

# 基于“软硬结合”平台的导航战体系 对抗与评估系统研究

张国义<sup>1</sup>, 刘 华<sup>2</sup>, 高翔霄<sup>3</sup>, 向才炳<sup>4</sup>, 柴 强<sup>1</sup>

(1. 中国航天电子技术研究院 卫星导航系统工程中心, 北京 10094; 2. 北京遥测技术研究所, 北京 100094; 3. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076; 4. 32021 部队, 北京 100094)

**摘要:** 为了实现全规模、等要素的真实或近真实条件的导航战体系对抗及评估, 基于“软硬结合”平台的导航战体系对抗与评估系统提出“软硬结合”的系统架构, 即用计算机网络把试验推演评估仿真分系统和对抗硬件平台系统试验连接起来, 设计的试验推演评估仿真分系统基于软件虚拟方式满足系统灵活性及一定规模的要求, 和工程体系对照的物理仿真分系统具备装备实体物理特性, “软硬结合”模式通过硬件设备可与软件模型无差别的等效集成, 共同构建试验环境; 在导航战体系对抗过程中实现了对体系的信息流、时间流、预期试验结论等验证内容, 实现了进行全规模、全要素验证要求, 并具备灵活性与真实性有效统一; 现有初步规模设备的典型应用场景对抗的试验结果表明, “软硬结合”平台这一体系能够满足相应的体系化、网络化系统对抗和多层次、全方位的体系对抗需求。

**关键词:** 导航战; 体系对抗; 推演评估仿真; 对抗物理仿真

## Research on the Confrontation and Evaluation System of Navigation Warfare System Based on “soft and hard” Platform

ZHANG Guoyi<sup>1</sup>, LIU Hua<sup>2</sup>, GAO Xiangxiao<sup>3</sup>, XIANG Caibing<sup>4</sup>, CHAI Qiang<sup>1</sup>

(1. GNSS System Engineering Center, China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100094, China; 2. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China; 3. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China; 4. 32021 Troop, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The research on the navigation warfare system confrontation and evaluation system based on the combination of software and hardware platform is to realize the real conditions or near-realistic navigation warfare system confrontation and evaluation on a full scale and other elements. Combining software and hardware connects the simulation subsystem of experimental deduction and the system test of the confrontation hardware platform system. The simulation subsystem of experimental deduction based on software virtualization meets the requirements of system flexibility and scales. Besides, confrontation hardware platform system has the physical characteristics of the equipment entity. Combining software and hardware can build the test environment by equivalence integration of hardware device and software models without any difference. For the verification content of the system information flow and time flow, full-scale and all-factor verification is realized. In addition, flexibility and authenticity is effectively unified. Combined with the experimental verification of navigation warfare confrontation in typical application scenarios carried out by the existing preliminary scale equipment entities, the “Combining software and hardware” platform can meet the corresponding requirements of systematic and networked system confrontation and multilevel all-directional system confrontation.

**Keywords:** navigation warfare; system confrontation; deduction evaluation simulation; confrontation physics simulation

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-11-02。

作者简介: 张国义(1974-), 男, 安徽六安人, 工学博士, 高级工程师, 主要从事卫星导航、通信系统设计方向的研究。

引用格式: 张国义, 刘 华, 高翔霄, 等. 基于“软硬结合”平台的导航战体系对抗与评估系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 266-272, 281.

### 0 引言

卫星导航系统/应用系统的导航战从作战对抗对象体系来看,可分为使导航系统自身能力退化/失效和使导航应用能力效能退化/失效。前者是使卫星和地面支持系统(运控、测控)失去星地测量、星间测量和数据通信能力,这样导航卫星和地面支持系统失去导航电文数据注入更新和正确测量数据来源<sup>[1]</sup>;后者是以噪声信号、转发欺骗信号、生成式相干干扰信号进行区域遮蔽/压制、欺骗,使得区域内卫星导航接收机失锁、错锁导航信号,从而不能授时、定位、测速或授时、定位、测速错误。从作战对抗技术手段上来看是使卫星导航系统所有含接收机和信机被压制/干扰、欺骗,包括压制干扰和欺骗干扰两类。

导航战体系对抗与评估系统是一个支持交互式装备体系作战试验仿真的试验系统,为试验与评估联合作战状态下导航体系装备运用作战效能,必须能够详细地模拟要素参与的地面、空中系统作战,并能将电子战,信息战等战法有效地集成到模型。基于统一的开发标准、数据交换协议和协调一致的体系结构,通过计算机网络把试验推演评估仿真分系统和物理仿真分系统连接起来,用以模拟导航战体系对抗状态下装备及战术运用,模拟各种信息源生成体系对抗试验所需的各种数据和信息,评估体系将其作为对抗试验的

