

doi: 10.7690/bgzd.2020.12.011

## 航天测发系统自主可控能力评估

胡云龙<sup>1</sup>, 解维奇<sup>2</sup>, 姚静波<sup>2</sup>

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 101416)

**摘要:** 为解决航天测发系统各类软硬件设备中的关键元器件、操作系统、软件等存在代码不开放、植入后门、逻辑炸弹等潜在风险, 对其自主可控能力进行评估研究。对航天测试发射系统相关软硬件设备国产化发展现状及国内外自主可控能力进行分析, 分别对可能使用的自主可控能力系列评估方法进行分类和比较, 并给出自主可控能力评估的主要方法及其研究构想。分析结果表明, 该研究对发展航天发射自主可控、增强航天测试发射技术自主性和先进性具有参考价值。

**关键词:** 测试发射系统; 航天设备; 国产化; 自主可控能力; 评估方法

**中图分类号:** V55 **文献标志码:** A

## Evaluation of Autonomous and Controllable Capability of Aerospace Test and Launch System

Hu Yunlong<sup>1</sup>, Xie Weiqi<sup>2</sup>, Yao Jingbo<sup>2</sup>

(1. College of Graduate, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Aerospace Science & Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

**Abstract:** In order to solve the potential risks of not open code, implanting backdoors, logic bombs, and so on in the key components, operating systems, and software of various hardware and software equipment in the aerospace test and launch system, an evaluation and research on its autonomous controllability is conducted. Analyzes the development status of the localization of software and hardware equipment related to the aerospace test launch system and the independent controllability at home and abroad, classifies and compares the series of independent controllability evaluation methods that may be used, and gives the main assessments of the independent controllability methods and research ideas. The analysis results show that the research has reference value for the development of autonomous controllability of aerospace launches and enhancement of the autonomy and advancement of aerospace test launch technology.

**Keywords:** test launch system; space equipment; localization; autonomous controllability; evaluation method

### 0 引言

长期以来,受制于国产软硬件的技术发展水平,我国航天测试发射领域所使用的各类软硬件设备中有很一部分都来自国外。这些国外的关键元器件、操作系统、应用软件等的大量应用,对我国航天测试发射系统的安全性、可靠性构成了严重威胁,严重制约了我国航天事业的进步。“震网”和“棱镜门”等事件更是表明这些国外的产品可能存在预置“漏洞”“后门”和“逻辑炸弹”等无法预知的安全隐患,这将直接影响到航天发射任务的成败。

解决这一问题的重要途径是走航天发射自主可控的道路。发展航天发射自主可控,能够增强航天测试发射技术自主性和先进性,能够提高航天试验体系的安全性和可靠性,为军事航天任务的执行提供安全可靠的技术保障,同时为实现航天任务的全面自主可控提供必要的理论与实践基础。想要在航

天发射自主可控道路上走得更稳、更远、更快,对航天测试发射系统自主可控能力的评估研究则显得至关重要。

### 1 自主可控能力发展现状

近年来,通过武器装备建设计划和国家科技发展计划等,自主可控关键软硬件技术取得重要突破,研制出一批具有代表性的基础软硬件产品,许多产品的功能和性能已达到国际同类产品水平;但航天试验中的测试、发射、测控等关键系统的核心设备,依然采用大量不可控的芯片、元器件、板卡、系统软件和应用软件。为尽早摆脱航天试验核心装备基础技术受制于人的被动局面,增强信息安全与控制能力,必须加快航天试验领域的全面自主可控建设。

#### 1.1 我国航天测发领域设备国产化现状

目前西昌卫星发射中心基于 kylin 系统和 QT 集

收稿日期: 2020-08-22; 修回日期: 2020-09-26

基金项目: 航天测试发射关键设备自主可控技术及应用(1600070688)

作者简介: 胡云龙(1996—),男,河南人,硕士,从事飞行器测试与安全可靠性研究。E-mail: 2558314336@qq.com。

成开发环境开发自主可控一体化指挥显示系统<sup>[1]</sup>, 实现了综合信息、火箭系统、地勤、测控、卫星、气象等数据的可视化: 西昌指挥控制中心和 2 个发射场已有 500 余台终端使用了国产的 kylin 操作系统; 酒泉卫星发射中心实现了所有测控软件的国产化, 并计划开展其他分系统的国产化进程; 太原卫星发射中心对新建发射阵地的 C<sup>3</sup>I 系统<sup>[2]</sup>实现了国产化, 同时对基地管理的硬件设施(加注系统、空调、塔架)实现了国产化, 后续将对已建的发射阵地有计划地实施国产化改造。

