

# 基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构设计

房皓, 孙剑伟, 田露

(华北计算技术研究所, 北京 100083)

**摘要:** TDMA (时分多址) 体制的导航星间网络既可以实现导航测距, 也具备较高的数据传输速率, 具有较为广泛的业务适应能力; 然而, TDMA 体制的星间网络系统也存在着星上处理复杂与卫星节点处理能力低的矛盾; 借鉴 SDN (软件定义网络) 将网络系统控制层面与数据层面相分离的思想, 在 TDMA 体制的星间网络中引入 SDN 技术, 设计了基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构, 将控制功能从卫星节点抽离出来, 使其可以专注于星间数据转发, 控制管理信息主要由卫星地面站 (后续为高轨道卫星) 扮演的 SDN 控制节点制定并分发, 从而简化了卫星的业务负担, 同时可以借鉴成熟的地面网络技术制定高效的控管策略; 对所设计架构的主要的控管流程进行了仿真模拟, 仿真结果表明, 该架构具有一定的可行性。

**关键词:** 软件定义网络; 时分多址; 星间网络

## Design of TDMA Inter-satellite Network Architecture Based on SDN

Fang Hao, Sun Jianwei, Tian Lu

(North China Institute of Computing Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Navigation Inter-satellite networks based on TDMA (time division multiple access) have extensive service range, they can both achieve navigation distance measurement and provide high transmission speeds. However, there are contradictions of complex tasks in satellites and satellites have low processing capacity in Inter-satellite networks based on TDMA. The theme of SDN (software defined network) is separate network layer and data layer of network systems. This paper designed an architecture of Inter-satellite network based on TDMA based on SDN by introducing the technologies of SDN to Inter-satellite network. By separating control function from satellites, this architecture makes satellites concentrate on transmitting data to each other. Satellite ground stations (maybe high orbit satellites in future) which are the SDN controller will make control instructions and distribute them to satellites. This architecture can simplify the burden of satellites and make control instructures efficiently by using the technologies of ground network. Meanwhile, this paper made a simulation of main controlling processes of the architecture, and the result of simulation showed that this architecture had certain feasibility.

**Keywords:** software defined network; TDMA (time division multiple access); Inter-satellite network

## 0 引言

近年来, 随着应用需求的逐步加深, 卫星导航系统已经成为各个国家的战略性基础资源, 尤其是在军事领域的广泛应用催生了“导航战”的概念, 对系统的可靠性、顽存性提出了新的要求<sup>[1-2]</sup>。星间链路具有信息交互便捷、作用范围广等特点, 利用星间链路技术, 可以改善导航系统的定位测距精度, 可以提高导航卫星星历更新频度。依拖星间链路技术, 在空间建立卫星测控网络是卫星导航系统发展的必然趋势<sup>[3]</sup>。

然而, 由于卫星在空间的高速运动, 卫星网络的网络拓扑结构不断更新, 传统的地面网络路由规划技术无法适用<sup>[4-6]</sup>; 同时, 导航系统相比其他卫星网络除了要提供卫星间通信的功能外, 还要承担导航测距的任务, 增加了导航系统建链方案的复杂性; 另外, 由于卫星网络节点系统内存较小, 单颗卫星业务处理能力偏低, 往往需要多颗卫星联合处理某个星上业务<sup>[7]</sup>, 但目前尚缺乏高效的规划调度策略使得多颗卫星灵活地协同作业。这些都为导航系统在空间组网提出了更高的要求。

在导航卫星网络中引入 TDMA 信道接入机制可以较好地适应其在组网及运行过程中面临的挑战<sup>[8]</sup>。每个 TDMA 时间帧里认为导航星座的拓扑结构固定不变, 卫星在 TDMA 时间帧的每个时隙可以与不同的其他卫星建链, 根据链路状态及卫星运动的可预测性, 对每个时隙卫星的建链状况进行合理的规划, 可以使导航卫星在一个 TDMA 时间帧的时间段内建立较多的星间链路, 满足导航测量的需求。美国的 GPS (全球定位系统) 就是采用了 TDMA 体制的组网模式, 其作为典型的卫星网络为其他系统提供了借鉴<sup>[9-12]</sup>。