输入信源,用以验证系统在对抗条件下效能。

试验推演评估仿真分系统具备软件仿真系统灵活性及易于扩充规模的要求,物理仿真分系统具备装备实体的物理特性,“软硬结合”模式通过硬件设备可与软件模型无差别的等效集成,共同构建试验环境,进行全规模全要素验证;灵活性与真实性有效统一。试验系统基于代表系统近真实状态的系统级试验验证理念,构建涵盖信息流、控制流、时间流的多层次对抗研究平台,同时具有灵活可控的体系架构,软硬件可灵活操控及配置,具备扩展升级能力。

### 1 试验推演评估仿真分系统

导航体系对抗推演在系统运用中主要可以体现三个层次:①在第一层次,能模拟诸军兵种间的联合作战问题,并表现不同作战样式的综合情况。重点描述和解决体系对抗如:导航电子战与联合导航体系保障、综合信息战、无人应用系统作战等。②在第二层次,能模拟运用导航应用装备的作战行动,描述导航相关装备、兵力的对抗与作战效果计算。③在第三层,能模拟具体场景的作战行动,通过相应要素的战术运用,用数字手段模拟仿真真实兵、实装达到模拟实兵推演的控制、导调与评估的目的。

#### 1.1 试验推演评估仿真分系统总体组成

体系对抗试验推演评估仿真分系统的组成包括系

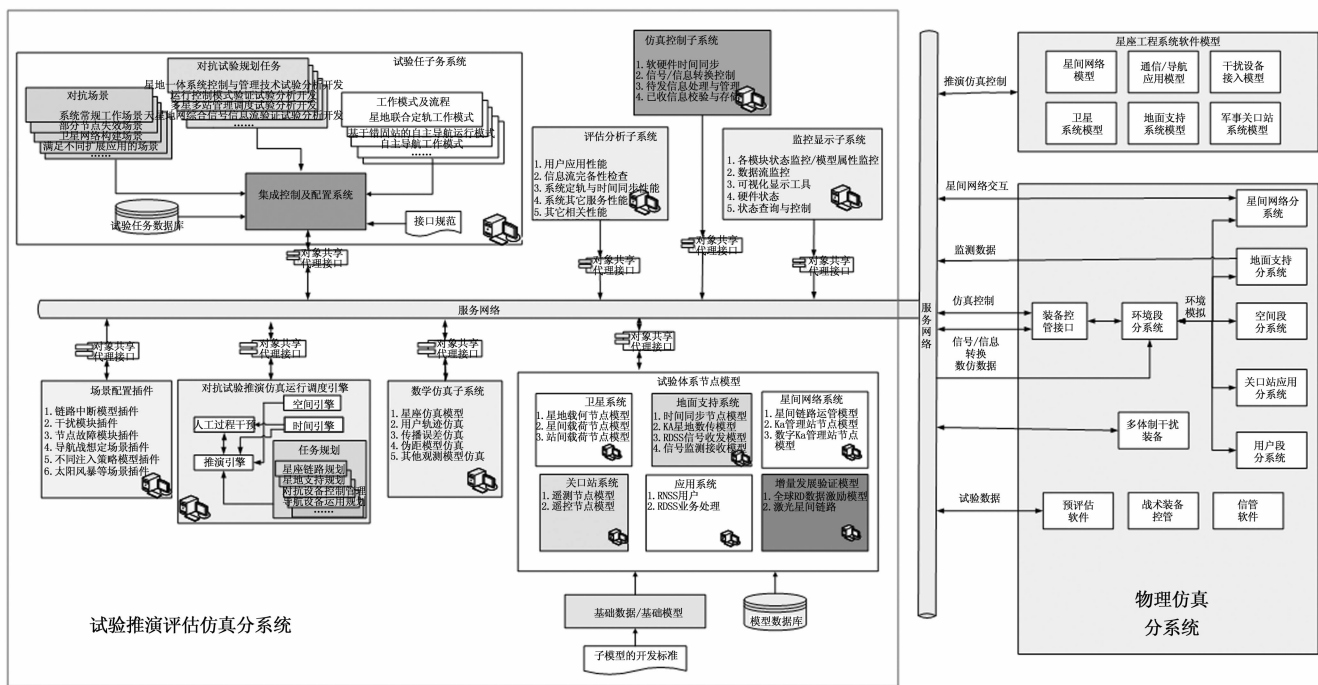


图 1 试验推演评估仿真分系统

统主体与对外接口，如图 1 所示。体系对抗试验推演评估仿真分系统主体包括试验任务子系统、推演仿真运行调度引擎、数学仿真子系统、试验体系节点模型和评估分析子系统五部分，其他包括监控显示子系统、仿真控制子系统，场景配置插件、信息服务与数据管理软件等，并支持物理仿真分系统协同仿真控制，体系对抗推演评估仿真分系统对外接口主要实现与物理仿真子系统的联合/协同的试验能力。

