复杂星间链路网络规划评估方法

王琦^{1*}, 顾亚楠², 汪勃¹

1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

*联系人, E-mail: softfiona@163.com

收稿日期: 2020-06-21; 接受日期: 2020-08-05; 网络出版日期: 2020-12-14

摘要 为确保以导航星座星间链路为代表的复杂星间链路的运行服务效果, 在使用网络建链拓扑、路由规划参数前, 应对其正确性和有效性进行评估确认. 本文提出了对复杂星间链路网络规划进行参数正确性快速评估和业务服务性能评估的分级评估方法. 第一级评估实现网络规划结果正确性的快速判断, 涵盖了场景要素符合性、节点特性符合性、测量业务约束满足性、数传性能满足性等多维度综合化快速验证评估. 第二级实现网络规划结果有效性的进一步确认, 构建由星间网络行为模型和数据接入模型组成的星间链路网络仿真系统, 基于星间数据传输和处理的加速仿真, 统计建链数量和数据包传输性能并与业务服务指标比对, 完成业务服务性能仿真评估. 经对导航星座星间链路典型业务场景的两级评估结果的比对, 验证了分级评估方法的有效性.

关键词 星间链路, 网络规划, 评估, 正确性验证, 服务性能仿真

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

1 引言

导航星座星间链路是在全球导航系统卫星之间建立的具有精密测量和通信功能的网络系统, 是支持全球导航系统精密定轨与时间同步、自主导航、境外卫星导航电文上注和状态监视等核心功能的重要手段, 具备星间精密测量及较低速率、中等实时性双向数传服务功能^[1]. 采用时分多址轮询建链体制的导航星座星间链路, 每颗卫星按时隙与其他卫星分时联通, 全星座任意可视卫星之间通过分时建立多点对多点的多条链路, 完成端到端数据传输. 导航星座星间链路的网络拓扑、路由规划, 将决定星间链路的运行服务效果.

国内研究星间链路网络规划具体算法较多, 但缺少对星间链路网络规划评估方法的研究^[2-10]. 地面通过一定的网络规划算法计算生成星间链路全网拓扑、路由规划参数后, 亟需对复杂网络规划参数表达结果的正确性进行快速分析验证, 同时还需进一步确认网络规划参数对各类用户业务的支持效果, 从而确保地面网络规划管理功能的有效执行.

本文提出了复杂星间链路网络规划分级评估的方案; 研究提出了对复杂星间链路网络规划参数进行场景要素、节点核心特性以及测量、数传服务关键要求等符合性分析的第一级快速评估方法; 研究提出了基于星间链路网络仿真系统和业务服务指标体系, 实现

引用格式: 王琦, 顾亚楠, 汪勃. 复杂星间链路网络规划评估方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 019515

Wang Q, Gu Y N, Wang B. Evaluation method of complex inter-satellite link network planning (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 019515, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0231

复杂星间链路网络规划参数的第二级业务服务性能精细评估方法.

2 星间链路网络规划及评估设计

2.1 星间链路网络规划及评估功能架构

星间链路网络规划旨在为复杂星间链路网络提供有效的网络规划, 支撑网络实现多类测量、数传用户的多种服务要求. 网络规划评估是确保网络规划功能有效实现的基本途径.

按照分层规划和分级评估的思想, 设计将导航星间链路网络规划功能分解为拓扑算法、路由算法、数据接入算法三层计算和参数正确性快速评估、业务服务性能评估两级评估. 参数正确性快速评估解决网络规划结果正确性的快速判断评估, 是对规划结果正确性的基本判断; 业务服务性能评估按照网络行为模型, 构建网络仿真运行系统, 基于用户业务模型的加载, 对网络运行效果进行加速仿真验证, 是对规划结果有效

性的进一步确认.

2.2 星间链路网络规划及评估功能实现

导航星间链路网络规划功能具体由星间链路管控中心计算机系统的网络配置管控单元、软件库单元协同实现星间链路网络规划功能. 各个网络规划算法软件和评估软件分别作为独立开发的程序模块, 以动态链接库的形式封装, 以软件库的形式集成存在, 供上层网络配置管控单元统一调用和管理.