TDMA 机制为卫星导航系统组网过程中面临的网络拓扑动态变化、兼顾通信和测距两方面需求等挑战提出了解决方案, 但其仍存在着需要频繁计算时隙表、路由表与卫星节点处理能力低的矛盾<sup>[13-14]</sup>, SDN (软件定义网络) 技术则为克服这种缺陷提供了方向。SDN 的主要思想是将网络系统的控制层面和数据层面进行分离, 控制层面负责对整个网络进行集中化的控制与部署, 数据层面仅完成简单的数据转发和硬件配置功能<sup>[15-16]</sup>。将 SDN 技术引进到 TDMA 体制的卫星导航系统中, 可以将控制功能从底层设备中抽离出来, 使卫星网络节点专注于数据转发, 大大降低导航卫星的任务负担。例如一个具有  $n$  颗卫星的星型网络, 在路由规划过程中, 由卫星节点各自收集网络链路状态信息, 所需要收发数据包数量为  $O(n^2)$  级别; 依照 SDN 的思想, 由控制层面收集网络运行信息, 制定全网时隙规划、路由策略, 然后分发给底层卫星节点, 通信

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-04-25。

**作者简介:** 房皓 (1992-), 男, 河北霸州人, 在读硕士研究生, 主要从事星间链路方向的研究。

孙剑伟 (1974-), 男, 辽宁铁岭人, 硕士, 硕士生导师, 研究员级高级工程师, 主要从事卫星应用方向的研究。

的数据量为  $O(n)$  级别。

本文利用 SDN 技术将网络系统控制层面与数据层面相分离的特性, 针对当前卫星导航网络面临的问题, 设计了基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构。同时, 对该架构下控制层面控制数据层面网络设备流表整网更新的过程进行了仿真, 验证了该网络架构的可行性。

## 1 软件定义网络

SDN 是一种新型的控制与转发分离的网络架构<sup>[17]</sup>。其采用分层的思想, 将控制功能从底层的网络设备中抽离出来并迁移到可控的计算机设备中, 使得网络的底层设备可被上层的网络服务所抽象。网络管理者可以通过仅仅操作上层的 SDN 应用程序来实现对网络底层资源的部署和调度, 从而以灵活可控的模式达到软件定义网络的目的。

典型的 SDN 架构分为 3 个层面, 如图 1 所示。最底层是基础设施层, 主要由网络设备组成, 负责在控制层的控制下建立数据通路, 实现数据传输。中间是控制层, 是 SDN 架构的核心部分, 一方面, 控制层通过其与基础设施层的接口 (南向接口) 收集底层网络设备的信息, 掌控全网的状态, 并对基础设施层下发控制策略; 另一方面, 控制层为上层应用层提供可扩展、可编程的接口 (北向接口)。最上层是应用层, 包括各种业务和应用, 根据不同的需求, 调用北向接口实现相关的功能。

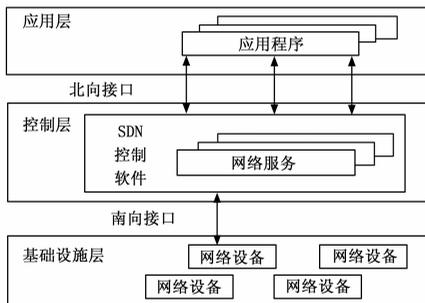


图 1 SDN 架构

SDN 这种三层的架构模式, 使得网络维护仅需要通过软件更新来实现网络功能的升级, 降低了网络维护的成本和难度<sup>[18]</sup>。同时, 由于将控制功能完全从底层网络设备中抽离, 使得网络设备可以只专注于数据转发的功能, 简化了其设计的复杂度, 降低了构网的成本。从数据转发方面来看, 传统网络中网络设备只能收集局部区域的网络信息, 生成的路由策略势必会产生一定的局限性, 而 SDN 架构中控制层面可以掌握整个网络的运行状况, 进而可以在全网的层面上设计数据转发路由, 使得全网设备利用率以及数据转发效率得以提高。

OpenFlow 协议是首个将 SDN 南向接口标准化的协议。其具体实现了 SDN 控制与转发相分离的思想, 将控制功能从网络设备中分离出来, 并规定了控制层与基础设施层之间交互所用的信息格式、类型以及接口运行等所需遵循的规则, 包括基础设施层所需遵循的接入协议和路由协议等。OpenFlow 交换机的处理单元由流表构成, 其借助流表机制, 实现了数据包在底层设备间的转发规则<sup>[19]</sup>。本文设计的基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构就是采用 OpenFlow 协议作为控制层面与数据层面的接口。

