

基于地面集成模拟验证系统的卫星通信测试验证方法

孙晓南¹, 周世东², 康绍莉¹

(1. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;

2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 卫星通信传统上直接依赖星地联试系统进行其有效性验证, 导致成本、时间代价均较大。首先, 提出基于地面集成模拟验证系统(简称“小系统”)的卫星通信创新测试验证方法, 并以5G非地面网络(NTN)体制为例建立测试验证环境、设计测试验证方案以及开展测试验证。其次, 论证卫星通信测试验证中“小系统”从无到有的价值, 不仅对系统设计的正确性起到先行验证的作用, 从而降低星地联试风险, 而且相对于传统测试验证方法明显提升了验证效率。

关键词: 卫星通信; 地面集成模拟验证系统; 小系统; 5G NTN

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2025001

Satellite Communication Testing Method Based on Ground Integrated Monitoring Verification System

SUN Xiaonan¹, ZHOU Shidong², KANG Shaoli¹

1. C-ICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: Traditionally satellite communications have relied directly on the full system construction with satellite and ground elements (called "large-scale system") for verification of their effectiveness, resulting in high cost and long time period. Firstly this paper proposed an innovative test verification method for satellite communications based on the ground integrated monitoring verification system (called "small-scale system"). Took 5G NTN system as an example, it established related test environment, designed verification solutions, and conducted a series of key test examples. Secondly, the value of "small-scale system" introduced in the process of satellite communication test was demonstrated to be very useful, which not only acts as a pre-verification of the correctness of system design and thus reduced the risk of large-scale system test, but also significantly improved the verification efficiency compared to traditional test verification methods.

Keywords: satellite communication, ground integrated monitoring testing system, small-scale system, 5G NTN

0 引言

卫星制造和发射成本的降低, 再次掀起了卫星通信的发展热潮。从星座来看, 越来越多的低轨巨型星座正在建设或者论证; 从卫星来看, 传统的透明转发模式不断向星上处理和星间链路模式发展, 系统能力越来越强, 也带来了一定复杂度的提升。对于复杂的卫星通信系统, 如何在卫星发射之前对设备的软硬件以及系统的有效性进行充分、准确、全面的验证, 成为了业界关注的话题。

卫星通信系统的有效性验证, 传统上直接依赖星地集成联试系统(简称“大系统”)和在轨验证系统。因卫星载荷采用专用航天器件来开发, 一方面价格昂贵, 另一方面对测试环境的洁净度和防静电措施具有较高要求。此外, 飞行件数量稀少, 测试环境稀缺, 导致测试内容和测试效率方面都比较受限。当卫星载荷的软件规模较小、处理逻辑较少时, 通过代码审查、充分的单元测试以及提供较少的单机测试环境, 基本可以保证软件质量。然而, 随着卫星载荷功能的不断增强, 对于规模

上百万行的巨型且逻辑复杂的软件,很难通过代码审查、单元测试和较少的单机测试来满足交付质量要求,而且难以验证协议体制和系统设计的正确性。因此,直接通过星地联试及在轨测试来进行卫星及其系统的验证,对于测试的成本、时间和遍历性等方面都存在很大的挑战。

针对星上处理和星间链路模式的复杂卫星通信系统,需要研究更高效的测试验证方法。借鉴地面移动通信系统的测试验证方法,本文提出适用于卫星通信的地面集成模拟验证系统(简称“小系统”)测试验证方法,并以 5G 非地面网络(NTN)体制为例,搭建测试验证环境,设计测试验证方案,开展系统功能和性能测试验证。本文的研究工作,既是对传统航天引入类 5G 复杂通信系统后需解决在轨测试效率和商用可靠性等问题的组织模式创新,也是对传统航天依赖实物集成导致测试成本高、效率低等问题的测试方法创新。

1 卫星通信的传统测试验证方法

与地面移动通信相比,卫星通信协议体制的设计、实现与验证是一项更为复杂的工程。为规避系统建设过程中颠覆性的问题,需结合协议体制设计过程中的关键环节,进行系统级模拟验证,打通端到端通信流程,验证协议的正确性以及系统的关键技术。系统验证一方面能够进行全面网络性能评估,为系统优化提供支撑;另一方面能够在系统建设中为在轨问题定位与系统演进提供参考。