设备方面, 航天测发领域专用设备的国产化率表面上比较高, 但是大部分关键核心技术并没有真正实现国产化, 部分设备甚至只是贴了国产化的标签, 只是进口设备的中式包装, 突出表现在 CUP、操作系统、数据库、网络设备、通信设备、高性能的 AD、DA、DSP、FPGA 芯片或元器件<sup>[3]</sup>等。

计算机方面, 国产飞腾处理器、龙芯处理器<sup>[4]</sup>、麒麟操作系统、国产嵌入式操作系统<sup>[5]</sup>、国产数据库等具有自主知识产权的计算机软硬件核心技术已经取得了较大突破, 但由于国产处理器芯片性能偏低, 可选产品型号数量较少, 外围配套芯片不足、可靠性验证不充分等问题仍然在较大程度上限制着其技术普及。

总体上来看, 我国航天测发领域关键设备对国外产品、技术的依赖还比较严重, 整体国产化水平不高。

## 1.2 国外航天设备自主可控发展现状

### 1) 美国。

美国航天部门对关键器件的国产化问题十分重视, 其宇航类元器件一直处于世界领先地位, 由美国航空航天管理局(national aeronautics and space administration, NASA)统一领导、组织和策划, NASA 制定了以航天元器件为代表的军用元器件发展战略<sup>[6]</sup>。NASA 设有专门的 EEE 元器件与封装项目组(NASA electronic parts and packaging, NEPP)和 EEE 元器件保证组 NEPAG。文献[7-9]对美国 NEPP、NEPAG 及其元器件的发展历史、思路等进行了介绍和研究, NEPP 下分设元器件项目部、封装项目部和辐射项目部, 主要关注抗辐照 FPGA、光电子器件、振荡器、非易失性存储器等航天关键器件的开发和研究。NEPAG 成员除 NASA 各分中心外, 现已扩展到欧空局(European Space Agency, ESA)、日本宇航局(Japan Aerospace

Exploration Agency, JAXA)等机构<sup>[10]</sup>。美国十分重视在关键元器件领域的资源投入, 并把主要的精力放在改进 FPGA、存储器方面。

### 2) 日本。

日本宇航局对关键元器件的质量与可靠性工作非常重视, 在国家层面上设立了航天元器件技术顾问委员会和航天元器件管理委员会。日本在某些关键元器件方面仍然依赖美国, 但近年来, JAXA 开始大力推进核心元器件国产化, 加强研发先进技术以及大力维护国内生产线生产能力。从 2003 年开始实施航天关键元器件发展计划, 不间断推进关键元器件项目工作进展。从 2004 年开始着手构建适合日本航天发展的航天元器件标准体系, 涵盖指导元器件生产与使用保证的 2 大类标准。2008 年, JAXA 开展“航天器件综合对策”活动, 同时积极与欧洲航天局(European Space Agency, ESA)合作, 签订了 JAXA-ESA 元器件合作协议<sup>[11]</sup>。日本采用以点带面的发展策略, 以 SOI-ASIC(绝缘体上硅专用集成电路)<sup>[12]</sup>为突破口, 带动了关键元器件的全面发展, 目前, 日本的 SOI-ASIC 器件已经在国际航天元器件领域占据一席之地<sup>[13]</sup>。同时, 日本还成功研制了抗辐射 GaN FET 驱动器、MIS 型氮化镓功率晶体管、加固型 RC 均衡器、强抗辐射超低功耗 FPGA、抗辐射加固超结功率 MOSFET<sup>[14]</sup>等产品。

### 3) 俄罗斯。

俄罗斯航天设备所需元器件一定程度上依赖于美国和日本, 目前, 俄罗斯致力于建立国有电子元器件生产基地, 在核弹领域, 已经完全决定不再使用国外电子元器件, 其所需的电子元器件将 100% 在俄罗斯境内研发和生产。

### 4) 欧洲。

欧洲宇航界直到 20 世纪末都一直面临元器件的核心技术掌握在美国的问题。在这种形势下, 欧洲发起了欧洲元器件创新计划 ECI<sup>[13]</sup>, 意图将元器件欧洲化。迄今为止, 欧洲共执行了三期 ECI 计划, 增加了航天关键元器件在欧洲的可获得性, 增加了合格供应商的数量, 扭转了欧洲的元器件与制造商减少的趋势。