## 2 基于 SDN 的 TDMA 体制卫星网络架构

### 2.1 基于 SDN 的 TDMA 体制卫星网络架构

针对前述 TDMA 体制的卫星导航系统在组网及运行过程中面临的星上处理复杂而卫星节点处理能力较低的问题, 本文引入基于 OpenFlow 协议的 SDN 技术, 依据其将控制层面与数据层面相分离的思想, 设计了基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构, 将控制功能从卫星节点抽离出来以降低其任务处理负担。该网络架构如图 2 所示, 对照典型的 SDN 网络架构, 该星间网络架构也采用 3 层的架构模型, 包含应用层面、控制层面和数据层面 3 个层面, 下面对该架构的每个层面的组成和功能进行介绍。

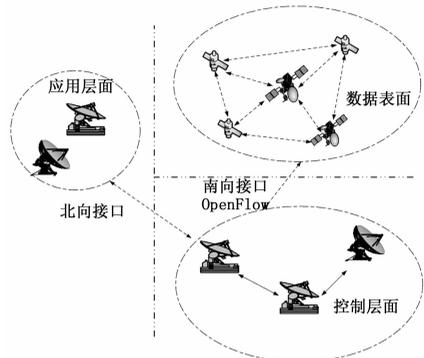


图 2 基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构

1) 位于左侧的是该星间网络架构的应用层面, 可以选择部署在地面上或者某个空间站, 由星间网络的各种空间应用组成。应用层面通过调用与控制层面的北向接口灵活地实现各种空间应用需求。

2) 本文所设计的卫星网络架构的控制层面由若干个部署在地面上的地面站联合组成, 负责以全局视图对网络的整个数据层面进行控制和管理。控制层面对多个地面站控制节点进行扁平式的部署, 每个控制节点具有相同的功能定位。控制层面通过南向接口按照 OpenFlow 协议规定的格式与数据层面进行控管信息的交互, 达到控制与转发相分离的目的。选择由地面站组成该网络架构的控制层面, 主要有以下几个原因:

1) 控制层面由地面站组成, 借助于成熟的地面网络技术, 一方面可以加强网络架构数据层面多控制器协调的业务处理能力, 制定高效的控制层面控管策略, 提高该网络架构数据层面卫星节点的数据转发效率; 另一方面, 可以灵活地设计控制层面与应用层面的北向接口, 简化应用层面软件的复杂度, 同时在突发情况发生时, 可以将控制层面的控制管理权限交由同在地面站的应用层面负责, 由应用层面对整个网络进行人为的控管。

2) 有的学者也提出用高轨道的 GEO/IGSO 卫星扮演控制层面控制器的角色, 因为从覆盖面积来讲, 位于高轨道的 GEO/IGSO 卫星要优于地面站。但是受制于当前星上处理能力有限, 将空间的高轨道卫星选定为控制器在实现上具有较大的难度, 同时, 由于卫星在空间的高速运动, 卫星间链路的稳定性和数据传输速率都有待提高, 不利于控制层面多控制器节点之间的信息交换。而地面的网络技术和地面站的硬件设施则较为成熟, 具备组建控制层面的条件, 所以, 选择在地面构建该网络架构的控制层面。随着空间网络技术的逐

渐发展, 未来可以将高轨道卫星逐步加入到控制层面中来, 实现地基、天基联合控管。以体系工程研究的思想来看, 本文提出的网络架构是最终基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络的起步架构, 该架构会以一个科学的、迭代的、不断演化进步的过程逐渐完善。

3) 该架构的数据层面则由空间众多的中低轨道卫星节点组成, 负责网络中数据包的转发。中低轨道的 MEO/LEO 卫星距离地球较近且数量较多, 卫星轨道较为稳定, 适合做转发数据的底层网络节点。数据层面的网络节点通过南向接口向控制层面报告设备运行状态信息, 同时接收控制层面下发的控管信息, 按照一定的规则对本地流表进行更新。导航卫星业务处理较为复杂, 要兼顾通信和测距两个方面的需求, 基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构将逻辑功能从卫星节点中分离出来, 大大减轻了星上的任务处理负担, 降低卫星设计的复杂度; 同时控制层面收集全网卫星数据节点的运行信息, 可以使其以全局视图对数据层面进行一体化的管控, 提高底层数据传输效率。