导航星间链路网络规划流程如图1所示.

步骤一: 基于星间链路管控中心计算机系统的其他功能单元输入的用户需求、服务模式场景等信息, 网络配置管控单元生成运行场景状态信息.

步骤二: 网络配置管控单元向软件库单元提供运行场景状态信息, 选择调用运行软件库单元中的某组拓扑、路由、数据接入网络规划算法软件, 分别计算相应的网络规划参数, 并输出给网络配置管控单元.

步骤三: 网络配置管控单元选定评估方式, 参数正

图1 星间链路网络规划相关功能模块接口流程关系

Figure 1 Module flow and relationship between interfaces of inter-satellite link network planning function modules.

确性快速评估、业务服务性能评估可选择其一或者依次使用, 基于输入的运行场景状态信息和网络规划参数, 调用运行软件库单元中的网络规划评估软件, 并向网络配置管控单元输出测评结果.

步骤四: 若网络规划结果通过测评, 网络配置管控单元向中心计算机系统的其他功能单元输出规划结果; 若未通过评估, 继续调用软件库单元中的其他星间链路网络规划算法软件从步骤二起重复以上步骤直至通过测评并对外输出.

在网络规划算法软件族使用策略制定阶段, 针对特定的使用需求、服务模式及场景, 依次调用各组拓扑、路由、数据接入网络规划算法软件, 重点通过业务服务性能评估软件对各组规划结果进行量化评估并优选, 形成算法软件使用策略建议. 在星间链路网络规划任务实施阶段, 对于初次出现的星间链路运行服务要求和条件, 优先按算法软件使用策略建议调用生成网络规划参数, 兼顾效率和效果, 两级评估软件结合使用; 对于再次出现的星间链路运行服务要求和条件, 按已用的算法软件使用策略调用生成网络规划参数, 视网络规划的时效性要求, 可重点使用参数正确性快速评估软件对规划结果进行确认.

星间链路网络规划算法的研究单位较多, 本文不做赘述^[2-10]. 以下主要阐述星间链路网络规划两级评估的实现方法, 可为网络规划算法提供验证手段, 并为网络规划算法软件调用策略的制定提供依据.

3 网络规划正确性快速评估方法

导航星座星间链路网络规划正确性快速评估, 通过场景要素符合性、节点特性符合性、测量业务约束满足性、数传性能满足性等多维度综合评估, 对提前制定的一个运行周期的网络规划参数, 10 min 内输出参数正确性评估结果, 进而为网络规划功能的正确高效执行提供了解决方案.

3.1 评估方法

利用星间链路管控中心计算机系统上的网络规划参数正确性快速评估软件, 与网络配置管控单元、网络规划算法软件协同运行, 分别在导航系统常规运行场景、典型故障场景等场景下, 对导航星间链路的网络规划参数完成涵盖场景要素符合性、节点特性符合

性、测量业务约束满足性、数据传输业务性能满足性的自动化综合评估.

(1) 场景要素符合性评估方法

通过对网络规划参数表达的网络节点数量和运行时间进行测算, 并与运行场景状态信息进行比对, 按判定准则主要评估规划时长、参数组数、卫星节点数量、地面站节点数量、外部用户节点数量等基本要素参数的正确性.

(2) 节点特性符合性评估方法

通过采用与运行场景状态信息、各类节点先验特性信息等比对的方法, 对网络规划参数表达的各网络节点拓扑核心信息的正确性进行判断. 按判定准则具体主要评估伪码状态、信息速率、链路收发状态等信息的正确性.

(3) 测量业务约束满足性评估方法

通过对各网络节点拓扑参数中通信时隙目标节点等信息进行测算、统计, 判断网络拓扑规划能否满足全网卫星精密定轨与自主导航、境外卫星时间同步、外部用户的测量业务约束要求.