卫星作为卫星通信的重要组成部分,是系统验证最关键的环节。传统上,卫星采用透明转发模式,载荷实现相对简单,其测试验证主要经历单元测试、载荷分机测试、载荷星地联试、整星出厂测试和卫星在轨测试共 5 个阶段,如图 1 所示。

其中,单元测试是卫星测试的最初阶段,针对星载软件中的最小可测试单元进行检查和验证,目的是检测软件模块单元的正确性,该阶段通常由开发人员执行。载荷分机测试是在单元测试的基础上,按照载荷独立的分机,构造每个分机的软件配置项,按照概要设计要求验证载荷分机的功能以及配置项接口是否正确。该阶

段主要验证是否达到或实现某分机的技术指标及要求。载荷星地联试是对已经验证好的各分机系统进行集成测试验证,验证整个载荷系统的正确性和性能是否满足要求。该阶段主要由测试人员执行,对产品的质量有重大的影响。整星出厂测试是在载荷星地联试通过后进行的,目的是充分运行系统,验证卫星全系统是否都能正常工作并完成设计的要求。该阶段主要确保软件准备就绪,软硬件系统满足用户需求。卫星在轨测试是部署软件的最后一个测试,验收测试的目的是确保软硬件在轨稳定运行,满足商用需求。

对于传统测试验证方法,卫星通信系统的有效性验证其实是一种直接全系统集成联试的“大系统”验证模式,存在测试效率低、测试内容受限等诸多弊端。例如,卫星的全部测试流程均依赖于航天飞行器实物进行集成和验证,但飞行件价格昂贵、实物设备数量稀少、测试环境稀缺,导致测试周期很长,通常至少需要一年时间。单元测试和载荷分机测试,对于软件规模较少的星上处理模式尚能适用,对于软件规模上百万行且逻辑复杂的星上处理模式却较难执行。尤其是在载荷星地联试阶段,因为“大系统”联试参与的网元众多,协调困难,一旦出现问题,排查和定位时间较长,将影响系统的建设过程。

2 卫星通信的创新测试验证方法

卫星技术的进步,促进了卫星通信朝着星上处理和星间链路的组网形态发展。在协议体制上,卫星通信由传统的封闭式专有体制走向与地面移动通信的融合体制,呈现出“5G 体制兼容、6G 系统融合”的星地融合技术发展路线^[1]。对于星地融合体制的卫星通信系统,其一方面基于地面移动通信体制发展而来,另一方面需支持快速同步、灵活接入、条件切换、覆盖增强等新技术以适应卫星通信链路特征,相对于传统卫星通信体制具有协议创新性强、复杂度高、实现难度大等特点,因此亟须制定更为高效合理的系统验证方法。