### 1.2 试验任务系统

该系统是整个仿真系统的中枢，主要功能是根据试验规划任务脚本、系统仿真模式及流程开发脚本、对抗运行场景开发脚本映射为仿真运行调度引擎的启停、各类模型参数或属性中，并进行初始运行的加载。试验想定与配置涉及大量的任务、模式、参数的切分，包括：1) 对抗试验任务规划；2) 系统仿真的工作模式及流程；3) 导航系统及应用系统的对抗场景配置。

### 1.3 试验体系节点模型

体系对抗试验推演评估分系统需要建模与实际系统对应的节点模型，用于完成系统试验。实际系统映射到仿真系统中节点与节点属性（包含业务动作、输入输出接口、控制接口、涉及的接口及关键技术、特性参数等方面）的要求。

导航战体系对抗任务对应实际物理系统所需参与的节点类型及节点属性存在约束关系。从仿真导航战体系对抗任务需求出发得到为满足系统软件闭环验证节点模型，从而与系统物理组成构成映射关系。

按照系统支持信息、业务、系统性能的作战试验需求，对仿真节点进行设计。其中一级节点包括地面支持系统、卫星、星间网络、用户和环境、对抗干扰源；同时地面支持系统包括综合管控子系统、地面支持子系统和三个二级节点。

### 1.4 数学仿真子系统

为保证对抗试验、推演、评估的可靠和可信，必须确保星地/星间链路模拟的关键体制、软件和算法的可行性和有效性，提供数据支持网络、节点的带宽链路和导航定位算法等仿真数据，数学仿真模型需要仿真生成与通信和观测数据有关的各类数据，包括空间段轨道与卫星链路带宽、环境段影响数据、星间观测数据、地面观测数据等。

- 1) 空间段轨道数据仿真；
- 2) 对抗及运行接入控制环境影响数据仿真；

- 3) 星间网络数据仿真；
- 4) 星地网络数据仿真。

## 1.5 对抗试验推演仿真运行引擎

### 1.5.1 试验推演仿真运行引擎结构

对抗试验推演仿真运行引擎是试验系统的推演及调度核心，它根据对抗试验规划配置信息，控制仿真时间推进和空间约束进行分布式仿真运行，驱动系统按照空间关系、相关时序运行，模拟导航系统对抗运行的全过程。试验推演仿真运行引擎结构如图 2 所示。

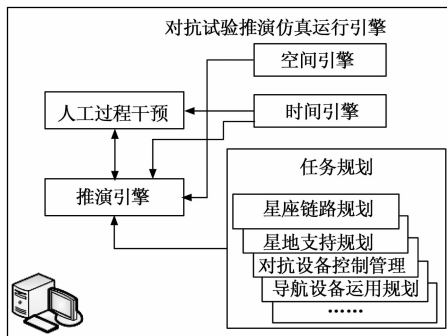


图 2 试验推演仿真运行引擎

### 1.5.2 推演引擎

推演引擎组成如图 3 所示，通过任务规划导入模块将任务规划数据分解入库并提交推演引擎。推演引擎按照时间引擎推动进行不停地解算；推演引擎中包含反应规则、行为、各实体、事件几个部分，推演引擎循环计算的方法是“行为—反应—行为变化”。推演引擎运算的结果通过显示接口向外输出。推演引擎运算产生的事件列表可以通过显示接口向外输出。在推演过程中，可通过人工干预模块改变实体的行为（例如：改变导航应用装备实体的机动路线、装备的