(4) 数据传输业务性能约束满足性评估方法

提取各网络节点拓扑参数中通信时隙目标节点、路由参数中通信时隙路由传输控制类信息等, 通过网络路由由洪泛, 对全网节点计算并统计任意时隙、任意两个节点间端到端的联通性、信息传输时延、信息传输跳数等性能, 判断以上结果能否满足数据传输业务性能约束要求. 其中, 端到端连通性, 遍历统计一个运行周期内各规划时间段内各节点对之间的有效传输路径数量; 端到端传输时延和端到端传输跳数, 遍历计算全网数据自源节点产生至被目的节点接收所耗时间和所经过的中转节点数, 以各节点对之间一个运行周期内最大、平均传输时延及传输跳数作为评估指标.

3.2 评估运行效率分析

网络规划正确性快速评估工作过程主要是对拓扑、路由参数进行分析计算, 软件运行时间主要包括数据读取I/O操作、路由洪泛遍历路径计算和统计分析. 以下对正确性快速评估软件运行效率进行简要分析.

(1) 数据读取I/O操作时间

以服务器7200转速的硬盘为例, 数据读取能力为 200 MB/s. 预估一个运行周期每个规划时段的网络规

划参数量不超过150 kB, 理论数据读取时间为0.75 ms. 服务器数据读取遵循时间分片机制, 每次轮询需要15 ms. 因此, 一个规划时段参数的数据读取I/O操作耗时记为15.75 ms.

(2) 路由洪泛遍历路径计算时间

对每个规划时段的拓扑、路由参数按照多叉树的形式进行洪泛. 由于最小单位规划时段1 min包含20个时隙单元, 多叉树高度最大值为20. 以服务器CPU主频2.5 GHz为例, 处理1次路由洪泛遍历路径计算需要1500 ms.

(3) 统计计算

每个规划时段的数据统计计算耗时按100 ms计入.

(4) 全周期耗时

以30 min作为规划时段为例, 全周期1星期共计336个规划时段. 软件运行总耗时为

$$336 \times (15.75 + 1500 + 100) = 542892 \text{ ms.} \quad (1)$$

因此, 导航星座星间链路网络规划参数正确性快速评估过程总耗时可控制在10 min以内.

4 网络规划业务服务性能评估方法

导航星座星间链路网络规划业务服务性能评估, 基于星间链路网络行为模型、用户数据接入模型构建加速运行的星间链路网络仿真系统, 通过加速仿真、

性能计算和指标比对, 在较短时间内实现用户服务支持有效性的预先评估, 进而为网络规划功能的有效执行提供了解决方案.

4.1 评估方法

利用星间链路管控中心计算机系统上的网络规划业务服务性能评估软件, 与网络配置管控单元、网络规划算法软件协同完成网络规划业务服务性能仿真评估. 业务服务性能评估软件基于网络规划算法软件生成的网络规划参数驱动以及业务发生模型产生的业务数据接入, 在由运行场景、网络架构、节点数据和网络协议模型综合形成的网络行为模型中, 进行完整周期内数据传输和处理的加速仿真, 通过计算并统计节点建链测量数量和数据包网络传输性能, 根据业务服务评估模型比对业务服务指标, 完成基于网络拓扑、路由规划业务服务性能仿真的自动化评估(图2).

4.1.1 网络行为模型

网络行为模型基于运行场景、网络架构、节点数据、网络协议模型, 综合形成空间节点的行为组织架构, 是模拟导航星座星间链路网络建链测量和数据处理行为的整体模型.

(1) 运行场景模型

星间链路运行场景可划分为常规业务场景、应急业务场景、系统外用户服务场景、自主运行场景、入网测试场景、联调试用场景、故障处置场景等. 运行

图2 星间链路网络规划业务服务性能评估方法

Figure 2 Business service performance evaluation method of inter-satellite link network planning.

场景模型要素通过网络服务对象、网络拓扑路由规划规则、服务要求强制性等表达.

以常规业务场景为例, 运行场景模型要素表达方法如表1所示.