## 2.2 控制管理流程

在本文设计的基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构方案中, 应用层面调用与控制层面的北向接口, 实现导航系统的各种需求; 控制层面作为系统的控制管理中心, 向上为应用层提供可编程、可扩展的北向接口, 收集各种应用需求, 向下通过南向接口对数据层的网络状况进行监视, 同时按照一定的策略生成网络规划信息和路由策略, 以既定的格式下发至数据层面对其进行控管和监视; 数据层面则通过南向接口接收控制层面下发的控制指令更新本地流表并按照其进行卫星之间的建链和数据转发, 同时上报底层基础设施信息。

TDMA 体制的卫星导航网络中, 网络规划和路由策略分别以时隙表和路由表的形式体现。时隙表对应一个 TDMA 时间帧, 由固定数量的时隙组成。在一个时隙内, 导航卫星可以与另一颗卫星建链进行数据传输和测距, 在一个时隙表内, 卫星可以与多颗卫星轮询进行建链。时隙表每隔一段时间会更新一次, 以反映导航星座拓扑的动态变化。在时隙表的基础上, 灵活的运用各种路由算法, 如 Dijkstra 算法等, 生成路由表。在本文设计的基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构中, 时隙表和路由表相互配合使用构成了控制层面的控管信息。

控制层面可以包含多个地面站控制器, 位于不同的地理位置以扩大控制层面对空间卫星节点的覆盖范围, 每个控制器通过南向接口对所负责的数据层面的网络设备运行状况和链路状态进行监控和统计, 在收集到数据层面报告的网络状态信息后, 各个控制器之间通过东西向接口进行网络状态信息的通信, 形成网络的全局视图。控制层面基于收集到的网络状态信息, 利用卫星轨道运动的规律性和可预测性并结合应用层面下发的需求, 制定适用于全网的时隙表和路由表, 并与本地旧的时隙表、路由表进行比较, 选择发生改变的表项下发到数据层面的网络设备中, 同时, 对数据层的网络运行状况进行监控。控制层面生成时隙表和路由表之后, 将其按照 OpenFlow 协议流表的格式进行转换, 将卫星号和建链时间、数据转发时间等信息填写在流表项的匹配字段, 建链规划和路由策略则包含在操作集中, 使控管信息以 OpenFlow 流表的形式下发到数据层面的卫星网络节点中。由于卫星网络节点不涉及控制功能而只专注于数据转发, 具有较好的兼容性, 控制层面可以使用各种

时隙编排算法和路由算法生成时隙表和路由表, 灵活应对各种突发情况。

数据层面的网络设备包含若干个流表, 映射着控制层面下发的时隙表和路由表。卫星网络节点接收到数据包后, 首先在本地流表中查询与之匹配的流表项, 若匹配成功, 则按照流表项中时隙表和路由表规定的时间与目标卫星节点建链并将数据包转发到目标卫星节点, 或执行流表项中相应的操作集; 否则, 卫星节点将丢弃该数据包, 或者将该数据包的信息上报控制层面, 由控制层面制定处理策略。

## 3 控管流程模拟

### 3.1 控管流程模拟

本文在 VS2010 的平台下, 以上行注入作为应用层面的导航应用需求, 对所设计的基于 SDN 的 TDMA 体制星间网络架构的主要管理流程进行了仿真。选取构型码为 24/3/1, 轨道倾角为  $55^\circ$ , 轨道高度为 27 000 千米的 Walker 星座作为试验导航星座。控制层面采用文献 [11] 所提出的时隙编排算法对导航星座时隙表进行编排, 其主要思想是对卫星间的链路进行分类, 按照境内星链路、境外星链路、非时变链路、时变链路的顺序将星间链路排进时隙表, 充分利用卫星导航星座拓扑变化的规律, 降低卫星间建链等待时延的同时兼顾导航卫星的测量需求。路由表则选取基于最小跳数的 Dijkstra 算法生成, 降低数据包在卫星间的中转次数。同时, 控制层面控制器节点要求数据层面的卫星节点收到控制指令后立即更新本地流表并发送反馈信息, 对底层网络节点的建链状况和数据转发进行实时监控。在控管信息分发时, 根据地面站控制器数量不同采取了两种策略, 策略一仅选择北京站扮演控制层面唯一的控制器; 策略二则将三亚站和哈尔滨站加入到控制层面中, 3 个地面站可以进行网络状态信息的交互通信, 保证全局视图。在不考虑链路传输速率的情况下, 控制层面控制器按照既定的时隙编排算法和路由算法生成控管信息分发到整个数据层面, 并如期收集到底层卫星节点的反馈信息所需要的时间如图 3 和图 4 所示, 图 3 是对策略一模拟的结果, 图 4 对应策略二的模拟。