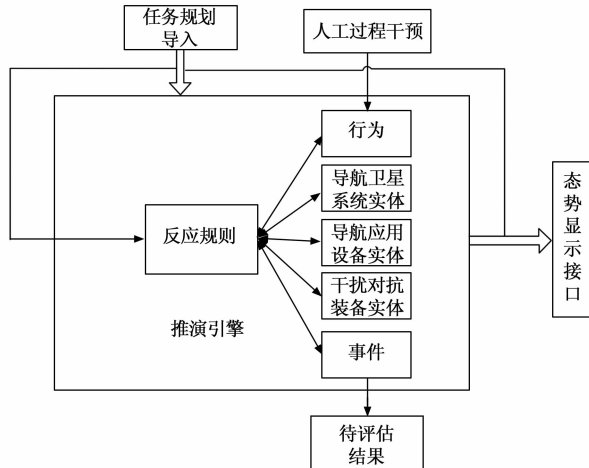


图 3 推演引擎组成图

使用状态, 干扰对抗装备的接入控制方式和规模); 可以通过推演进程控制模块控制推演过程, 控制推演开始、推演暂停、重新推演; 通过空间引擎和时间引擎控制推演区域和频度。推演产生的事件是待评估主要输出之一。

### 1.6 评估子析系统

评估分析子系统主要是对相关验证试验需要进行指标评估的数据进行管理、分析与评估, 其评估算法可以采用插件方式进行开发, 同时支持在线评估和事后评估。

## 2 物理仿真分系统总体组成

### 2.1 物理仿真分系统结构模型

导航战体系对抗物理仿真分系统要基于系统级等规模(或比例)、全要素、近真实、任意场景可设的平台, 要建立对抗物理仿真分系统, 需要研究并具备的能力包括体系对抗信号环境的生成能力、体系对抗环境的信号监测能力、针对体系对抗因素的抗干扰能力。

物理仿真分系统的系统模块组成: 至少 8 台导航卫星信号模拟器(A、B、C、D、E、F、G、H)、至少 7 台北斗/GPS 双模接收机、一台服务器)、数学仿真软件、空间段体系对抗仿真系统(星间链路仿真)以及一个数据处理服务器组成; 另外添加的 4 类欺骗干扰模块、4 类阻塞干扰模块、4 类射频切换与叠加模块组成。

对抗物理仿真分系统结构如图 4 所示, 综合控制计算机通过网络连接各类干扰源(阻塞干扰器、欺骗干扰器)、环境段、全球仿真软件模块, 通过网络连接空间段仿真计算机, 进行仿真参数的配置和控制生成。其中, S 模拟测控站、运控模拟测通、星间链路

运管 Ka 站和卫星模拟器分别能够实现对工程系统信号的仿真生成; 阻塞干扰器用于产生测控、运控上注、星间链路、卫星 B1/B2/B3 频段的阻塞干扰, 欺骗干扰器生成测控、运控上注、星间链路、卫星 B1/B2/B3 的欺骗信号。

评估预处理子系统, 能够对各类信号故障状态, 包括空间卫星钟差/轨道误差、伪距信号误差、对抗交互过程积累结果等待评估数据进行预处理; 交由推演评估仿真分系统评估各分系统多类、多路功率可调、制式可调的干扰信号的对导航体系干扰效果, 完成对装备体系干扰对抗性能测试评估。

### 2.2 卫星测控对抗

测控对抗主要考虑: 链路压制、重放式干扰、伪指令干扰, 和协议干扰<sup>[2]</sup>。测控对抗试验导航战体系对抗系统局部连接如图 5 所示。

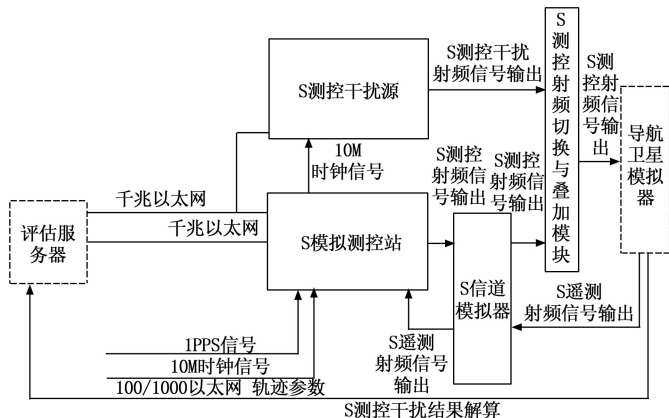


图 5 测控对抗试验系统连接示意图

测控对抗试验中, 物理仿真分系统把干扰信号合路于从模拟在轨条件 S 信道模拟器出来的测控上注信号上, 进入遥控接收机, 使单星或多星遥控接收机被阻塞, 失去 S 遥控上注(或 S 信道备份运控指令 L 上注)能力, 从而失去对卫星平台的控制能力。评估服务器接收从 S 模拟测控站和导航卫星模拟器的输出数据, 评测对抗结果。