本文提出在载荷分机测试和载荷星地联试之间引入“小系统”联试的卫星通信创新测试验证方法,如图 2 所示。

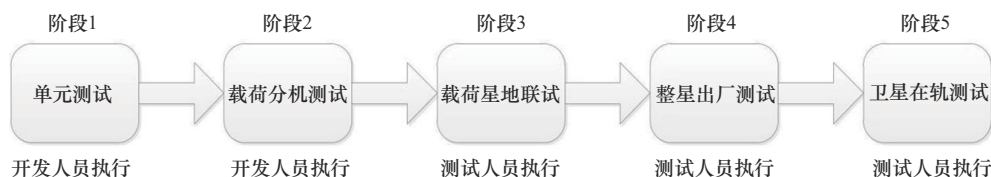


图 1 卫星通信的传统测试验证流程

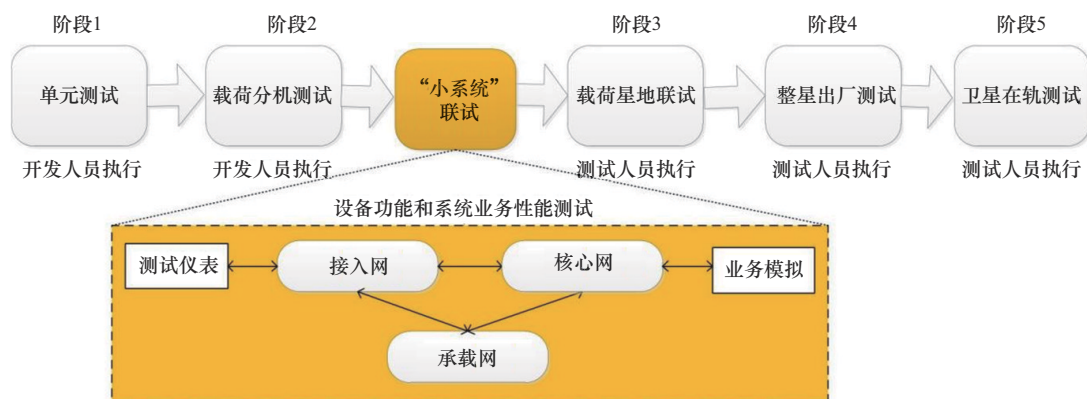


图2 卫星通信的创新测试验证流程

“小系统”包括接入网、核心网、承载网等部分，实现对空间段卫星节点、地面网络网元、用户终端等设备的验证以及全系统、全要素的验证。“小系统”作为卫星系统测试的一个重要环节，能在地面进行搭建，充分验证协议体制、设备接口和业务传输性能，并能模拟卫星信道环境，是卫星测试技术中的一个新成果。下面对“小系统”的创新性和经济效益进行具体分析。

2.1 “小系统”的创新性

“小系统”的主要作用是对卫星通信协议进行充分技术验证，确定星地融合的空中接口协议和网络协议的可行性，从传统的复杂卫星系统测试中解脱出来，针对性地对卫星通信技术进行验证。“小系统”可以利用各类模拟设备和测试仪表来进行搭建，能够对协议体制的正确性和器件能力起到先行验证的作用，扫清系统主要设备之间的协议一致性、接口互通性等联调问题，降低星地联试的风险，为卫星通信系统验证提供了迭代验证的方法。“小系统”也能够充分借鉴地面移动通信的验证经验，加速卫星通信测试验证，提高测试效率，为卫星通信系统建设及通信协议的快速演进奠定基础。

2.2 “小系统”的经济效益

传统的卫星系统验证周期长、成本高，通常需要航天器件进行系统搭建和联调。基于地面“小系统”的测试验证，并不需要昂贵的航天器件和材料，可以采用工业级的芯片器件，利用模拟设备、仪器和实物系统的组合，降低系统搭建成本。更重要的是“小系统”可以对卫星信道环境进行模拟，对网络环境和业务场景进行全功能模拟，支持在轨故障复现和定位，这样能避免在轨测试中才发现一些实际问题无法解决，以致需要重新进行问题定位和设备研发，增大设备研制成本，拖延整体进度，对整个卫星网络的建设带来不利影响。通过“小

系统”的测试验证，可以提升网络的测试效率，大大降低研制成本，缩短网络建设和部署的时间。

由于星地融合协议体制的复杂性，如果完全依赖稀少的飞行件实物进行卫星通信全流程测试验证，测试周期不可想象。通过深入分析待验证的关键技术和设备处理能力需求，针对性地搭建测试环境，可有效降低硬件成本，也降低了测试环境要求；同时可搭建较多的测试线，提供丰富的星载软件运行环境，这对于提高验证充分性、降低评估验证成本和研发周期、支撑卫星通信系统的快速建设具有重要的意义。

通过载荷功能测试和系统业务性能验证，可快速迭代软件版本，加速关键技术的可行性论证，既不必等航天飞行件的研制和产出周期，也不用受飞行件数量制约。尤其在关键技术验证环节，因为参与的网元少、问题排查快、测试环境丰富，便于并行验证，所以“小系统”的测试验证周期可缩短到3个月以内。

3 基于5G NTN的卫星通信测试验证

5G NTN是国际标准组织3GPP制定的卫星通信标准^[2]，自R17形成第1版标准后在持续开展技术增强，如图3所示。

对于5G NTN体制的卫星通信，其系统实现比传统卫星通信更为复杂。为了在卫星发射前充分验证系统的功能、性能以及接口一致性，非常有必要借鉴地面移动通信成熟的测试验证经验，采用创新的测试验证方法，以应对卫星互联网的大规模卫星星座部署和更高复杂度的软件功能需求。