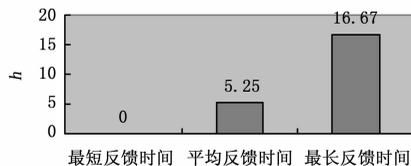


图 3 策略一模拟结果

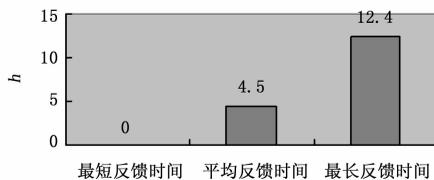


图 4 策略二模拟结果

### 3.2 模拟结果分析

从模拟的结果来看, 策略一和策略二中控制层面的地面站控制节点均能在一定的时间内将控管策略分发到整个数据层面并收到反馈, 表明了本文设计的基于 SDN 的 TDMA 体制星间

网络架构具有一定的可行性。同时，由图 3 和图 4 的比对可见策略二模拟的结果在时间上整体优于策略一，且最长反馈时间下降较为明显。这是因为空间中的卫星一直在绕地球做高速运动，在某时刻并不是所有的卫星都对某个地面站可见，所以地面站需要等待卫星节点可见才能对其下发流表。等待卫星的时间与系统启动时卫星所处的位置以及卫星的运行轨道有关，对于一开始就可见的卫星，其上注反馈时间接近于 0。第二种策略增加了地面站数量、扩大了对卫星的覆盖范围所以缩短了地面站分发流表等待的时间，提高了整网控管信息分发的效率。

策略一和策略二模拟的均是系统刚刚启动时控制层面控制器分发控管信息的情况，控管信息只能由控制器直接上注到卫星网络设备；在后续过程中，卫星网络设备在本地存储有包含时隙表和路由表等控管信息的流表，具备一定空间范围的覆盖能力，控管信息可以通过星间链路进行转发，反馈时间将不会超过一个时隙表的时长，文献 [11] 所提出的时隙编排算法中，时隙表时长为 72 秒。

#### 4 结束语

本文在当前 TDMA 体制导航卫星网络中引入 SDN 技术，按照控制和数据相分离的思想，设计了基于 SDN 的 TDMA 体制卫星网络架构，并对该网络架构的控管流程进行了模拟，仿真模拟的结果表明，该星间网络架构具有一定的可行性，同时，增加控制层面控制节点（卫星地面站）的数量扩大其地理覆盖范围可以提高该网络架构控管信息分发的效率。

#### 参考文献:

[1] 李 婷, 胡建平, 徐会忠. 天基信息网络的软件定义网络应用探析 [J]. 电讯技术, 2016, 56 (3): 259-266.  
 [2] 杨 霞, 李建成. Walker 星座星间链路分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32 (2): 113-147.  
 [3] 赵 爽. 2012 年美国 GPS 系统发展综述 [J]. 卫星应用, 2013 (2): 18-20.  
 [4] 罗大成, 刘 岩, 刘延飞, 等. 星间链路技术的研究现状与发展趋势 [J]. 电讯技术, 2014, 54 (7): 1016-1024.