### 2.3 导航载荷/运控对抗

检验卫星在 L 上行干扰条件下组网提供服务的能力<sup>[3-4]</sup>。包括: 上行注入接收载荷、星载信息处理载荷、卫星钟与时频载荷等在复杂干扰环境下的北斗体系作战效能评估, 连接关系如图 6 所示。

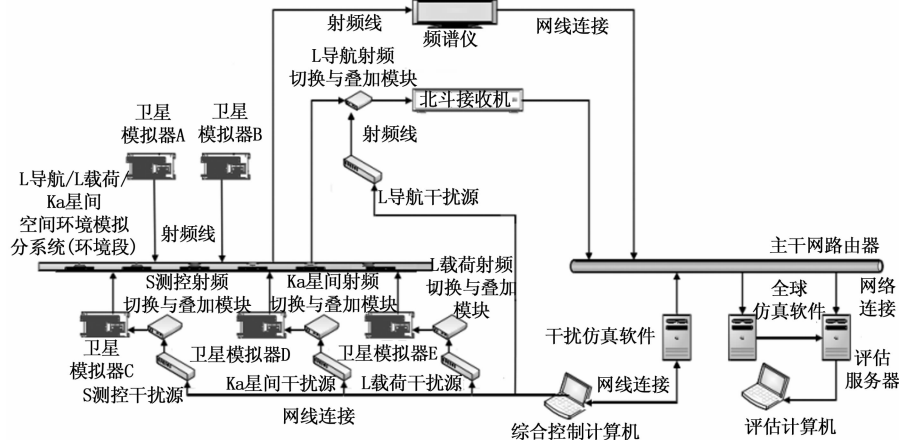


图 4 导航战体系对抗物理仿真分系统框图

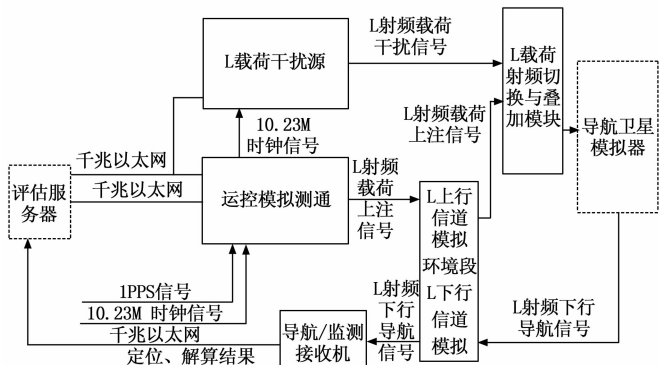


图 6 卫星导航载荷对抗试验系统连接示意图

在测评设备的控制下，运控上注信号生成设备产生上行正常注入信号，有线方式通过环境段发送给被测卫星模拟器上注载荷，建立起上行收发链路。L 频段上行注入信号干扰源设备根据测试评估要求产生不同干扰形式、不同电平和不同注入数据的信号，对导航卫星模拟器上的扩频上注测距接收机的信号、信息处理能力进行测试；同时，系统信号质量监测设备和导航信号接收机接收卫星模拟器的下行导航信号，建立起下行收发链路。信号质量监测设备对卫星模拟器下行导航信号从信号质量层面进行分析，导航接收机对导航信号进行精密伪距测量和下行电文的解析，评估服务器完成系统对抗结果的评估。

### 2.4 星间干扰对抗

导航星座的星间链路受到干扰时，会影响到整个卫星系统的服务性能<sup>[5-6]</sup>。星间链路可能面临的干扰包括压制式干扰和欺骗式干扰等，在导航战体系对抗系统模拟星间链路对抗试验的连接如图 7 所示。