3.1 验证环境构建

5G NTN卫星通信系统的地面模拟验证环境，主要由空间段、地面段、应用段以及辅助测试设备构成，如图4

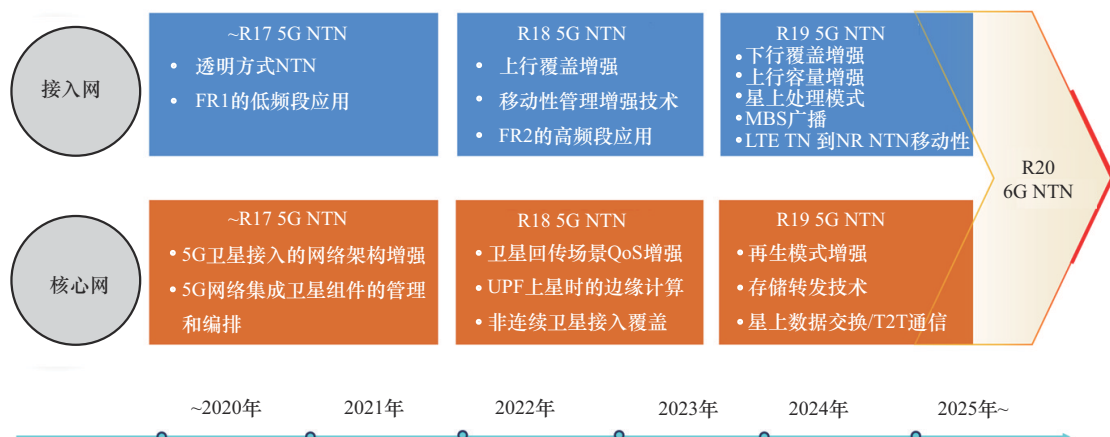


图3 5G NTN的标准版本及支持的功能

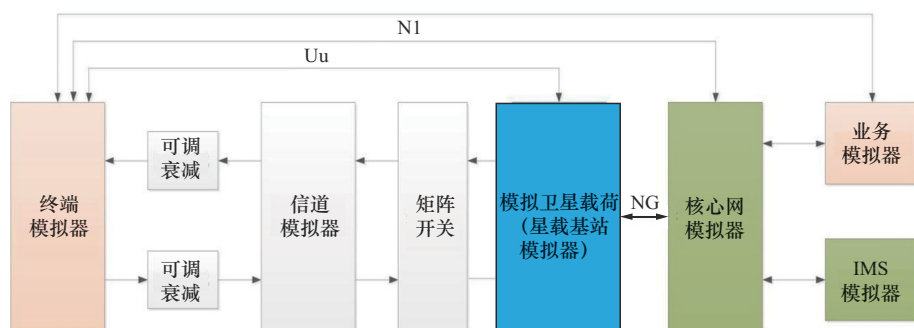


图4 5G NTN卫星通信系统的地面模拟验证环境

所示。空间段主要包括模拟卫星载荷（即星载基站模拟器），地面段主要包括核心网模拟器和IP多媒体子系统（IMS）模拟器，应用段主要包括终端模拟器和业务模拟器，辅助测试设备主要有信道模拟器等。相比传统的卫星通信系统验证，主要减少了天基承载网和地面承载网相关网元，一方面这些网元和接入网关键技术验证的相关性小，另一方面大幅简化系统组成，降低问题排查难度和多网元协调难度。

针对图4所示的地面模拟验证环境中的验证设备，下面进行其基本功能的介绍。

(1) 模拟卫星载荷

模拟卫星载荷类似于地面5G系统的基站模拟器，是软硬件一体的测试实体，承担所有与卫星接入无线系统相关的功能，比如无线资源管理、准入控制、连接建立、用户面和控制面数据路由、QoS流管理等功能。

(2) 核心网模拟器

核心网模拟器具备地面5G核心网（5GC）的基本功能，并可以针对卫星通信系统进行优化设计，针对业务需求、安全等级、用户种类实现多种灵活组网方式。

(3) 终端模拟器

终端模拟器符合5G NTN空中接口协议，可完成终端全流程功能，支持有线和无线测试。

(4) 业务模拟器

业务模拟器通过实现终端模拟器及核心网模拟器的应用服务，模拟用户业务行为，可在不同业务模型下进行网络侧功能、性能模拟验证，包括业务验证、服务连续性验证、多用户业务并行验证、端到端指标（丢包率、通信时延、时延抖动）验证等。

