持向量回归在地面站资源评价模型中的应用 [J]. 遥感信息, 2016, 31 (4): 22-27.
- [3] 王无敌, 周志鑫, 李湘, 等. 一种解决多星遥感地面接收资源冲突及优化的方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33 (6): 1299-1304.
- [4] GOOLEY T D, BORSI J J, MOORE J T. Automating air force satellite control network (AFSCN) scheduling [J]. Mathematical & Computer Modelling, 1996, 24 (2): 91-101.
- [5] 王小妹, 王万玉, 毛伟, 等. S/X/Ka 三频低轨遥感卫星数据接收系统的设计及实现 [J]. 空间电子技术, 2018, 15 (1): 105-110.
- [6] 王嘉, 王万玉. 无人值守遥感卫星接收站的设计及实现 [J]. 空间电子技术, 2019 (1): 28-33.
- [7] 林茂伟, 陈浩一, 年昭华, 等. 卫星地面站故障通用报警系统设计及应用 [J]. 气象科技, 2018, 46 (4): 829-834.
- [8] 申鸿辉. 基于监测点与自动化测试的接收系统故障诊断 [J]. 控制工程, 2016, 23 (3): 417-422.
- [9] 王英强, 刘焱. 基于状态机的遥感卫星地面站自动测试设计 [C] // 第 19 届中国遥感大会论文集, 2014, 349-354.
- [10] 朱维祥, 王万玉, 冯旭祥. 遥感卫星地面接收系统一体化设计 [J]. 现代电子技术, 2015, 38 (9): 73-76.
- [11] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 1-6.
- [12] 李奇. 基于集对分析的大坝风险后果评价模型研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [13] 梁桂林, 周晓纪, 王亚琼. 基于 ADC 模型的遥感卫星地面系统效能评估 [J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40 (5): 62-68.
- [14] 姚华飞, 赵光磊. 基于灰色 AHP 的防空预警探测系统效能评估 [J]. 国外电子测量技术, 2013, 32 (5): 44-48.
- [15] 姚智海, 刘建平, 王建平, 等. 地面测控资源调度效能评估指标体系 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (8): 1751-1758.
- [16] 张鑫, 韩建立, 刘坚, 等. 基于集对分析和 AHP 的某型导弹保障性评估 [J]. 舰船电子工程, 2021, 41 (2): 123-127.
- [17] 王怀, 王强. 多模双频段车载遥感地面站的设计及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (6): 180-186.
- [18] 李云峰, 武小悦. 地面站系统服务能力评估指标及其计算方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, (2): 158-164.
- [19] 王万玉, 陶孙杰, 冯旭祥, 等. 遥感卫星接收系统故障诊断专家系统设计 [J]. 电讯技术, 2015, 55 (5): 491-496.
- [20] 余涛. 航天地面测控系统的健康管理应用 [J]. 电讯技术, 2021, 61 (1): 30-35.
- [19] MVTec. Subpixel 词条 [EB/OL]. [2022-03-15]. <https://www.mvtec.com/technologies/subpixel>.
- [20] Keyence. IM-8000 系列图像尺寸测量仪产品目录 [EB/OL]. [2022-03-15]. <https://www.keyence.com.cn/products/measure-sys/image-measure/im-8000/models/im-8000/>.
- [21] 邝泳聪, 李家裕, 梁经伦, 等. 基于旋转立体视觉的元件引脚精密定位方法 [J]. 华南理工大学学报 (自然科学版), 2018, 46 (2): 45-53.