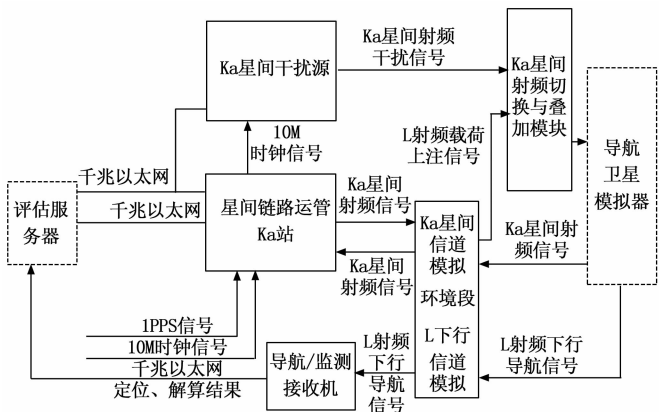


图 7 星间链路对抗试验系统连接示意图

物理仿真分系统通过有线方式将 Ka 干扰源信号和经过环境段输出 Ka 站正常信号按预期的功率比合

路后接入导航卫星星间链路接收机载荷，检测星间链路接收机载荷，然后处理在 Ka 站和导航监测接收机段的监测数据，评估服务器对目标卫星及星座的压制、反制等试验干扰或抗干扰结果进行评估，并从导航接收机的角度评估对导航体系效能的评估。

### 2.5 导航信号战区遮蔽/压制、欺骗

考虑到已经规划有伴星欺骗、低轨小卫星转发欺骗、机载压制干扰、地面大功率区域干扰等手段<sup>[7]</sup>。系统进行导航信号区域遮蔽试验连接如图 8 所示。

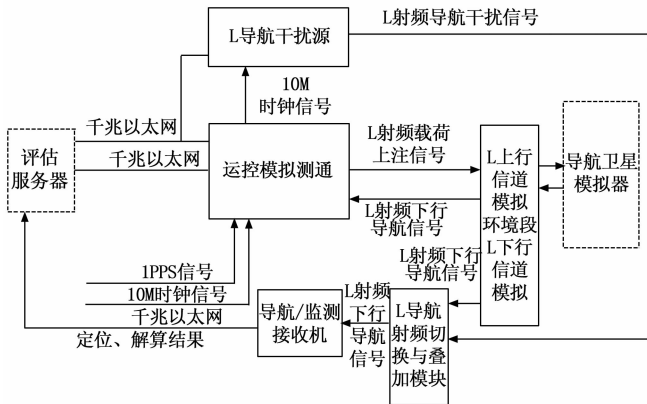


图 8 导航信号区域遮蔽试验系统连接示意图

物理仿真分系统将 L 导航干扰源的干扰信号合路于经过环境段的卫星下行导航信号上，评估服务器针对干扰的类型和强度结合导航/监测接收机的输出评估导航干扰源的遮蔽/压制效能，或者评估接收机的抗压制效能。试验可以在单干扰源与多干扰源等情况下进行。

## 3 评估体系

### 3.1 影响导航体系抗干扰性能评估的关联因素

导航战体系对抗中导航体系整网性能退化/劣化是随着星座卫星被干扰的数量和位置的变化而变化，导航战体系对抗性能评估场景涉及干扰站类型、干扰类型、数量、干扰站功率、干扰站位置、被干扰的卫星、干扰开始/持续时长等要素。导航体系对抗的星座抗干扰性能与单星抗干扰性能、星座整网星地一星间建链及处理的抗干扰性能等多种因素有关。

为对导航战体系对抗效能进行准确、全面评价，首先需要定义导航战体系对抗性能评估标体系和评估方法<sup>[8-11]</sup>。导航战体系对抗性能评估涉及多种干扰场景、多条星一地 and 星间链路（对应多颗卫星）、较长时间（星一地、星间网络拓扑随时间变化）<sup>[12-13]</sup>；

导航战体系对抗性能的准确评估需要遍历干扰场景、链路、运行时间 3 个维度<sup>[14-16]</sup>。为了导航战体系对抗性能评估完备性要求, 必须采用合适的方法实现对上述 3 个维度的完备建模和遍历性覆盖<sup>[17-18]</sup>。可以采用由从单链路到整网的次序和分系统单独对抗到全系统对抗, 依次实现运行时间、链路、干扰场景 3 个维度的遍历。

### 3.2 导航星座业务性能评价方法

#### 3.2.1 导航星座业务完整性评估

导航星座业务完整性评估在不同场景下是否能够支持所有业务类型信息完整性运行, 例如在正常业务场景下至少涵盖: 导航星座业务规划上注业务、导航星座业务数据回传业务。

#### 3.2.2 导航星座业务完成度评估

导航星座业务完成度主要是通过业务数据的完整性来进行统计评估, 例如:

1) 导航星座数据业务, 可利用回传业务成功率来评估:

$$\eta_{S\_data} = \frac{\sum_{i=1}^{Snum} \sum_{t=1}^T s_d(i, t)}{\sum_{i=1}^{Snum} \sum_{t=1}^T S_D(i, t)} \quad (1)$$

