

基于 IPV6 和云服务的异地远程测发控系统设计

邹凯, 赵岩, 李海伟, 李恺, 王旭, 张临志,
梁君, 张翔, 王健康

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 为布局未来低成本、高密度、强管控的航天测试和发射场景, 降低人员的保障成本, 提高测试和发射效率, 依托高带宽和广覆盖的互联网资源, 设计了一种基于 IPV6 和云服务的异地远程测发控系统, 适用于信息公开的商业发射任务, 包括核心测发网络、云服务网络和异地测发网络; 技术人员可通过异地测发网络远程接入核心测发网络执行测试和发射任务; 在 IPV4 网络环境下, 由云服务网络实现核心测发网络和异地测发网络的数据转发; 在 IPV6 网络环境下, 云服务网络为核心测发网络和异地测发网络搭建网络隧道, 使二者可以直联通信, 从而节约云服务网络资源; 经过测试, 两种网络环境均实现了远程通信功能, IPV6 网络环境具有更低的传输延时和云服务器资源占用, 证明系统具有搭建成本低和使用地点灵活的优点, 能够降低任务保障成本。

关键词: 异地远程测发控; IPV6; 云服务; 互联网; 直联通信

Design of Remote Testing and Launch Control System Based on IPV6 and Cloud Services

ZOU Kai, ZHAO Yan, LI Haiwei, LI Kai, WANG Xu, ZHANG Linzhi, LIANG Jun,
ZHANG Xiang, WANG Jiankang

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to layout future low-cost, high-density, strongly controlled aerospace testing and launch scenarios, reduce personnel support costs, improve testing and launch efficiency, and rely on high bandwidth and wide coverage of internet resources, a remote testing and launch control system based on internet protocol version 6 (IPV6) and cloud services is designed, it is suitable for commercial launch missions with open information, includes core testing and launch networks, cloud service networks, remote testing and launch networks; Technicians can remotely access the core testing and launch network through the remote testing and launch network to perform the testing and launch tasks; In the internet protocol version 4 (IPV4) network environment, the cloud service network realize the data forwarding of the core and remote networks; In the IPV6 network environment, the cloud service network builds a network tunnel for the core and remote networks, so that the two networks can communicate directly to save cloud service network resources; After testing, the remote communication function is realized in both network environments, IPV6 network environments have lower transmission latency and cloud server resource usage, proved that the system has the advantages of low network construction cost and flexible location, it can reduce mission support costs.

Keywords: remote testing and launch control; IPV6; cloud services; internet; direct connection communication

0 引言

近年来, 随着火箭等无人飞行器产业如火如荼的发展, 越来越多的公司加入了该领域的竞争, 对成本的压缩程度已经关系到企业的发展前景和生存空间。目前航天测试和发射通常需要大量的专业技术人员前往现场保障, 技术人员通过实时监视测发控显示终端的各项参数并判读, 确保测试和发射任务的顺利执行^[1-4]。现场保障的技术人员少则数十人, 多则上百人, 衣食住行费用是一笔高昂的支出, 在经费有限的项目中, 多人现场保障的模式将会导致巨大

的资金压力。随着商业化航天发射需求量的不断增涨, 大量民营企业的入局竞争, 降低测试和发射成本、提高发射密度将会是未来的发展趋势和生存法则^[5]。

国外航天发射场的测试和发射趋势是尽可能提高发射区的工作效率, 通过箭地测试网络一体化设计、合理分配箭地操作流程、精简发射区测试项目、提高发射区地面设施集成度、采用远程网络测试与判读等措施, 尽量减少发射工位占用时间, 缩短火箭的发射周期, 从而降低人员保障和场地使用费用, 如猎鹰九号火箭的平均发射周期已经

收稿日期: 2024-04-06; 修回日期: 2024-05-10。

作者简介: 邹凯(1989-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 邹凯, 赵岩, 李海伟, 等. 基于 IPV6 和云服务的异地远程测发控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 1-6, 22.

缩短至约两周时间，两个发射场的最短发射时间间隔已经缩短至数小时。我国现有的航天发射场均建设于 20 世纪，按照“建用一体”的建设管理模式，各系统独立开展建设，自成体系，信息共享程度不高^[6-7]。现有发射任务的远程保障普遍基于已搭建的专用网络，远程保障的地点固定且网络带宽资源有限，使用便利性较低，不适用于高密度的商业发射任务^[8]。目前，国内各商业航天公司正在积极建设商业发射场，其中测发控网络也亟需开展顶层设计^[7,9-11]，以满足低成本和高密度的发射任务需求，实现测试和发射场资源的高效利用。

