

基于地面站的星间链路全网测试技术

冯旭哲, 陈建云, 周永彬, 杨建伟, 黄文德

(国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073)

摘要: 星间链路是我国自主导航系统的重要技术支撑, 基于相控阵天线的并发空时分双工 (CSTDD, concurrent spatial time division duplexing) 组网体制为星间链路的实现提供了一种可行途径, 该体制通过指向性天线形成窄波束切换指向来实现对整个空域的复用, 通过单条链路半双工方式工作实现卫星之间的双向通信, 从而实现整个星间链路采用同一频点。在全星座组网未完成的情况下如何对星间网络的全网性能进行有效测试是一个技术难题; 星间链路全网测试技术旨在利用星间链路 CSTDD 体制的特点, 利用单台地面站设备, 对星间链路 CSTDD 体制的全网性能进行测试; 详细介绍了星间链路 CSTDD 体制的特点, 提炼出了星间链路的测试需求; 并根据 CSTDD 体制特点, 依托单台地面站设备, 组成星间链路测试设备; 产生指定数量的虚拟卫星, 和空中的被测卫星组成星间链路网络, 完成了星间链路物理链路、测量数据、通信数据的测试, 为组建我国自主导航系统提供了技术支撑。

关键词: 星间链路; 并发空时分双工; 全网测量; 虚拟卫星

Inter-satellite Link Network Test Technology Based on Ground Station

Feng Xuzhe, Chen Jianyun, Zhou Yongbin, Yang Jianwei, Huang Wende

(College of Artificial Intelligence Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Inter-satellite Link is an important technical support of self-development navigation system in China. CSTDD (concurrent spatial time division duplexing) is a system based on phased-array antenna, providing a feasible way for the implementation of inter-satellite link. This system implements the reuse of the entire space by using directional antenna for narrow beam switching, it also realizes two-way communication between satellites by single link half duplex. At the same time, the whole system uses the same frequency point. How to test the performance of the whole inter-satellite link network under the condition of unfinished networking is a technical problem. The purpose of inter-satellite link network test technology is to make use of the characteristics of CSTDD, and test the performance of whole network by using a single ground station. The characteristics of CSTDD are described in detail, and the test requirements of inter-satellite link are refined. Furthermore, an inter-satellite test equipment is made up by using a single ground station according to the characteristics of CSTDD. It generates specified number of virtual satellites, forming a network with satellites in space. It realizes the physical link test, the measurement data test, and the communication data test of inter-satellite link, and provides technical support of self-development navigation system in China.

Keywords: inter-satellite link; concurrent spatial time division duplexing; network test; virtual satellite

0 引言

星间链路是我国第二代卫星导航系统实现自主运行、确保提高服务性能和运行管理水平的关键技术体制, 已经成为我国全球导航系统的重要技术支撑之一。星间链路是指用于卫星之间通信测量的链路^[1]。通过星间链路将孤立的卫星连接成为一个完整的测量通信网络, 不仅提高了卫星星座的整体测量通信性能, 而且摆脱了地面站选址的地域限制, 同时赋予导航星座一定的自主运行能力, 即脱离地面数据注入站支持的运行能力^[2]。

导航星座星间链路的技术本质是兼具精密测量和星间通信功能的天基移动无线网络^[3]。基于相控阵天线的并发空时分双工 (CSTDD, Concurrent Spatial Time Division

Duplexing) 组网体制是为了满足导航星座特殊的结构特点和多样化的建链要求而专门设计的星间链路体制。

在全球导航系统的建设中, 星间链路的测试是一个难题。一方面, 星间链路是一种窄波束体制, 而且是空时分体制, 测试设备难以一直捕捉到星间链路信号; 另一方面, 星间链路网络的性能需要卫星之间联网测试, 在卫星数量不足的情况下难以对全网性能进行测试。如何解决这些难题从而完成星间链路的全网性能测试是一个技术难题^[4]。

本文拟利用并发空时分双工 (CSTDD) 组网体制的特性, 在导航星座组网尚未完成的条件下, 即空中只存在有限数量卫星运行时, 依托单台地面站设备, 对星间链路全网性能进行测试。