(2) 网络架构模型

网络架构模型由组成网络的卫星节点、地面站节点和外系统用户三类节点构成, 卫星节点包含GEO, IGSO, MEO三类, 地面站节点为与卫星星间链路信号体制和工作模式一致的星间链路地面站, 外系统用户主要包含弹道类和轨道类的运载器、卫星、深空探测器等用户. 网络架构模型通过节点要素表达, 具体包括航天器编号、特性、轨道/位置参数、天线覆盖范围等.

(3) 节点数据模型

节点数据模型描述卫星、地面站等节点对数据接收、缓存、发送的行为, 模型通过数据存储、处理类参数要素表达. 其中, 存储类参数包含发送数据缓存

量、接收数据缓存量、星间数据缓存量等, 处理类参数包含数据接入处理速率、星间通信速率等.

按数据处理行为, 节点数据模型包含节点发送数据模型、节点转发数据模型及节点接收数据模型三种. 定义数据送至星间链路发送节点并发送的数据处理模型为节点发送数据模型, 数据到达星间链路接收节点并接收的数据处理模型为节点接收数据模型, 其他数据在中间节点转发的数据处理模型为节点转发数据模型.

节点发送数据模型具体描述由该节点其他处理单元产生的数据或由其他类型链路送至节点的数据, 在该节点进行数据分类缓存, 再按约定速率进入星间数据缓存区并按目的节点、数据类型两级分类缓存, 基于星间网络协议模型, 按网络规划的拓扑和路由参数进行数据发送的行为过程. 以卫星节点为例, 节点发送数据模型如图3所示.

节点接收数据模型具体描述基于星间网络协议模

表 1 常规业务场景模型要素表示方法

Table 1 Model element representation of general business scenarios

运行场景	网络服务对象	拓扑路由规划规则要素	服务强制性要素
常规业务场景	卫星系统	自主导航	强制服务
		精密定轨	强制服务
		时间同步	强制服务
	地面各系统	遥控指令上注	强制服务
		业务数据上注	强制服务
		星间遥测	强制服务
		位置报告入站	强制服务
		位置报告出站	强制服务

图 3 卫星节点数据发送模型

Figure 3 Data transmission model of the satellite node.

型, 按网络规划的拓扑和路由参数到达目的节点的星间数据, 由星间数据缓存区按约定速率进入节点接收数据缓存区, 通过其他类型链路或向节点其他处理单元输出数据的行为过程. 以卫星节点为例, 节点接收数据模型如图4所示.

节点转发数据模型具体描述经星间链路到达的送往其他目的节点的数据, 进入该转发节点星间数据缓存区并按目的节点、数据类型两级分类缓存, 基于星间网络协议模型, 按网络规划的拓扑和路由参数进行转发的行为过程. 以卫星节点为例, 节点转发数据模型如图5所示.

此外, 在地面站节点的数据处理模型中, 节点的数据存储、星间数据存储空间可视为不受限, 与地面数据处理中心间的通信容量可视为足够大.

(4) 网络协议模型

网络协议模型描述网络节点执行网络协议的行为, 模型要素包含业务数据类型、传输优先级、最大路由跳数、数据可靠服务、链路通信速率等. 具体按照网络协议相关使用约定执行.

4.1.2 业务发生模型

业务发生模型描述各类用户数据的接入规则, 包

含卫星自主导航、卫星星间遥测、业务数据上注、遥控指令上注、位置报告入站、位置报告出站、外系统支持用户数据等, 通过数据发生属性、数据接入速率/数据接入量、接入时刻等要素描述. 例如, 卫星自主导航业务数据具备周期性产生、接入量和接入时刻固定的特点; 卫星星间遥测业务数据具备周期性产生、接入速率和接入时刻固定的特点. 这是两种较为典型的业务发生模型, 具体表示方法如表2所示.