## 2 自主可控能力评估方法分类

评估的核心是评估方法的选取和应用, 研究问题的复杂性和不确定性也注定了对评估多种多样的要求; 因此, 如何选取一种科学有效的评估方法对于航天测试发射关键设备自主可控能力评估的结果

有着至关重要的作用。

## 2.1 层次分析法

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是一种实用的多准则决策方法,其本质上是一种决策思维方式,把复杂问题分解为多个组成因素,构建出层次清晰的结构模型,然后通过两两比较的方式确定层次中诸多因素的相对重要性,综合人因判断决定出这些因素相对重要性总的顺序,最后根据排序结果来进行规划、决策以及选择解决问题的措施。AHP能够体现人们决策思维的基本特征,即分解、判断和综合。在科技项目中,运用AHP法进行评估一般可以分为5个步骤:

- 1) 建立评估对象的递阶层次结构;
- 2) 构造两两比较判别矩阵;
- 3) 进行层次因素单排序数值的计算;
- 4) AHP判断矩阵一致性检验;
- 5) 各层指标的组合权重计算。

AHP已经较为广泛地应用在系统工程中,如成本效益决策、资源分配次序、冲突分析等方面<sup>[15-16]</sup>。李晨旻等<sup>[17]</sup>以层次分析法为基础实现了定性与定量相结合的风险评估,为大规模信息系统的风险评估及等级测评工作提供了方法;胡晓冉等<sup>[18]</sup>运用层次分析法进行外部质量度量分析,为第三方测试机构进行软件质量量化评估提供了新思路;宋俊典等<sup>[19]</sup>运用层次分析法为企业的国产化能力综合评价提供了定量、准确的结果,为了解企业当前的国产化水平提供了方法;毛亮等<sup>[20]</sup>运用模糊AHP对船载测控系统设备运行状态及测控性能进行综合评估,解决了船载测控系统能力体系过于复杂、定量评价困难的问题;叶卫东等<sup>[21]</sup>运用层次分析法对计算机健康状态进行评估,提出计算机健康状态和故障状态2个指标并进行了比较分析;王磊等<sup>[22]</sup>在ADC评估框架基础上运用层次分析法解决了ATS自动测试系统能力权值配置问题,提出了ATS能力及其次级指标的数学评估模型,为ATS的成本控制、可行性分析和风险论证提供了有效手段;张波等<sup>[23]</sup>运用层次分析法计算质量特性指标权重,较为全面地评估了航天测控软件质量;展跃权等<sup>[24]</sup>运用层次分析法对多星测控系统的诸多影响因素进行初步定性、定量分析,对其资源配置效能评价指标体系进行研究。

由此可见,层次分析法是一种比较实用、可靠度比较高、可操作性强的评价方法,能够作为国产

化自主可控能力评估的有效技术手段。但是,层次分析法要求评估者对评估对象的本质、包含要素以及结构关系的理解较深,容易造成评估过程中较大随机性、模糊性和主观性。

## 2.2 模糊综合评判法

模糊综合评判法是众多综合评判方法中的一种,其基本思想是利用最大隶属度原则和模糊线性变换原理,考虑与被评价对象相关的各个因素,对其作出合理的综合评价。它以隶属函数为桥梁,将不确定性在形式上转化为确定性,即将模糊性加以量化,从而能够利用传统的数学方法对其进行分析和处理<sup>[25]</sup>。一个模糊评判一般包括指标体系的选用、标准值的确定、目标集的确定、原始数据的标准化、各因素权重确定、合成算子的选择、计算综合指标值和综合指标隶属度等<sup>[26]</sup>。其基本过程为:

- 1) 建立评价对象因素集  $U=\{u_{ik}(k=1,2,\dots,n)\}$ ,  $u_{ik}$ 为第*i*个指标组的第*k*个评价指标,因数集是评估对象的各种因素所组成的一个普通集合;
- 2) 建立评价集  $V=\{v_1,v_2,\dots,v_m\}$ ,评价集是对评估对象可能作出的各种评估结果所组成的一个普通集合;
- 3) 建立权重集,一般来说,各个因素的重要程度不一样,为了反映各因素的重要程度,对各个因素  $u_{ik}$ 应赋予相应的权数,由各权数所组成的集合即权重集  $A=\{a_1,a_2,\dots,a_n\}$ 满足条件  $a_1+a_2+\dots+a_n=1$ ,权重常常是归一化的,各指标权重的确定可以用统计试验、专家评分和层次分析等方法;
- 4) 建立隶属度函数确定评判隶属度;
- 5) 单因素模糊评判,按照已经制定的评价集,对各评估因数进行评定,计算出  $R=\{r_{i1},r_{i2},\dots,r_{in}\}$ ,  $i=1\sim n$ ,从而得到评估矩阵  $R$ ,最终建立从评判对象因素集到评价集的模糊映射;