(5) IMS模拟器

IMS模拟器符合3GPP协议标准，连接终端模拟器、核心网模拟器和业务模拟器，实现IMS模拟器的注册、会话管理等功能，支持虚拟化部署。

(6) 信道模拟器

信道模拟器连接终端模拟器和模拟卫星载荷，主要功能是仿真实现各种空中接口信道环境，模拟产生空地时延长和多普勒频偏大等场景，为时频同步等相关测试验证项目提供支撑。

3.2 验证方案设计

基于5G NTN体制的卫星通信系统将是一个巨型复杂系统，具有网络规模大、专业领域广、迭代演化快等显著特点，其测试验证需适配卫星通信系统的特征。为保障系统建设，需在系统测试能力等方面进行发掘和提升。

相比地面移动通信系统，卫星通信系统主要有如下几个特点：

- (1) 终端和卫星的链路距离远，传输时延大；
- (2) 低轨卫星运动速度快，时频偏变化大；
- (3) 低轨卫星服务时间短，频繁切换。

针对以上3个主要特点，5G NTN测试验证需要在基本功能与接口测试的基础上，重点针对传输时延、时频偏补偿和跨星切换3个场景设计验证方案，并以3GPP的终端与基站的测试方案^[3-6]为参考。其中，“小系统”测试侧重基本功能、接口一致性以及基本业务的验证，主要目的是对新引入的5G体制和CPU处理器能力进行先行验证。

3.2.1 传输时延验证方案

和地面移动通信相比，卫星通信具有较大的传输时延，其中低轨卫星通信系统的星地传输时延一般为2~10 ms，而高轨卫星通信系统的星地传输时延通常大于100 ms。为了验证在大时延情况下的通信性能，需要使用信道模拟器和网络损伤仪进行组合，模拟卫星通信的大传输时延和高路径损耗。其中，信道模拟器用于模拟用户链路的时延，最大配置为130 ms，网络损伤仪用于模拟馈电链路的时延，二者联合构建星地链路的大时延测试环境，验证通信性能是否符合预期目标。

3.2.2 时频偏信道验证方案

低轨卫星在轨高速运动时，终端与卫星之间的相对位置、相对速度时刻在发生变化。相对位置变化会引入时偏，相对速度变化会引入多普勒频移，从而影响上下行信号时频同步，影响终端接入成功率以及业务连续性。

在“小系统”验证环境中，模拟卫星载荷和终端模拟器在物理位置上是静止的。因此，为了使模拟卫星载荷和终端模拟器之间的信道更加逼近在轨真实信道，需要设计信道模拟方案，以满足如下需求：能够模拟卫星在轨运动，并产生时偏和频移的变化；能够在地面模拟集成联试阶段验证系统对时频偏的纠偏能力。

(1) 卫星运动的模拟

在模拟卫星载荷与终端模拟器之间增加信道模拟器设备，其中信道模拟器基于输入的星历来动态计算时频偏并叠加在信道模型中，形成与在轨系统相似的链路

状态。

(2) 时间基准的统一

为模拟星地链路，信道模拟器需要配置一段星历，模拟卫星运动中产生的时偏及多普勒频移并加载到链路中，同时需要给模拟卫星载荷及终端模拟器上注同一段星历。模拟卫星载荷、终端模拟器及信道模拟器需应用统一的时间基准，以保证信道模拟器给通信信号加载正确的时频偏，便于终端模拟器能根据预补偿完成初始搜星，并能够将模拟卫星载荷播发的星历与信道模拟器加载的时频偏正确对应。

3.2.3 跨星切换验证方案

地面移动通信系统的切换主要是由终端位置移动导致的，判别依据主要是本小区和邻小区的信号强度的变化。而卫星通信系统的切换主要是由卫星运动导致的，测试判别依据主要是本小区和邻小区的距离远近的变化。在“小系统”验证环境中，由于空间较小，无法产生实际距离的位置变化。因此，需要模拟和构造卫星位置变化引起的跨星切换。跨星切换验证前置条件为上注本星星历和邻星星历，注入终端的轨迹配置文件。当终端接入卫星后根据配置文件上报位置信息，源卫星根据星历文件实时判决是否到达切换位置，发起覆盖切换请求，收到目标卫星的确认后执行切换。