4.1.3 评估指标体系

评估指标体系按照星间链路对用户的业务服务要求进行定义, 包含测量和数传两个方面. 测量要求主要通过建链周期、建链数量、建链时段、时间比中继路径数量(联通地面时间同步上注站和目标卫星的路径数量)、伪距测量几何分布(PDOP)等要素表达, 数据传输要求主要通过数据接入量、数据传输时延、数据传输丢包率、数据传输跳数、节点数据缓存占用率、节点星间数据缓存占用率等要素表达. 评估指标体系建立的核心是将用户使用层要求转化为符合评估指标体系的表达. 以自主导航为例, 用户层要求每个计算周期内卫星最小星间链路建链对象数量超过一定数值, 转化为评估指标则用建链周期、建链数量数进行表

图 4 卫星节点数据接收模型

Figure 4 Data reception model of the satellite node.

表 2 典型业务发生模型表示方法

Table 2 Representation of typical business generation models

业务数据类型	发生属性	接入速率/接入量	接入时刻
自主导航	发生周期5 min	前2 min由建链卫星交换2星间帧/星; 后2 min建链卫星交换1星间帧/星	第2 min第1时段接入2星间帧, 第4 min第1时段接入1星间帧
星间遥测	发生周期1 s	6星间帧/时段	按发生时段接入

图 5 卫星节点数据转发模型

Figure 5 Data forwarding model of the satellite node.

达. 再以星间遥测为例, 服务指标转化为评估指标, 具体包含6星间帧/时隙的数据接入速率、 t_{as} 的数据传输时延、低于1%业务数据传输丢包率、低于A跳的数据传输跳数、低于80%的节点数据缓存占用率以及低于50%的节点星间数据缓存占用率.

4.1.4 业务服务评估模型

在仿真运行周期内, 通过拓扑参数统计单位时段内节点间建链关系, 计算卫星-卫星建链节点数量、卫星-地面站节点数量、外系统用户-卫星建链节点数量、时间比对中继路径数量、伪距测量几何分布的均值和最值, 与测量业务指标进行比对; 通过计算统计各个业务数据包的传输路径、传输跳数、传输时延以及各网络节点的缓存数据量的均值和最值, 与数传业务指标进行比对. 基于比对结果、按照指标重要性进行分值加权, 形成各项业务评估指标满足度评分结果, 最终形成业务评估是否通过的结论以及评估分数.

4.2 评估运行效率分析

业务服务性能评估软件的主要工作过程是对网络节点建链配对和数据传输情况进行加速仿真, 同步进行测量和数传性能评估参数的分析计算和比对, 整理生成评估结果. 评估软件运行时间主要由仿真运行时间和评估结果整理生成时间组成, 评估结果整理生成时间为分钟量级, 仿真运行时间与软件网络行为模型的复杂度相关. 基于一定复杂度的模型, 在选用168:1的加速比情况下, 仿真运行时间为1 h, 此时评估运行时间基本为1 h.

5 评估效果验证

5.1 仿真场景设置

星间链路运行场景选用常规业务场景, 组成网络

的卫星节点包含GEO, IGSO, MEO三类, 共30颗卫星, 地面站节点涵盖运控、测控和星间链路运管三类地面站, 对卫星和星间链路地面站设定节点编号, 具体如表3所示.

5.2 网络拓扑路由规划计算设置

设定网络拓扑路由规划时长为1周, 规划参数组数为336组. 对每个规划时段内的网络节点可见性计算、拓扑规划、路由规划进行设置和计算.

(1) 可见性计算

根据网络节点卫星轨道参数和地面站坐标, 开展节点可见性计算, 分别得出运控、测控和星间链路地面站的卫星节点可见性以及卫星的星间可见性.

(2) 拓扑规划

选用星地链路类型II的星地数据交互方式, 开展网络节点拓扑关系计算, 得出网络30个卫星节点和6个星间链路地面站节点建链关系.

(3) 路由规划

以最短时延路由规划策略开展网络节点路由关系计算, 得出进行全部节点之间的路由规划.

5.3 网络规划正确性快速评估仿真结果

(1) 场景要素符合性及节点特性符合性评估

通过对网络规划参数表达的网络节点数量和运行时间进行测算, 并与运行场景状态信息、各类节点先验特性信息进行比对, 评估结果如表4所示.