(上接第 208 页)

对于高校管理也能使用网络化测试对系统的合理性进行检验。

#### 4 结束语

网络化测试技术是集数据的采集、传输、处理于一体的综合测试技术，将电子检具结合网络，能够使信息处理变得更加的方便，对于故障诊断的问题也能轻易的检测，最重要的是实现了资源共享，成功的解决了生产的自动化问题。

在计算机技术不断发展的推动下，基于 RS485 总线的存储器网络化测试技术的研究备受关注，只有明确新时期的战略性要求，才能紧跟国际网络测试的发展潮流。采取对国际测试技术的科技跟踪和技术消化，实现自主的创新，才能研制出可靠性高、扩展性强的网络化测试技术。

#### 参考文献:

[1] 郭佳欣, 单彦虎, 任勇峰, 等. 一种提高 RS422/RS485 可靠性通信方法的研究 [J]. 科学技术与工程, 2017, 17 (9): 206-213.  
 [2] 赵 亮, 张吉礼. 提高 RS485 总线通信可靠性的优化设计方法

[5] Ollie L, Larry B, Art G, et al. GPS III system operations concepts [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2005, 20, (1): 10-18.  
 [6] 王丽冲, 姚秀娟, 闫 毅. 一种基于 OpenFlow 的软件定义卫星网络架构设计方案 [J]. 电子设计工程, 2016, 17 (6): 85-89.  
 [7] 左青云, 陈 鸣, 赵广松, 等. 基于 OpenFlow 的 SDN 技术研究 [J]. 软件学报, 2013, 24 (5): 1078-1097.  
 [8] Quintas D, Friderikos V. All optimal solutions in STDMA scheduling [A]. 20th European Signal Processing Conference [C]. Bucharest, 2012: 834-838  
 [9] 王春锋. 软件定义可重构卫星网络系统研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 5 (10): 454-459.  
 [10] 吴光耀, 陈建云, 郭熙业, 等. 基于 TDMA 的星间链路时隙分配设计与仿真评估 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12).  
 [11] 石磊玉, 周 益, 王东会, 等. 一种适用于卫星导航系统星间链路的可抢占时隙 TDMA 体制 [J]. 武汉大学学报, 2012, 37 (6).  
 [12] 张景斌, 刘 炯, 申普兵. 一种基于等长时隙划分双层卫星网络路由算法 [J]. 中国空间科学技术, 2015, 3 (6).  
 [13] 石磊玉. 卫星导航系统星间组网关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.  
 [14] 刘功亮, 李 晖. 卫星通信网络技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015, 3.  
 [15] 叶 玥. 软件定义卫星网络的资源分配机制设计与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014, 6.  
 [16] 杨诗琦. 软件定义卫星网络架构设计研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016, 5.  
 [17] 徐鹏杰, 陈建云, 唐银银, 等. 卫星导航系统低通信时延星间链路时隙规划仿真分析 [A]. 第七届中国卫星导航学术年会论文集 [C]. 长沙: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2016.  
 [18] 卢 勇, 赵有健, 孙富春, 等. 卫星网络路由技术 [J]. 软件学报, 2014, 25 (5): 1085-1100.  
 [19] 周云晖, 孙春富. 一种基于时隙划分的三层卫星网络 QoS 路由协议 [J]. 计算机学报, 2006, 29 (10): 1813-1822.  
 [20] 安 妮, 董 俊. 基于嵌入式的现场总线和 TCP/IP 协议转换的技术研究 [J]. 现代电子技术, 2016, 39 (1): 16-19.  
 [21] 詹健东, 宗 容, 余 江, 等. 基于以太网和 RS485 总线的小型微网控制系统设计 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2015, 37 (5): 674-679.  
 [22] 张振刚. AS5643 网络自动化测试技术研究 [J]. 现代电子技术, 2017, 40 (7): 5-7.  
 [23] 张庆国, 王健培, 崔国平, 等. 基于座底式水声网络节点的跟踪测试技术研究 [J]. 声学技术, 2016, 35 (3): 193-197.  
 [24] 张海龙, 唐 悦, 窦 健, 等. 微功率无线通信测试技术研究 [J]. 电测与仪表, 2016, 53 (14): 96-100.  
 [25] 张 雄, 李舟军. 模糊测试技术研究综述 [J]. 计算机科学, 2016, 43 (5): 1-8.  
 [26] 卢 林, 于 东, 胡 毅, 等. 开放式数控系统网络接口技术研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36 (3): 621-626.  
 [27] 罗清华, 彭 宇, 周鹏太, 等. 航空飞行试验新一代网络化遥测技术浅析 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (2): 261-270.