(1) 终端地理位置的模拟

在终端模拟器增加地理位置配置文件，从而终端模拟器可以基于配置文件输入的地理位置动态上报经纬高信息。配置文件的经纬高信息反映了终端和卫星之间的相对运动轨迹和速度信息，便于模拟卫星载荷进行实时的处理和计算。

(2) 卫星星历模拟

为模拟星地链路，参与切换的源模拟卫星载荷和目标模拟卫星载荷需要各自上注一段星历，模拟卫星运动中随着时间变化产生不同的星历。同时，需要给两个模拟卫星载荷及终端模拟器上注同一段星历，且两个模拟卫星载荷的星历轨迹需要覆盖终端模拟器的地理位置，此外模拟卫星载荷和终端模拟器需应用统一的时间基准。

3.3 验证结果及分析

基于所搭建的如图4所示的5G NTN卫星通信系统全业务流程，以手机直连低轨卫星^[7]作为应用案例，带宽50 MHz，采用中频直连的方式进行测试，重点开展了基本功能与接口验证、时频同步能力验证、切换和服务连续性验证、业务和性能验证，并基于验证结果进行分析。

3.3.1 快速同步能力

时频同步验证是在卫星信道环境下,通过星历信息、开环和闭环时频偏纠正,判断能否实现数据的正确解调。测试包括初始时频测试、开环测试和闭环测试3种场景,测试中也模拟了卫星运动带来的时频剧烈变化。测试结果见表1,满足性能预期。

表1 时频同步测试结果

关键技术指标	测试过程	测试结果
时频偏纠正能力	业务信道的接收时频相对于发送时频存在偏差,考察接收端能否对时频偏进行补偿,并进行信号的检测	接收信噪比大于-5 dB的条件下,接收端能够正确检测信号

3.3.2 切换和服务连续性

服务连续性验证主要是验证终端在两颗卫星之间切换的可靠性和所开展的业务是否中断,这体现在网络的跨星切换过程。对于切换性能,需要进行定量分析。由于切换为硬切换,不可避免地会引入中断时延,需要通过测试获取其时延分布。

基于验证用例要求,获得的切换测试结果见表2。该结果充分说明了波束切换的流程和协议实现的正确性。

表2 切换测试结果

关键技术指标	测试过程	测试结果
控制面时延	测试终端切换的时延,从接收到切换开始的信令,到反馈切换完成的信令结束。 重复测试切换500次	时延在预期范围内
数据面时延	测试终端数据传输的中断时延。 重复测试切换500次	时延在预期范围内
切换成功率	终端执行切换,观察能否成功。 重复测试500次	100%

3.3.3 业务性能

业务性能方面的验证主要是确认终端与业务服务器之间的传输性能,包括传输协议的可靠性、设备的实际处理性能区间范围、业务的QoS指标是否满足实际需求等。结合基本业务和基本功能,需要完成系统传输时延、时延抖动、用户吞吐量、误码率等相关测试,其中时延相关测试需要考虑端到端业务面时延、控制面时延、用户感知时延等,误码率相关测试需要考虑终端传输速率、接入成功率、速率调整能力等的影响。

业务性能的测试结果见表3。该测试结果说明了终端接入网络的时延完全符合预期,数据的检测成功率达到100%,用户峰值速率可满足手持终端的高速传输需求。

表3 业务性能测试结果

关键技术指标	测试过程	测试结果
初始接入控制面时延	建模星地单向时延4 ms,测试从终端发送PRACH信号到RRC连接建立成功的时延。 重复接入测试500次	时延在40~50 ms内均匀分布
初始注册的成功率	建模终端接入注册的完整流程,测试接入的成功率。 重复接入测试500次	100%
切换成功率	终端执行切换,观察能否成功。 重复测试500次	100%
数据传输抖动时延	连续测试数据包发送1 min,统计所有数据包的端到端时延	时延抖动在0~10 ms内均匀分布
数据包传输速率	连续测试数据包发送,测试时间为30 s	下行业务最大峰值速率为51 Mbit/s; 上行业务最大峰值速率为22 Mbit/s

3.4 “小系统”测试验证方法与传统测试方法的对比

为了证明引入“小系统”测试验证方法对于星地融合卫星通信系统的重要性,以5G NTN卫星通信为例进行分析。表4给出了引入“小系统”的创新测试验证方法和传统测试验证方法的对比分析。