1 CSTDD 简介

并发空时分双工 (CSTDD) 星间链路体制是一种基于相控阵天线的组网体制, 具体含义为: 并发是指星座内

收稿日期: 2018-03-14; 修回日期: 2018-04-08。

作者简介: 冯旭哲(1974-), 男, 陕西省西安市人, 博士, 副教授, 主要从事嵌入式系统、实时测试系统及数字信号处理等方向的研究。

同时有多条星间链路波束构建近实时网络；空分是用指向性天线形成窄波束切换指向来实现对整个空域的复用，这项措施提高了链路增益和抗干扰能力；时分有两层含义，一是对单条链路而言以 TDD 半双工方式实现对同一频点同一条链路的复用；二是通过时分方式来实现与多颗卫星的测量通信。

在时间同步的前提下，参与 CSTDD 体制的卫星运行时间被划分为长度一致的时间片，每个时间片称为时隙，是 CSTDD 体制中链路切换的最小时间单位。

由于 CSTDD 星间链路体制采用时分复用的半双工方式，通过收发分时工作完成两颗星之间的相互观测和数据交换，因而只需单个频点即可完成全星座的组网，提高了星间链路的频谱资源的利用率和组网灵活性。由于采用单一频点，不需要进行复杂且灵活性差的频率配对设计，所有导航卫星上配置完全一致的星间链路载荷设备，不同星间链路载荷设备之间具备天然的可互换性，这是实现扁平化组网的重要基础，同时降低了星间链路载荷设备设计和实现的复杂度，系统的可靠性和工程可实现性大大提升。

CSTDD 星间链路体制中采用窄波束天线建立指向性链路，因而对于全星座而言，在任意时隙内均有多条点对点链路同时存在，这样可以有效缩短测量周期，构建近实时网络。具备对多条链路的观测能力以获得充分有效的星间测量数据是导航系统对星间链路的最基本要求，使用窄波束天线是星间链路发展的必然趋势，也是提高信道增益、提高测量精度和增强系统抗干扰能力的有效手段。为了在较短时间内切换天线波束指向，完成单颗卫星对多条链路的观测任务，要求星间链路天线具备一定的捷变指向能力。同时，窄波束天线的捷变能力也保证了 CSTDD 星间链路体制下卫星网络的扩展性和灵活性。相控阵天线可以满足星间链路对于天线窄波束和捷变能力的需求。CSTDD 星间链路组网如图 1 所示。

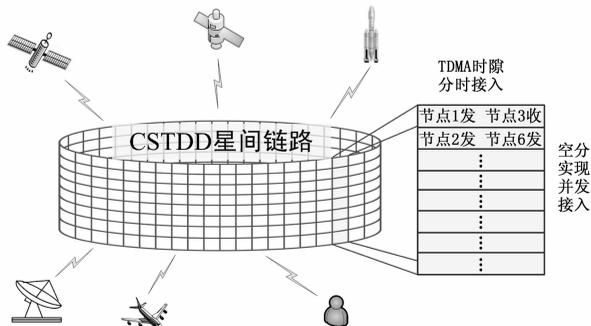


图 1 CSTDD 星间链路组网示意图

CSTDD 星间链路体制中，星座的整个运行时间被划分为若干个时隙，卫星之间采用直接连接的方式，即卫星对于没有地球阻挡可以直接物理连接的卫星视为可见星，单颗卫星在不同时隙内有选择地完成对其所有可见星的观测任务，获得对多颗星的观测数据，以支持定轨和时间同步

处理。新的时隙中，当卫星连接的节点发生变化时，首先卫星根据事先存储的连接目标卫星轨道信息，计算相控阵天线的指向，并利用天线的捷变能力，快速指向目标卫星，切换扩频码，和目标卫星建立物理链路连接。在物理连接稳定后，建立连接的卫星之间开始进行数据测量和通信数据传输^[5]。每个时隙划分为前向测量通信帧和后向测量通信帧，每个单向测量通信帧进一步被划分为若干个子帧，测量功能和通信在两个正交信道上同时进行。对于测量而言，在每个测量子帧内都进行至少一次的采样，从而每个单向建链过程中都能够获得对单条链路的充分有效的观测数据；对于通信而言，各种不同业务类型的数据可以安排在不同的通信子帧内进行传输，每个子帧作为信息数据传输的最小单位，可以实现传输资源的灵活调配，保证 CSTDD 星间链路体制星间链路具备同时混合传输各类信息数据的能力。