6) 用模糊变换、模糊合成进行模糊综合评判。模糊综合评判法是在工程评判中应用最为广泛的一种评判方法。高惠荔等<sup>[27]</sup>运用模糊综合评判法对测控网运行质量开展了评估研究,为后续科学合理调配测控网内设备资源提供了依据;刘军锋等<sup>[28]</sup>运用模糊综合评判法对兵器发射系统的性能进行了评估,提高了评估结果的可靠性;杨永安等<sup>[29]</sup>运用模糊综合评判法评估了航天测控任务,结合决策理论建立了模糊模型;刘甲东等<sup>[30]</sup>利用模糊综合评判法对GPU性能建立数学模型,得出了GPU性能的定量评估值。

模糊理论能够有效解决缺少明确含义、清晰边界以及外延不确定等模糊问题，但隶属度函数依靠经验，评估精确度较差，比较适用于对定性因素的主观评估。

### 2.3 灰色聚类分析法

灰色聚类分析法一直是灰色系统理论研究较多的灰色技术之一，所谓聚类分析，是指按照一定的标准对研究对象进行分类的数学方法。灰色聚类分析法则以灰色关联度为基础，是根据关联矩阵或灰数的白化权函数将一些观测指标或观测对象聚集成若干个可定义类别的方法。一个聚类可以看作是属于同一类观测对象的集合体。灰色聚类按照聚类方法的不同可以分为灰色星座聚类、灰色关联聚类和灰类白化函数聚类等，灰色星座聚类是依据样本自身属性，利用相似性原理定量地确定样本之间的关系，以便进行自然聚类；灰色关联聚类主要用于同类因素的归并，以简化复杂系统；灰类白化权函数聚类主要用于检测对象是否属于事先设定的不同类别，从而做出区别对待。灰色聚类分析实施步骤一般为：

- 1) 确定评价指标体系；
- 2) 根据各评价指标特点属性，分为若干层次；
- 3) 建立递阶层次结构；
- 4) 求解灰色聚类矩阵；
- 5) 进行灰色综合评估。

灰色聚类分析法对分析序列的分布没有特殊要求<sup>[31]</sup>、计算过程简单，适用于综合能力评估，善于处理贫信息系统，能够在短资料、少信息的条件下进行建模、预测和决策<sup>[32]</sup>。刘卫东等<sup>[33]</sup>基于灰色聚类评估提出了一种新的设计缺陷定量分类方法，对硬件产品设计缺陷研究提供了思路；贺北方等<sup>[34]</sup>在灰色聚类分析的基础上，针对复杂系统多目标、多层次、多关联、动态和信息不完备等特点建立了灰色综合评估模型，具有广泛的适应性。

### 2.4 Delphi 法

Delphi 法又叫专家调查法，适用性广、实用性强，是 1946 年由美国的兰德公司创始并开始实行，之后被迅速广泛地应用于军事、医疗、技术、市场需求等领域<sup>[35]</sup>，且得到了广泛认可。Delphi 法本质上是一种反馈匿名函询法，是通过征询专家，依靠专家的知识 and 经验来进行评价和预测的方法，过程中依靠信件背靠背评价、汇总、收敛，具有匿名性、多次有控制的反馈以及小组的统计回答这 3 个区别

于其他专家预测方法的特点<sup>[36]</sup>：

1) 匿名性。匿名是 Delphi 法极其重要的一个特点，从事评估的专家互相不知道还有哪些人参加预测，他们在完全匿名的情况下对目标独立评估、交流思想。

2) 多次有控制的反馈。专家小组意见的交流通过回答组织者提出的问题得到实现，一般须经过多轮反馈才能完成最终评估。

3) 小组的统计回答。小组的统计回答会报告出 1 个中位数和 2 个四分点，其中一半观点落在 2 个四分点内，一半落在 2 个四分点以外，每种观点都会包含在这样的统计当中，弥补了专家会议法的一个缺点。