表4 5G NTN卫星通信系统的不同测试验证方法比较

对比项		引入“小系统”的创新测试验证方法	传统测试验证方法
测试环境	载荷设备	工业级器件	宇航级器件
	载荷价格	便宜	昂贵
	载荷数量	较多	稀少
	接入网设备	包含	包含
	核心网设备	包含	包含
	天基承载网设备	不包含	包含
	地面承载网设备	不包含	包含
测试用例	跨星切换	地面可验证	地面缺少验证方案,需在轨验证
	星地信道	地面可验证	地面缺少星历模拟方案,需在轨验证
	系统性能	地面可验证	地面缺少网络损伤方案,需在轨验证

基于测试环境、测试用例的分析可见,和传统测试验证方法相比,5G NTN地面集成模拟验证“小系统”通过增加载荷数量、减少测试网元、丰富测试验证手段、优化测试设计等测试验证方法,不必必须在轨完成5G NTN关键技术的验证,大幅提升了测试验证效率,有效降低了测试成本,缩短了产品研制周期。

4 总结和展望

随着卫星通信的快速发展, 高效准确的测试验证方法研究亟须开展, 特别是针对以5G NTN为代表的星地融合体制验证方案还未有先例, 具有较大的挑战和不确定性。本文基于对传统测试验证方法的分析, 创新性引入基于地面集成模拟验证环境的“小系统”测试验证方法, 并以5G NTN体制为例进行了验证环境构建、测试方案设计和验证结果分析。通过与传统测试验证方法进行对比, 进一步论证了在传统航天星地联试之前引入“小系统”测试验证方法的必要性和有效性。“小系统”测试验证方法充分借鉴地面移动通信的测试验证经验, 改变传统航天以飞行件集成为主的测试方案, 能够普适于卫星通信系统, 为后续的设备研制、入网测试、网络大规模部署和在轨运行奠定了良好的基础, 有利于降低网络建设成本, 缩短商用周期。面向未来的星地融合统一系统^[8-9], 作者团队将进一步探索自动化、智能化的测试验证平台, 进行大规模的星座模拟测试, 真实模拟在轨环境, 通过数字孪生技术提升卫星互联网系统的模拟验证能力。

参考文献:

- [1] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [2] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (R16): TR 38.821 V16.2.0[S]. 2023.
- [3] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network;5GS; User Equipment (UE) conformance specification;Part 2: Applicability of protocol test cases: TS 38.523-2, V17.0.0[S]. 2022.
- [4] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network;5GS; User Equipment (UE) conformance specification;Part 3: Protocol Test Suites: TS 38.523-3, v17.0.0[S]. 2022.
- [5] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network;NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone TS 38.101-1, v17.0.0[S]. 2022.
- [6] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network;NR;

Requirements for support of radio resource management: TS 38.133, v17.0.0[S]. 2022.

- [7] 孙晓南, 周世东, 侯利明, 等. 存量5G手机直连低轨卫星通信技术研究[J]. 信息通信技术, 2023, 17(5): 22-31.
SUN X N, ZHOU S D, HOU L M, et al. Research on technologies of existing 5G mobile phone direct accessing to LEO satellite communication[J]. Information and Communications Technologies, 2023, 17(5): 22-31.
- [8] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向6G的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
SUN S H, DAI C Q, XU H, et al. Survey on satellite-terrestrial integration networking towards 6G[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 891-901.
- [9] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2024, 54(5): 1177-1214.
CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2024, 54(5): 1177-1214.

[作者简介]



孙晓南 (1974-), 男, 中信科移动通信技术股份有限公司董事长, 长期从事移动通信新技术研究工作, 主要研究方向为5G、卫星通信等。



周世东 (1969-), 男, 清华大学信息技术研究院无线中心副主任、电子系教授、博士生导师, 主要研究方向为无线与移动通信系统体制与实现、扩频与码分多址技术、信道编译码技术、多天线系统与技术等。



康绍莉 (1974-), 女, 中信科移动通信技术股份有限公司系统研究高级技术专家, 长期从事地面移动通信和卫星通信的新技术研究工作, 在中国通信标准化协会担任航空通信委员会系统组副组长。