其中:  $S_{num}$  为测/运控及终端等地面接收节点数量,  $T$  为系统运行时间,  $s_d$  为运行时间  $T$  内接收节点实际收到的回传信息量,  $S_D$  为运行时间  $T$  内接收节点理论应该收到的回传信息量。

2) 导航星座业务规划上注业务, 可利用运控上注业务成功率来评估:

$$\eta_{L\_data} = \frac{\sum_{i=1}^{Lnum} \sum_{t=1}^T l_d(i, t)}{\sum_{i=1}^{Lnum} \sum_{t=1}^T L_D(i, t)} \quad (2)$$

其中:  $L_{num}$  为从星上注业务节点数量,  $T$  为系统运行时间,  $l_d$  为运行时间  $T$  内从星节点实际收到的运控上注信息量,  $L_D$  为运行时间  $T$  内从星节点理论应该收到的运控上注信息量。

#### 3.2.3 导航星座业务 QoS 满足性评估

导航星座业务 QoS 满足性评估主要是评估业务数据传输平均时延和业务数据传输丢包率是否满足业务服务需求。

业务数据传输时延: 自业务数据产生至数据成功被目的用户接收所耗时间, 为保证评估的合理性, 取

业务数据传输平均时延作为评估指标。

业务数据传输丢包率: 目的用户接收到源用户产生的业务数据量与源用户产生的业务数据总量之间的比值, 即为业务数据传输丢包率。

#### 3.2.4 故障模式下导航星座业务稳健性

故障模式下导航星座业务稳健性评估主要是评估故障模式下各类业务是否能够正常进行, 主要评估指标有故障容忍时间、性能下降率。

故障容忍时间定义为从故障开始时刻到导航业务服务性能不能满足最低要求时所经历的时间。

$$\Delta T(i, j) = T_{final}(i, j) - T_0(j) \quad (3)$$

其中:  $\Delta T(i, j)$  为业务类型  $i$  对故障  $j$  的容忍时间,  $T_{final}(i, j)$  为业务  $i$  在故障  $j$  下服务性能下降到最低要求的时刻,  $T_0(j)$  为故障开始发生时刻。

性能下降率定义为发生故障后业务服务性能趋于稳定时的性能相对于无故障发生时业务服务性能的差异变化。

$$\Delta \eta(i, j) = 1 - \frac{\gamma_{final}(i, j)}{\gamma_{normal}(i)} \quad (4)$$

其中:  $\Delta \eta(i, j)$  为业务类型  $i$  在故障模式  $j$  下的性能下降率,  $\gamma_{final}(i, j)$  为业务  $i$  在故障  $j$  下趋于稳定时服务性能,  $\gamma_{normal}(i)$  为业务  $i$  无故障时的性能。

### 3.3 评估指标体系

从不同的视角出发, 导航战体系对抗性能描述也不同。本文从测控、运控/卫星载荷、星间链路、卫星导航区域遮蔽等方向考虑对抗手段、策略对单星、星座的影响, 再分别从导航信息、空间信号精度/质量、星座状态和系统服务性能进行评估<sup>[19-23]</sup>。导航战体系对抗星座性能评估映射关系如图 9 所示。