(2) 测量业务约束满足性评估

通过对各网络节点拓扑参数中通信时隙目标节点等信息进行测算和统计, 得到全部卫星节点的星间建链卫星数量 ≥ 8 , 时间比对中继路径 ≥ 3 , 星地建链时隙数量 ≥ 6 , 具体如图6所示, 结果满足测量业务约束要求.

表 3 网络节点编号

Table 3 Number of network nodes

节点	节点数量	节点编号
MEO	24颗	1–24
IGSO	3颗	25–27
GEO	3颗	28–30
站点a	1个	31
星间链路地面站	1个	32
站点c	4个	33–36

表 4 场景要素符合性及节点特性符合性仿真评估结果

Table 4 Simulation evaluation results of scene element compliance and node feature compliance

序号	评估项目	判定准则	评估结果	参数正确性
1	规划时长	168 h	168 h	✓
2	规划时段长	1800 s	1800 s	✓
3	规划参数组数	1	1	✓
4	卫星节点数量	30	30	✓
5	星间链路地面站节点数量	6	6	✓
6	外部用户节点数量	0	0	✓
7	伪码状态	长码	长码	✓
8	链路最大通信速率	$\leq \text{Max}$ (某一设定值)	Max	✓
9	连发时隙次数	0	0	✓

(3) 数传性能约束满足性评估

提取各网络节点拓扑参数中通信时隙目标节点、路由参数中通信时隙路由传输控制类信息等, 通过网络路由洪泛对全网节点计算, 统计得到节点间端到端的联通性为全联通且联通路程 ≥ 3 条、信息传输时延 ≤ 9.2 时隙、信息传输跳数 ≤ 7 跳, 具体如图7所示, 结果满足数传性能约束要求。

5.4 网络规划业务服务性能评估

(1) 各类业务服务测量要求评估

在仿真运行周期内, 通过拓扑参数统计单位时段内节点间建链关系, 计算得到卫星-卫星建链节点数量 ≥ 8 , 时间比对中继路径数量 ≥ 3 , 卫星-地面站节点时隙数量 ≥ 6 , 伪距测量几何分布值为0.83–1.81, 具体如图8所示, 结果满足各类业务服务测量要求。

将测量业务服务性能仿真评估结果与测量业务约束满足性快速评估结果进行比对, 全部卫星节点的星间建链卫星数量、时间比对中继路径和星地建链时隙数量等评估结果表现出很好的符合性, 也说明对于测量性能评估, 网络规划正确性快速评估的结果准确有效。

(2) 各类业务服务数据传输要求评估

在网络仿真运行中, 模拟自主导航、遥控、运控、遥测、位置报告入站、位置报告出站6类星间链路业务数据包的发生、中转和传输。经统计计算, 各类业务服务数据最大传输跳数为5–7, 平均传输时延为4.5–9.3时隙, 最大传输时延为10.2–17.0时隙, 具体如

图 6 测量业务约束满足性快速评估结果

Figure 6 Rapid evaluation results of measurement service constraint satisfaction.

图 7 数据传输性能约束满足性快速评估结果

Figure 7 Rapid evaluation results of data transmission performance satisfaction.

图 8 测量业务服务性能仿真评估结果. (a) 星间建链卫星数量、时间比中对中继路径数量和星地建链时隙数量性能仿真评估结果; (b) 伪距测量测量几何分布性能仿真评估结果

Figure 8 Simulation evaluation results of measurement service. (a) Simulation evaluation results of number of inter-satellite chain satellites, number of time comparison relay paths, and number of time slots in the satellite-station chains; (b) simulation evaluation results of PDOP.

图9所示, 结果满足各类业务服务测量要求.

将数据传输业务服务性能仿真评估结果与数据传输业务约束满足性快速评估结果进行比对, 信息传输跳数和信息传输时延等评估结果表现出很好的符合性, 也说明对于数据传输性能, 网络规划正确性快速评估结果准确有效.