一般来说，Delphi 法包含以下几个环节，确定评价目标、构建评价指标体系、确定评价方法、选定专家(BROWN<sup>[37]</sup>指出，专家的选择是决定 Delphi 法成败的一个关键问题)、最终评估等，其实施过程可简单表示如下：匿名征求专家意见—归纳、统计—匿名反馈—归纳、统计……，若干轮后，结束，具体流程如图 1 所示。

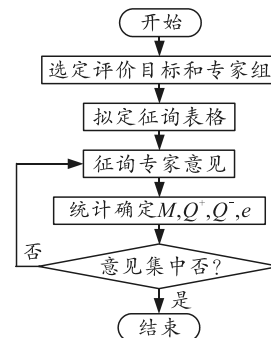


图 1 Delphi 法实施步骤流程

图中： $M$  为专家意见的中位数； $Q^+$  为上四分位数； $Q^-$  为下四分位数； $e$  为集中系数， $e = (Q^+ - Q^-) / (\max - \min)$ ， $e$  越小意见越集中。

Delphi 法利用专家知识，操作简单，结论易于使用，但是主观性比较强，往往无法用精确的数值表达，多人评价时结论较难收敛。Delphi 法适合于定性指标的评估，适合运用 Delphi 法的决策问题一般有以下特点：不确定、复杂多学科、需依靠专家的主观经验进行判断等。

### 2.5 评估方法比较

结合各种评估方法的适用范围、优缺点和应用情况等特征，对层次分析法、模糊综合评判法、灰色聚类分析法以及 Delphi 法进行比较，其结果如表 1。

表 1 评估方法比较

评估方法	适用范围	方法优缺点	应用关键点
层次分析法	已有的指标体系层次结构分明、内容全面	结合定性、定量各自优点,方法简便,可操作性强;但计算量大,结果主观性较强	判断矩阵中的元素要根据一致性检验情况而不断调整
模糊综合评判法	评估指标较少,评估主体对指标所赋评价等级的水平波动较小,模糊性问题	量化定性的模糊判断量,计算简洁;但隶属函数依靠经验,评估精确度较差	仅有一个评价等级集,评价等级集须统一确立
灰色聚类分析法	贫信息系统,复杂系统,综合能力评估	对分析序列分布无特殊要求,计算过程简单;但精确度稍差	白化权函数的确定
Delphi 法	不确定、复杂多学科,需依靠专家的主观经验进行判断	操作简单,结论易使用;但主观性强,多人评价结果难收敛	评估专家的选择

### 3 自主可控能力评估方法现状及研究建议

#### 3.1 自主可控能力评估方法应用现状

国内对于自主可控能力,特别是航天测发、测控系统自主可控能力的评估研究较少。傅为忠等<sup>[38]</sup>利用主成分分析法对试验区自主创新能力进行了评估研究;赵峰<sup>[39]</sup>运用灰色聚类的评估方法对我国自主创新能力进行了评估,提出了自主创新能力应该满足的相应指标并对结果作归纳分析;朱帅<sup>[40]</sup>运用基于改进 DS-AHP 的指标评估方法对国产 CPU 的对外依存度进行了研究,为评判国产 CPU 是否实现独立自主生产、杜绝由植入后门引起的种种隐患提供了理论依据和方法支持;文献[41-42]提出了有效对外技术依存度的概念,修正了对现有对外技术依存度指标的评估方法,对于航天测发、测控系统自主可控能力评估具有很大的借鉴意义;宋俊典等<sup>[19]</sup>提出了一种基于层次分析法的国产化能力评价方法,建立了国产化能力评价指标体系,并能通过综合评价函数计算国产化能力综合得分,为自主可控能力的评估研究提供了思路。

NASA 和 ESA 构建的评估指标数目较少,尚未形成一个系统、完整的指标体系,有关航天测发、测控系统的系统评估研究也鲜见报道。文献[43]列出美国航空航天管理局评估地面站资源能力常用的 25 项指标悉数列出,各项指标间重复问题突出,尚未形成一个完整的指标体系。欧洲航天管理局在其测控网 ESTRACK<sup>[44]</sup>的任务规划系统调度中,选取基于任务优先级进行加权的总时间作为调度策