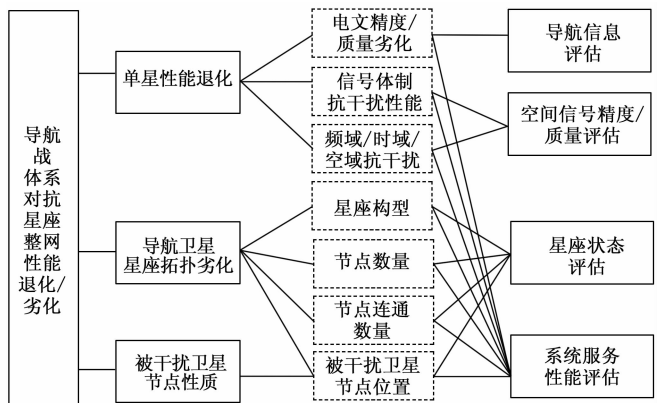


图 9 导航战体系对抗星座性能评估映射关系

四类评估按项细分的框架如图 10 所示。

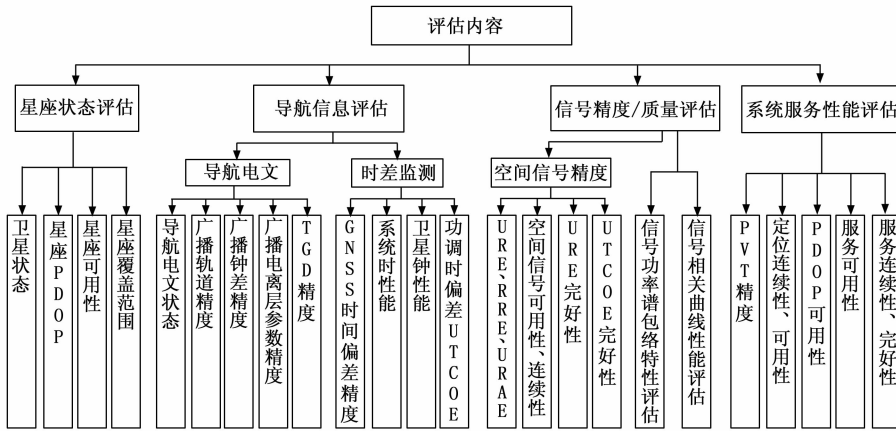


图 10 卫星导航体系对抗性能体系的详细评估项

不同分系统的对抗对导航卫星体系效能的影响是由分系统本身特性决定的，导航卫星体系在信号和信息层面的退化和劣化是系统效能退化直接原因。

### 4 结束语

本文对基于数字仿真与物理仿真结合的导航战体系化平台进行了论述，研究了基于数字仿真的试验推演评估仿真分系统和与实现物理仿真的硬件平台，分析了与体系对抗试验和性能评估相关的要素，研究了体系对抗性能评估指标体系，可以用于卫星导航系统整网抗干扰性能的定量评估，对于不同导航体系对抗性能对比具有参考意义。在对体系对抗性能进行评估时，需要针对不同任务需求，结合具体应用背景分别进行论证。

### 参考文献：

[1] 鲁 娜. 卫星通信抗干扰及其性能评估指标体系研究 [D]. 长沙：国防科技大学，2014.

[2] 王华东. 航天测控系统安全性能分析及仿真 [D]. 西安：西安电子科技大学，2007.

[3] 李献球. 导航卫星有效载荷在轨测试系统设计研究 [J]. 无线电工程，2014，44 (12)：39 - 42.

[4] 杨会军，李文魁. GPS 卫星有效载荷对抗技术研究 [J]. 航天电子对抗，2012 (1)：14 - 16.

[5] YU Y, CHANG Q, YU Z J. One new measurement and communication techniques of GNSS inter-satellite links [J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55 (1)：285 - 294.

[6] 韩其位，聂俊伟，刘文祥，等. Ka 频段星间链路干扰强度及可行性分析 [J]. 中南大学学报，2014，45 (3)：

769 - 772.

[7] 白 燕. GNSS 空间信号干扰评估及抑制方法研究 [D]. 北京：中国科学院大学，2014.

[8] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究 [D]. 郑州：解放军信息工程大学，2012.

[9] Department of Defense, Department of Homeland Security, and Department of Transportation. 2010 FEDERAL ADIONAVIGATION PLAN [R]. USA, Springfield, Virginia, 2010.

[10] Department of Transportation. Global positioning system (GPS) civil monitoring performance specification [R]. El Segundo, CA, 2019.

[11] DAVID COMBY, RICK FARNWORTH, Christophe. EGNOS vertical protection level assessment [C] // In: The Proceedings of ION GPS/GNSS 2013. Portland, OR, 2013.

[12] GSSF Team. GALILEO system simulation facility - algorithms and models [R]. VEGA IT GmbH, Darmstadt, Germany, 2007.

[13] SALGADO G, ABBONDANZA S, BLONDEL R, et al. Constellation availability concept for galileo [C] // In: Proceedings of ION NTM 2011. Long Beach, CA, 2011：778 - 786.

[14] SARDON E, MORA E, HERNANDEZ C, et al. Galileo integrity processing facility: Preliminary Design [C] // In: Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. 2016：531 - 539.

[15] European Space Agency. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document (Issue 1) [Z]. Europe, 2010.

[16] European Space Agency. GALILEO Open Service Signal in Space Interface Control Document (GAL OS SIS ICD (draft)) [Z]. Europe, 2008.

[17] SARDON E, MORA E, HERNANDEZ C, et al. Galileo integrity processing facility: preliminary design [C] // In: Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. 2006：531 - 539.

[18] FELIX K, CARSTEN S. Combined integrity of GPS and Galileo [J]. InsideGNSS, 2010, 01/02：52 - 55.

(下转第 281 页)