CSTDD 体制中，测量通信帧采用统一设计，兼顾可扩充性和实现效率^[6]。在设计之初就考虑将整个网络协议视为单一整体进行优化，弱化网络协议层之间的边界，从需求出发，优化网络资源分配，通过调整各网络协议层间的设计来实现对需求的最大满足。在考虑卫星轨道、卫星平台和星间链路载荷工程实现的约束下，通过对应用业务处理算法、接入时隙分配、中继和路由设计、单机性能等方面均衡优化设计，最终实现定轨和时间同步、数据上传和下传等功能，使网络性能尽可能达到最优，全面满足各类业务对星间链路的需求。测量通信帧在设计时考虑到实现效率因素，采用跨层交互，在网络协议栈中相邻两层之间接口的基础上，提供额外的协议层间交互手段，实现非相邻网络协议层之间的必要信息交互和相邻层之间的丰富信息交互，如星座完好性信息，拓扑结构，干扰态势等，提高整个网络对运行环境发生变化时的最快响应和全局性能的优化。每个卫星节点的协议栈完全一致，可以方便地扩充或者缩减整网的节点数量。CSTDD 协议层映射关系如图 2 所示。

总之，CSTDD 体制既规定了星座之间的物理连接方式，又设计了卫星之间实现测量通信的方式，可以作为导航星座星间链路建设的依据。

2 星间链路测试需求分析

星间链路的测试需求主要体现在这几方面。

2.1 物理链路测试

由于 CSTDD 体制中，所有节点之间连接采用单一频点，所有导航卫星上配置完全一致的星间链路载荷设备，不同星间链路载荷设备之间具备天然的可互换性，不同卫星节点之间连接，只是扩频码不同，频点和调制方式完全相同。因此，在测试卫星物理链路时，可以用星地链路（卫星到地面站）来替代星星链路（卫星到卫星），由于星地链路存在大气层、电离层等衰减因素，总体环境比星星

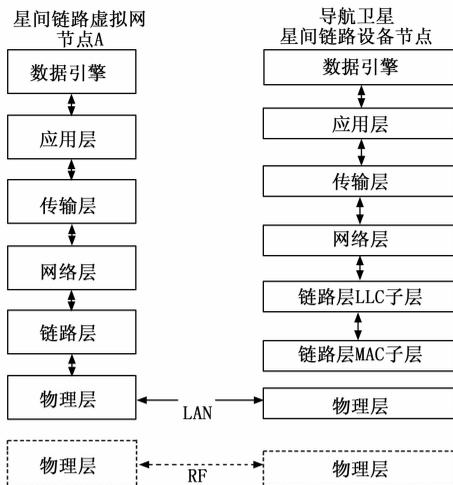


图 2 CSTDD 协议层映射关系示意图

链路恶劣, 所以, 只要星地链路通过测试, 则物理链路设计可以满足星星链路的需求。同时, 在测试过程中, 要确保被测试卫星和地面站一直保持连接, 而且, 不能改变被测试卫星的正常工作流程。

2.2 测量数据收发测试

由于实际测量的星地链路而非星星链路, 所以实际测量值(伪距值)是没有变化的, 即无法用此伪距值去计算实际距离和进行时间同步, 因此, 只能用替代值来检验测量数据的传送和处理流程是否正确。

2.3 通信数据测试

主要测试星间链路网络数据的通信数据的传送以及数据的全网通性, 包括测试数据的覆盖性以及网络协议栈处理的正确性, 即数据是否按照设计进行发送、接收、中转数传、数据重传、回复确认等。

星间链路网络存在几种主要的数据传输需求, 需要在地-星、星-星间实现可靠传输^[7]:

- 1) 链路管理信息传输;
- 2) 运控信息传输;
- 3) 测控信息传输;
- 4) 自主运行信息传输。

根据上述测试需求分析, 星间链路测试设备实际上是要构建一个虚拟的导航星座全球系统星间链路网络环境, 在其中运行代表实际卫星星间链路系统状态与功能的模型节点, 模拟产生各类业务数据并驱动其在网络内传输。最为关键的是该设备构成的虚拟网络可以驱动地面站使其成为一个放置于地面的伪卫星节点, 该伪卫星随着系统运行充当与被测试卫星建链的不同卫星节点角色, 由此将空中待测卫星星间链路纳入到网络数据接入测试设备构建的虚拟网络环境中, 实现真实卫星节点与虚拟卫星节点相结合的星间链路全网运行环境, 以此来进行网络传输协议、业务数据传输性能的评估、优化。星间链路测试设备由地面站和附属设施组成, 地面站主要完成与被测试卫星的物理