略优劣的评价准则,在各项研究中并没有明确定义航天测控系统服务能力的概念,也没有充分体现航天测控系统目前面临的问题。

#### 3.2 对自主可控能力评估的研究建议

通过对航天测试发射系统自主可控能力及其相关设备技术、评估方法国内外研究成果的学习与理解,对我国航天测试发射关键设备自主可控能力的评估,可以从以下进行发展:

1) 综合考虑层次分析法、模糊综合评判法、灰色聚类分析法以及 Delphi 法等评估方法的优缺点及应用范围,结合航天测发、测控系统复杂、功能多样以及参与评价的子系统 and 指标较多等特点,最终决定采用层次分析法作为对航天测试发射关键设备自主可控能力评估的主要研究方法。

2) 考虑从系统自主性、可靠性、风险识别、风险评估和安全控制等方面对影响系统自主可控性因素进行量化,形成测发、测控系统自主可控性的评判标准,构建测发、测控系统自主可控化评估模型。

3) 可以利用数据库技术存储管理数据,便于数据查询。评估过程中需要处理的数据量会比较大,分析、输入和管理这些数据需要花费大量的时间,引入数据库系统能够提升工作效率。

4) 在对系统进行评估理论和方法研究的基础上,设计、开发具有智能化、图形化功能的辅助决策软件,在保证和验证评估理论及方法科学性的同时,使评估工作更具可操作性。

5) 利用好专家咨询这一途径。评估过程中,要尽可能多地咨询相关领域专家,才能使评估结果更为科学合理、更逼近真实情况。

### 4 结论

航天测试发射系统的自主可控能力将直接影响航天任务的成败,对其自主可控能力进行评估至关重要。在评估过程中,使用层次分析法能够有效提高评估的科学性、系统性、全面性,使得评估体系结构合理、层次分明,对自主可控能力的评估研究才更能接近事实。该研究对于增强航天测试发射技术的自主性和先进性,提高航天试验体系的安全性和可靠性,最终实现航天任务的全面自主可控具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 唐立文,邓友义,蒋伟.基于软构件的自主可控航天试验指挥信息综合显示系统[J].装备学院学报,2013,