在网络仿真运行中, 在自主导航、遥控、运控、遥测、位置报告入站、位置报告出站6类星间链路业务数据包进行发生、中转和传输过程中对节点缓存占用率进行统计. 节点的发送数据缓存占用率最大值为75%, 节点接收缓存占用率最大值为55%, 节点星间中转数据缓存占用率最大值为22%, 具体结果如图10所示, 符合低于80%的节点数据缓存占用率以及低于50%的节点星间数据缓存占用率要求.

图 9 数据传输业务服务性能仿真评估结果

Figure 9 Simulation evaluation results of data transmission service.

图 10 业务数据缓存占用情况仿真评估结果

Figure 10 Simulation evaluation results of business data cache occupies.

5.5 星间链路网络规划评分

基于比对结果、按照指标重要性采用分值加权的方法, 形成各项业务评估指标满足度评分结果, 给出业务评估是否通过的结论以及量化评估结果. 分值加权的具体方法可根据实际使用阶段和经验进行调整和优化. 本文提供一种网络规划任务实施阶段供参考的方案: 采用百分制, 网络规划正确性占31分, 业务服务性能占69分. 其中, 网络规划正确性的场景要素符合性及节点特性符合性指标作为否决项, 这两类全部指标均满足得到31分, 任一项不满足总分即为0分; 业务服务性能按照不同指标的权重分配分数, 低于指标时可出现负值评分. 各项分数之和作为最终评分结果, 达到60分为评估通过规划有效. 本次星间链路网络规划指标满足度评分结果为70.81, 计算过程如表5所示. 采用评分方式不仅能判断规划的有效性, 还易于对不同网络规划结果进行效能比较.

表 5 网络规划指标满足度量化评分

Table 5 Quantitative score of network planning index satisfaction

项目	指标项	权重分数	结果	评分
场景要素符合性	规划总时长 规划参数组数 卫星节点数量 星间链路地面站节点数量 外部用户节点数量	否决项, 全部满足31, 一项不满足则 总分为0	√	31
节点特性符合性	伪码状态 链路最大通信速率 连发时隙次数 端到端连通性		√	
自主导航服务	星间建链卫星数量	2	8	0.67
	PDOP	2	1.81	-0.41
	丢包率	2	0	2.00
	传输跳数	2	6	1.20
	节点缓存占用率	2	14/40	1.13
	最大时延	2	35.0	1.42
精密定轨服务	星间建链卫星数量	3	8	1.00
	PDOP	3	1.81	1.19
时间同步服务	时间比对中继路径	3	3	1.50
遥控指令上注服务	丢包率	3	0	3.00
	传输跳数	3	6	1.80
	节点缓存占用率	3	33/60	0.94
	平均时延	3	15.9	1.41
业务数据上注服务	丢包率	3	0	3.00
	传输跳数	3	6	1.80
	节点缓存占用率	3	28/60	1.25
	平均时延	3	20.3	0.97
星间遥测服务	丢包率	2	0	2.00
	传输跳数	2	5	1.33
	节点缓存占用率	2	45/300	1.63
	平均时延	2	26.6	0.23
位置报告入站服务	丢包率	2	0	2.00
	传输跳数	2	7	1.07
	节点缓存占用率	2	23/120	1.99
	平均时延	2	25.1	0.33
位置报告出站服务	丢包率	2	0	2.00
	传输跳数	2	5	1.33
	节点缓存占用率	2	45/300	1.63
	平均时延	2	26.6	0.40
合计		100	-	70.81

6 结论

为开展复杂星间链路网络拓扑、路由规划参数正确性和有效性评估, 本文提出了一种将网络规划算法和评估软件统一封装和调用的网络规划参数评估架构. 将整个评估工作分为网络规划参数正确性快速评估和业务服务性能评估两级. 第一级评估面向复杂网络规划参数表达结果的正确性, 通过提取拓扑和路由

规划参数开展计算, 快速实现分析验证. 第二级评估构建了基于星间链路网络行为模型和数据接入模型的星间链路网络仿真系统, 系统模拟各类业务数据包传输和处理行为进行加速仿真, 进一步确认网络规划参数对各类用户业务的支持效果. 经对比验证, 两级评估的输出结果具有很好的一致性, 说明两级网络规划参数评估方法有效, 可作为网络规划管理功能正确高效执行的评估解决方案.