连接, 其它功能由附属设施完成。虚拟卫星与真实卫星连接示意图如图 3 所示。

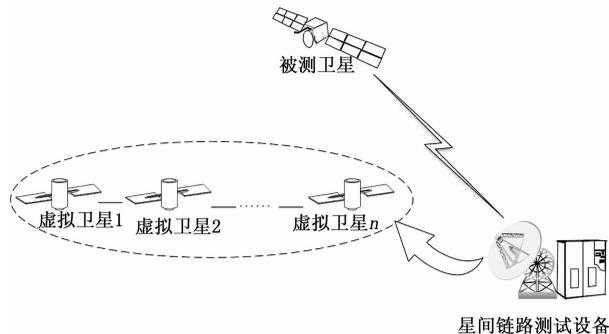


图 3 虚拟卫星和真实卫星连接示意图

需要特别指出的是, 由于被测试卫星已经在空中正常运行, 不可能改变其正常工作流程, 只能微调部分参数来完成测试。也就是说, 在整个测试过程中, 被测试卫星是正常工作状态, 只需要其调整星间链路波束指向, 使其在测试期间指向地面站, 保证测试期间物理链路的连接。调整星间链路波束指向过程也必须遵循卫星调整波束指向的正常工作流程。

3 星间链路测试系统实现

卫星星座由一定数量的卫星组成, 但是其发射一般是逐颗发射^[8]。在卫星星座构建早期, 空中的已有卫星不足以构成导航星座全球系统星间链路网络所必需的数量, 在网络传输协议、业务数据传输性能方面难以进行有效全面的验证, 在星间网络性能方面的验证更为有限, 因此需要开发专门的星间链路测试设备协助完成上述测试。

根据上述星间链路测试需求分析, 星间链路测试设备要具备和被测试卫星建立物理链路的能力。星间链路地面站具备一套和卫星完全相同的相控阵星间链路射频设备, 星间链路测试设备利用它可以和空中的被测试卫星建立起物理连接。

由于 CSTDD 体制的特点, 即卫星网络是一个单一频点、扁平化的网络, 不存在中心管理节点, 所有网络中的节点地位都是平等的^[9]。同时由于 CSTDD 的时分空分特性, 即在某一时段, 一颗卫星只能和另一颗卫星相连, 不会出现一颗卫星同时和多颗卫星连接的情况。这些特点使得采用一套硬件设备模拟仿真整网的节点成为可能。

根据 CSTDD 体制以及导航卫星星座特点, 每一颗卫星在特定时刻的可见星(即可以与之建立物理连接的卫星)都是确定的, 可以根据卫星的轨道参数事先推算出所有时刻的可见卫星^[10], 由于 CSTDD 体制用分时的办法实现与不同卫星的连接, 为了提高连接效率, 保证数据的全网通, 全网采用建链规划表和路由表的方式来规定每个节点的连接对象以及数据传输路径。建链规划表和路由表通过提前计算产生, 并事先上注到被测试卫星中。

由于被测卫星是按照正常流程运行,在选定测试时段后,为了确保被测试卫星在测试时段内指向位于地面的星间链路测试设备,可以将这段时间内所有和被测卫星有连接关系的卫星节点轨道信息替换为虚拟指向星轨道信息,这个虚拟指向星位于被测试卫星和地面站连接的延长线上,根据 CSTDD 体制,和被测试卫星连接的目标卫星切换以后,由于其轨道参数被虚拟指向星的轨道参数替代,可以保证被测试卫星在测试时间段内实际波束和地面站连接。使用虚拟指向星可以保证被测试卫星不改变天线正常指向流程。虚拟指向星如图 4 所示。

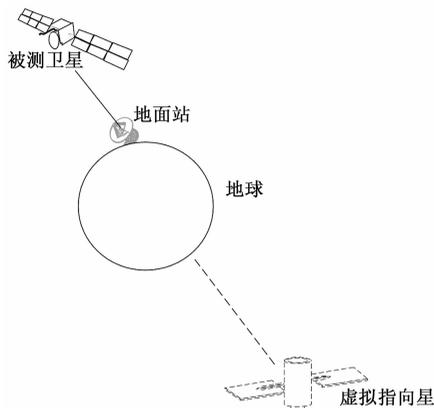


图 4 虚拟指向星示意图

因为在测试时段内,所有和被测试卫星连接的卫星实际并不存在,而是由星间链路测试设备模拟产生的,因此这些卫星称为虚拟卫星。所有的虚拟卫星都运行于星间链路测试设备中。假设有 N 个虚拟卫星节点,则加上被测试卫星,则参与数据传输的星间链路网络节点数为 $N+1$ 个。星间链路测试设备根据被测卫星参数、测试时间、参与连接的卫星编号等信息产生建链规划表和路由表,生成的建链规划表和路由表涵盖的节点为被测试卫星和虚拟卫星。卫星的建链规划表和路由表通过测控系统上注到被测试卫星,其它 N 个虚拟卫星的建链规划表和路由表全部传送到星间链路测试设备。同时,星间链路测试设备还产生虚拟卫星的辅助文件,如通信数据文件、测控数据文件等。