- 24(6): 106-110.
- [2] 单锦辉, 曹宗胜, 张爱良, 等. 发射场测试发射指挥监控系统可靠性分析[J]. 载人航天, 2010, 16(2): 58-64.
- [3] 张群. 航天关键国产化元器件应用验证技术研究[C]. 中国航天电子技术研究院科学技术委员会//第五届航天电子战略研究论坛论文集(微电子专刊). 中国航天电子技术研究院科学技术委员会: 航天电子发展战略研究中心, 2018: 4.
- [4] 马威, 姚静波, 常永胜, 等. 国产 CPU 发展的现状与展望[J]. 集成电路应用, 2019, 36(4): 5-8.
- [5] 何小庆. 国产嵌入式操作系统发展思考[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(12): 4-5, 10.
- [6] 郭新军, 黄庆红, 田素梅, 等. 美国军用电子元器件技术发展策略[C]. 全国半导体器件产业发展、创新产品和新技术研讨会, 2011.
- [7] LABE K A, SAMPSON M J. NASA Electronic Parts and Packaging (NEPP) Program-Update[R]. NASA Goddard Space Flight Center, 2010: 1-20.
- [8] HAMITER L. The History of Space Quality EEE Parts in the United States[C]. USA, Electronic Components Institute Internationale, 1991: 124-127.
- [9] SAMPSON M J, The NASA EEE Parts Assurance Group(NEPAG) An Evolving Approach to Maximizing Space Parts Assurance Resources[C]. France: ESA SPECIAL PUBLICATIONS, 2002, 507: 127-136.
- [10] 蔡娜, 王敬贤. 国外航天元器件发展经验简析[J]. 航天标准化, 2010(4): 28-31, 46.
- [11] 伍尚慧, 张轩瑞, 李姍玉. 日本航天元器件发展现状研究[J]. 国际太空, 2019(3): 22-25.
- [12] Staoshi KUBOYAMA. Development Status for JAXA Critical Parts 2009[EB/OL]. [2012-01-10]. <http://www.jaxa.com>.
- [13] 姚莉, 王敬贤, 蔡娜. 国内外航天关键元器件发展初探[J]. 航天标准化, 2013(1): 26-29.
- [14] NEMOTO N, Development Status of JAXA EEE Parts[C]. European Space Components Conference (ESCCON), 2013.
- [15] SAATY T L. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process[M]. Princeton: RWS Publications, 1994: 35-127.
- [16] SCHEN K S. Avoiding rank reversal in AHP decision support models[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 74: 4607-4619.
- [17] 李晨曦, 张晓梅, 李媛. 一种基于层次分析法的大规模信息系统风险评估方法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(10): 322-325.
- [18] 胡晓冉, 左家平, 王坤. 基于层次分析法的软件质量量化研究[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(11): 138-141.
- [19] 宋俊典, 高洪美, 杨琳, 等. 基于层次分析法的国产化能力评价研究[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(5): 911-916.
- [20] 毛亮, 周成刚, 张煜昕, 等. 模糊 AHP 在车载测控系统效能评估中应用研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(8): 85-88.
- [21] 叶卫东, 张金盛. 运用层次分析法对计算机健康状态评估[J]. 微计算机信息, 2009, 25(19): 216-217, 237.
- [22] 王磊, 方洋旺, 徐鑫, 等. 自动测试系统效能评估体系[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(12): 2608-2611, 2720.
- [23] 张波, 郭巍, 林鹏. 航天测控软件动态质量评估模型研究[J]. 质量与可靠性, 2018(4): 45-48, 52.
- [24] 展跃全, 赵育善. 多星测控系统资源配置效能评价指标体系研究[J]. 载人航天, 2008(3): 26-30.
- [25] 沈进昌, 杜树新, 罗祎, 等. 基于云模型的模糊综合评价方法及应用[J]. 模糊系统与数学, 2012, 26(6): 115-123.
- [26] 周永林. 基于模糊综合评判的可信度评估模型及方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [27] 高惠荔, 刘彬, 李文舒, 等. 基于模糊综合评判的测控网运行评估仿真与实现[J]. 无线电工程, 2019, 49(5): 412-416.
- [28] 刘军锋, 王学智, 赵兵. 模糊综合评判法在兵器发射系统性能评估中的应用[J]. 火箭与制导学报, 2007(5): 344-346.
- [29] 杨永安, 冯祖仁, 李光明, 等. 基于模糊集理论的航天器测控任务评估[J]. 宇航学报, 2005(1): 34-38.
- [30] 刘甲东, 朱怡安. 基于模糊模型的 GPU 性能评估研究[J]. 航空计算技术, 2010, 40(2): 69-72.
- [31] 许云飞. 灰色聚类分析方法介绍[J]. 山东交通科技, 1999(2): 41-44.
- [32] 贺北方, 刘正才. 灰色系统理论方法与应用[M]. 北京: 气象出版社, 1995: 11-37.
- [33] 刘卫东, 肖承地, 朱敏. 基于灰色聚类评估的硬件产品设计缺陷分类研究[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 65-67.
- [34] 贺北方, 吴泽宁, 杨建水, 等. 复杂系统的灰色综合评价研究[J]. 郑州工业大学学报, 1999(1): 50-53.
- [35] Delphi method [EB/OL]. [http://en.Wikipedia.org/wiki/Delphi\\_method](http://en.Wikipedia.org/wiki/Delphi_method), 2011-04.
- [36] 郭志慧. 德尔菲法简介及在国家重点实验室运行管理中的应用[J]. 中国基础科学, 2011, 13(6): 20-22.
- [37] BROWN B. Delphi process: a methodology using for the elicitation of opinions of experts[J]. Rand Corporation, 1987, 9: 39.
- [38] 傅为忠, 章莉, 黄艳华. 安徽自主创新试验区自主创新评价研究[J]. 科技进步与对策, 2010, 27(18): 127-132.
- [39] 赵峰. 基于灰色聚类的我国国家自主创新能力评价[J]. 科技管理研究, 2008, 28(1): 18-20.

[40] 朱帅. 国产 CPU 对外依存度评估研究[D]. 北京: 装备学院, 2016.

[41] 罗亚非, 蔡乾龙. 有效对外技术依存度理论与实证研究[J]. 中国科技论坛, 2008(11): 93-97.

[42] 罗亚非, 蔡乾龙. 对外技术依存度测评方法研究[J]. 科技进步与对策, 2009, 26(22): 132-136.

[43] JAY L, WILLIAM E. Potter, Scheduling Objectives,

(上接第 32 页)

[8] 知远战略与防务研究所. 美国陆军装甲旅战斗队目标编制与装备 2017[M]. 江阴: 知远战略与防务研究所出版及数据标准化部, 2017: 253-381.