参考文献

- 1 Li L L, Geng G T, Li Z H. Study of the development of the inter-satellite links in foreign GNSS (in Chinese). *J Geomatics Sci Tech*, 2016, 33: 133–137 [李龙龙, 耿国桐, 李作虎. 国外卫星导航系统星间链路发展研究. *测绘科学技术学报*, 2016, 33: 133–137]
- 2 Yang D, Yang J, Xu P. Timeslot scheduling of inter-satellite links based on a system of a narrow beam with time division. *GPS Solut*, 2016, 21: 999–1011
- 3 Huang J, Liu W, Su Y, et al. Cascade optimization design of inter-satellite link enhanced with adaptability in future GNSS satellite networks. *GPS Solut*, 2018, 22: 44
- 4 Sun L, Wang Y, Huang W, et al. Inter-satellite communication and ranging link assignment for navigation satellite systems. *GPS Solut*, 2018, 22: 38
- 5 Huang J, Su Y, Liu W, et al. Optimization design of inter-satellite link (ISL) assignment parameters in GNSS based on genetic algorithm. *Adv Space Res*, 2017, 60: 2574–2580
- 6 Yan Z, Fraire J A, Zhao K, et al. Distributed contact plan design for GNSSs. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2020, 56: 660–672
- 7 Jia W S, Wang Q, Li L M, et al. Optimization of contact design plan of time-division navigation satellite network based on load balancing (in Chinese). *Space Eng*, 2019, 28: 52–58 [贾卫松, 王琦, 李露铭, 等. 基于负载均衡的导航时分网络建链优化技术研究. *航天器工程*, 2019, 28: 52–58]
- 8 Yan H C, Zhang Q J, Sun Y. A novel routing algorithm for navigation satellite network based on partial queues (in Chinese). *J Astronaut*, 2015, 36: 1444–1452 [燕洪成, 张庆军, 孙勇. 基于局部队列的导航卫星网络路由算法. *宇航学报*, 2015, 36: 1444–1452]
- 9 Yan H C, Zhang Q J, Sun Y, et al. Contact plan design for navigation satellite network based on simulated annealing. In: *Proceedings of 2015 IEEE international conference on communication software and networks*. New York: IEEE, 2015. 12–16
- 10 Hou Z W, Yi X Q, Zhao Y, et al. Contact plan design for navigation satellite network based on maximum matching. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Vision, Image and Signal Processing-ICVISIP 2018*. New York: IEEE, 2018. 1–6

Evaluation method of complex inter-satellite link network planning

WANG Qi^{1*}, GU YaNan² & WANG Bo¹

¹ *Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;*

² *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China*

The validity of the network topology and routing planning parameters must be evaluated and confirmed before use to realize the service performance of a complex inter-satellite link network represented by the global navigation satellite system. In this study, an evaluation is designed and divided into two phases: the rapid evaluation of validity and the evaluation of the business service performance. In the first phase, a rapid evaluation method is defined for evaluating the validity of the multi-dimensional integrated network planning parameters, including scene element compliance, node feature compliance, measurement service constraint satisfaction, and data transmission performance satisfaction. In the second phase, an implementation method is proposed for evaluating the business service performance. Specifically, an inter-satellite link network simulation system comprising a network behavior model and a data access model is used to achieve accelerated simulation of the inter-satellite data transmission performance, which calculates the number of chain constructions and the packet transmission performance, and compares them with the business service indicators. Furthermore, the validity of the evaluation method is verified by comparing the evaluation results of the two phases for the same typical scenario.

inter-satellite link, network planning, evaluation, correctness verification, service performance simulation

PACS: 95.10.Eg, 06.30.Ft, 91.10.Fc, 96.25.Vt

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0231](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0231)