到达测试场景执行时间后,被测试卫星读取建链规划表,确定建链目标节点,卫星的建链目标节点共有 N 个,但是由于 N 个卫星的轨道参数全部为虚拟指向星轨道,所以被测试卫星的建链指向算法计算得到的方向全部指向地面站,接收某个特定卫星节点的信号时采用该卫星号对应的扩频码。

星间链路测试设备根据虚拟卫星的辅助文件、 N 个虚拟卫星的建链规划表和路由表依次和被测试卫星建立链路,星号对应其扩频码。这样,被测试卫星和地面站之间可以建立起物理链路。同时,虚拟卫星和被测试卫星组成 $N+1$ 节点的星间链路网络,在该网络中进行通讯数据传输和测量工作流程验证。

星间链路测试设备对于星间测量功能的只限于对测量数据处理流程的验证,由于此阶段的测量值实际上是被测卫星和地面站之间的距离,因此不能用于星间距离计算和时间同步处理。

星间链路测试设备产生需要在星间链路之间传输的数据,数据的传输按照星间链路数据传输协议执行。这样,从被测试卫星的角度来说,在数据传输层面,和 N 个实际卫星组网并进行数据传输是完全一致的。星间链路测试设备结构图如图 5 所示。

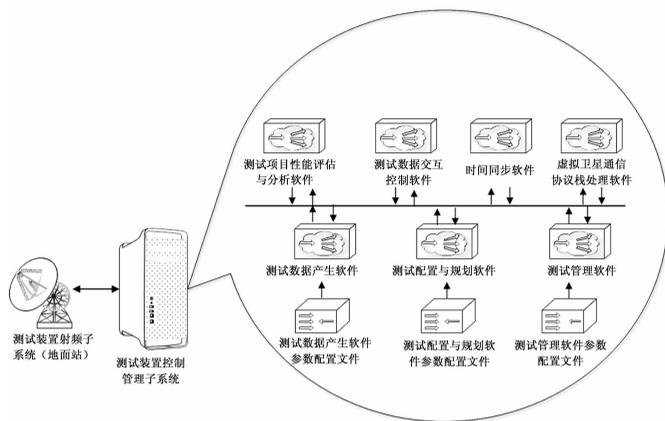


图 5 星间链路测试设备结构

4 实验结果与分析

星间链路测试设备实现后,和空中卫星进行了星地联合测试实验。具体参与实验物理设备为空中的一颗 IGSO 卫星和星间链路测试设备。IGSO 卫星上的相控阵天线和星间链路测试设备的相控阵天线射频设备进行物理连接,实验所需的虚拟卫星由星间链路测试设备产生。

实验主要验证星间链路的物理链路性能、测量数据处理流程、网络通信性能是否满足要求。

4.1 物理链路测试

物理链路性能测试中,采用卫星发射、地面站接收和地面站发射、卫星接收来检验物理链路的上下行接口。实验结果表明,星地链路的功率、信号频率、码速率、调制形式、码型、信息速率、帧格式、时间信息等接口信息匹配良好,达到设计要求。实验中,星地链路上下行链路均顺利实现捕获、跟踪、数据传输等操作,表明星地链路满足星间链路对物理链路的要求。因为星地链路条件比星星链路条件恶劣,因此实验结果表明星星链路可以满足设计要求。

4.2 测量数据处理流程测试

在星地实验中,测量数据主要验证处理流程。实验结果表明,测量数据可以完成实时传送、打包、交换等功能,其处理流程正确,符合设计要求。

4.3 通信性能测试

星间链路网络通信性能测试,可以验证数据传输协议

的正确性, 包括数据的发送、接收、转发、重传等功能, 为卫星实际组网后的数据传输方案提供参考。实验中, 根据实际应用情况, 设定了不同的实验场景。

根据 CSTDD 体制, 每颗星最多同时可见的卫星数量为 8 颗, 因此, 在虚星数量设置上, 分别选取 4 颗、6 颗、8 颗, 以模拟卫星实际运行时的不同场景^[1]。在通信数据处理中, 分为正常接收发送、转发、应答、重传 4 种操作, 可以覆盖通信网络的全部功能。从通信数据的类别上, 分为: 链路管理数据、运控数据、测控数据、自主运行数据等, 这些数据体现在数据包类型、传输优先等级和传输可靠性的不同。实验场景设定条件如表 1 所示。