[9] 庄钟锐. 基于熵理论的作战指挥系统组织结构(OCSOS)描述与评价[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009: 9-11.

(上接第 35 页)

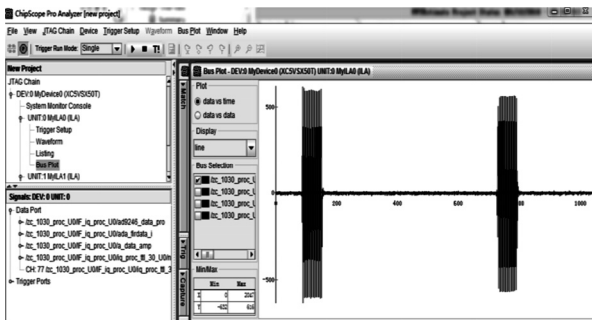


图 6 中频信号

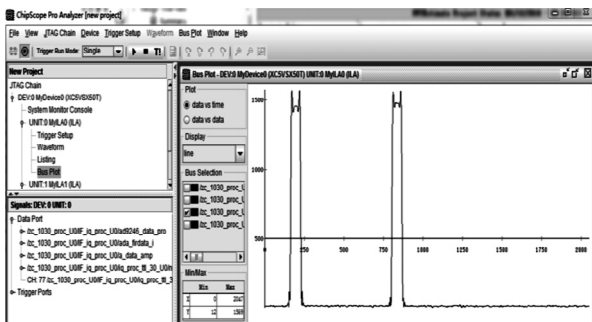


图 7 零中频滤波后信号

图 8 为某中频处理板通过 ChipScope Pro Analyzer 实时采集的 60 M 中频信号(有用信号)和 70 M 中频信号(干扰信号)局部图;前 2 个为有用信号,后 2 个为干扰信号。

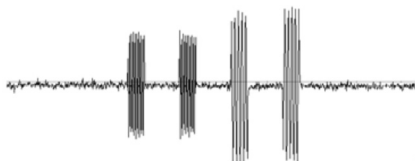


图 8 中频输入信号

如图 9 所示,在对 60 M 中频信号进行下变频到零中频信号后,采用设计的低通 FIR 滤波器,正

Requirements, Resources, Constraints and Processes: Implications for a Generic Expert Scheduling System Architecture and Toolkit[J]. Expert Systems with Applications, 1995, 19(3): 423-424.

[44] DAMIANI S, DREIHAHN H, NOLL J, et al. A planning and scheduling system to allocate ESA ground station network services[C]//The Int'l Conference on Automated Planning and Scheduling. 2007.

[10] 苏宪程, 唐小丰, 白凤凯, 等. 基于熵理论的装备管理组织结构优化研究[J]. 装备学院学报, 2014, 25(6): 38-42.

[11] 尚其刚, 姜峰, 谢小杨. 国外陆军部队装备保障力量建设与运用现状研究[J]. 装甲兵技术学院学报, 2017, 33(3): 56-58.

确地提取出 60 M 中频信号的基带信号,并且滤除了 70 M 中频信号的干扰信号。

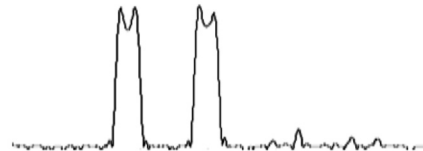


图 9 滤波后基带信号

### 4 结束语

基于 Matlab 的数字滤波器设计为滤波器的研究和工程实现提供了一种便捷可靠的途径,可提高设计灵活性、降低设计的复杂性,缩短项目的开发周期。笔者对等波纹 FIR 数字滤波器进行设计,通过工程验证了该方法的便捷性和实用性。

### 参考文献:

[1] 吴镇扬. 数字信号处理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 176-180.

[2] 程佩清. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 196-197.

[3] 邹鲲. MATLAB6.X 信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 196-202.

[4] 丁玉美. 数字信号处理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 181-185.

[5] 王炜, 伦涛, 袁野. 基于 Matlab 自动生成测试报告的研究[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 23-28.

[6] 王秀琴, 范艳根. 全概率截获信道化接收机的设计[J]. 移动通信, 2008, 2(1): 123-126.

[7] 李学军. 一种软件无线电接收机的研究与设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.

[8] 郭晓宇. 基于 FPGA 实现 FIR 数字滤波器的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.