表 1 实验场景设定

实验场景	虚星节点	测试项目	数据类别
四虚星	3,4,6,9	正常收发	链路管理数据、运控数据、测控数据、自主运行数据
		转发	
		应答	
		重传	
六虚星	3,4,6,9, 10,21	正常收发	链路管理数据、运控数据、测控数据、自主运行数据
		转发	
		应答	
		重传	
八虚星	3,4,6,9,10, 21,22,23	正常收发	链路管理数据、运控数据、测控数据、自主运行数据
		转发	
		应答	
		重传	

每种数据发送 50 帧, 通过节点接收数据和原始发送数据比对来判断数据接收是否正确。

根据星间链路网络的数据接收状态, 统计了网络连通性、平均通信传播时延 (以时隙为单位)、通信信道占用率、误帧率等指标, 对星间链路网络通信性能进行评价。实验结果如表 2 所示, 各项指标表明, 星间链路网络符合设计要求, 可以满足传输各类数据的需求。

表 2 星间链路网络通信性能分析

项目	要求	结果	符合度
网络连通性	80%	88.3%	符合
平均传播时延/时隙	1	0.65	符合
通信信道占用率	50%	61.8%	符合
误帧率	0	0%	符合

综上所述, 星间链路测试设备利用一台地面站的相控阵天线射频设备, 和空中的被测试卫星进行物理连接, 验证了星星物理链路的可行性, 对星间链路测量流程进行了测试, 对星间链路的全网数据传输进行了测试, 数据传输网络在网络连通性、平均传播时延、通信信道占用率、误帧率等方面均满足要求。测试结果表明, 星间链路 CSTDD 体制可以满足卫星组网需求, 后续的卫星组网过程也验证

了这一结论。

5 结束语

导航卫星星座发射的过程中, 在卫星数量还不满足组网的条件下, 存在测试卫星星间链路全网性能的客观需求, 为此, 依托单台地面站设备, 开发了星间链路测试设备。在实际测试中, 被测试卫星不改变正常工作流程, 星间链路测试设备依托地面站的单台射频设备, 和被测试卫星建立物理链路。同时, 星间链路测试设备模拟产生多颗虚拟卫星, 和被测试卫星组成星间链路网络, 在该网络中传输模拟数据, 验证网络传输的正确性。根据实际测试结果, 星间链路网络数据接入测试设备可以完成星间链路业务数据模拟、星座轨道与星间观测数据模拟、试验项目性能评估与分析、星间链路传输控制与路由仿真、星间链路数据交互接入等功能, CSTDD 体制符合星间链路网络的需求。总之, 星间链路测试设备实现了基于地面站的星间链路全网测试技术, 以有限的卫星节点, 利用虚拟卫星, 完成了卫星星座全网数据传输的测试工作, 为卫星整体组网提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨宁虎, 陈力. 卫星导航系统星间链路分析 [J]. 全球定位系统, 2007, 32 (2): 17-21.
- [2] 陈忠贵. 基于星间链路的导航卫星星座自主运行关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.
- [3] Muri P, Mcnair J. A survey of communication sub-systems for intersatellite linked systems and cube sate missions [J]. Journal of Communications, 2012, 7: 290-308.
- [4] 冯旭哲, 罗飞路, 陈建云, 等. 基于反射内存网络的实时测试系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (11): 1447-1448, 1457.
- [5] Frank L, Maral G. Signaling for inter-satellite link routing in broadband non-GEO satellite systems [J]. Computer networks, 2002, 39 (1): 79-92.
- [6] Sanctis M D, Gianca E, Ruggieri M. Improved algorithms for internet routing in low earth orbit satellite networks [J]. Space commun. Int. J., 2005, 7: 171-182.
- [7] Donner A, Kissling C, Hermenier R. Satellite constellation networks for aeronautical communication: traffic modelling and link load analysis [J]. Let Communication, 2010, 4 (13): 1594-1606.
- [8] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: Principles and applications [M]. UK: Artech House Inc, 2006.
- [9] Wood L. Satellite constellation networks [M]. US: Springer, 2003.
- [10] Mortari D, Sanctis M D, Lucente M. Design of flower constellations for telecommunication services [J]. Proc. IEEE, 2011, 99: 2008-2019.
- [11] 申建平. 卫星网络拓扑动态性及仿真系统研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.