为降低测试和发射任务的技术保障成本，提高技术人员使用的便利性和工作效率，本文结合 IPV6 (Internet Protocol Version 6) 技术和云服务技术，提出一种异地远程测发控系统，适用于信息公开的商业发射任务，在远程执行测发控保障任务时仅依托互联网，无需搭建专用通信网络，具有网络搭建成本低、使用地点灵活、网络带宽高和降低任务保障成本的优点。在测试和发射现场，仅需保留操作人员和关键技术人员，而其他技术人员可以在单位或家中通过互联网远程接入测试和发射现场的测发控系统，提供从测试到发射全程的技术保障。因此，能够显著减少测试和发射现场人员数量，达到节省保障费用的目的。此外，技术人员通过测发控系统能够同时接入多个不同地点的测试和发射现场，实现多任务的快速切换，延长有效工作时间，提高工作效率，满足未来高密度的“航班化”测发模式。

1 系统组成

1.1 网络组成

本文提出基于 IPV6 和云服务的异地远程测发控系统，主要包括核心测发网络、云服务网络、异地终端网络三部分，如图 1 所示。

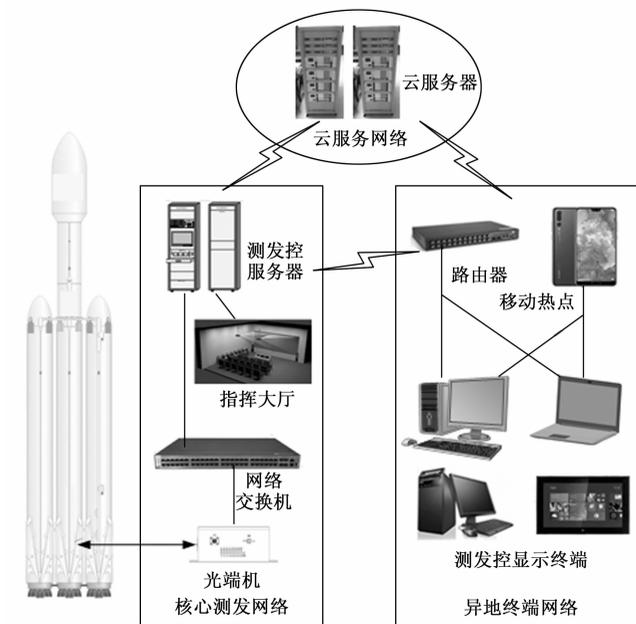


图 1 异地远程测发控系统架构

1.2 核心测发网络

核心测发网络位于测试和发射现场，主要负责获取飞行器下传的遥测数据并进行处理和分发，同时向飞行器发送测发控指令，实现飞行器与地面的指令与数据交互。核心测发网络以光纤作为载体与飞行器的前端测发控设备通信，以保证指令和数据的高可靠和低延迟传输。

核心测发网络的硬件平台采用标准化机架服务器，下文称为“测发控服务器”，根据功能需求运行实时或非实时操作系统，能够通过应用软件定义不同的测发功能模块，具有无缝扩展和快速重构能力，可以实现飞行器的在线故障诊断、健康管理、实时仿真、飞行参数辨识和数字孪生等功能。

1.3 云服务网络

云服务网络主要负责为核心测发网络和异地终端网络搭建网络隧道，构建虚拟局域网，实现核心测发网络与异地终端网络的网络穿透，同时负责对接入核心测发网络的异地终端设备进行权限管控，保障遥测数据和测试指令的异地安全传输，避免测发控信息被泄露和篡改，防止未授权人员对测发控网络的非法入侵。

同时，通过在云服务网络搭建数据综合平台，能够对火箭的历次测试数据进行存储、分析和比对^[12]。技术人员可以通过核心测发网络和异地终端网络接入云服务网络查询数据，实现数据的异地共享，为未来可重复使用火箭全寿命周期历次飞行数据的分析、比较和自主故障诊断提供支撑^[13]。

云服务网络中使用的“云服务器”，需要具有公网固定 IP 地址，可选择自建服务器，或租用国内服务器运营商的云服务器。

1.4 异地终端网络

异地终端网络是技术人员在异地执行测试和发射保障任务时，接入测发控系统的网络，主要包括用于显示解析后遥测数据和发送测试指令的“测发控显示终端”，以及用于接入测发控网络的交换机、路由器、光猫、移动热点等设备，测发控显示终端可使用工作站、台式计算机、笔记本电脑、平板电脑等设备。

技术人员通过测发控显示终端，能够远程监视飞行器各项参数的正确性，并按照任务执行流程向飞行器发送测试指令，实现测发控任务的远程保障。此外，通过访问云服务网络与核心测发网络，技术人员能够对飞行器的历史测试数据进行查询和判读。

1.5 网络接入方式

本文提出的异地远程测发控系统依托互联网建立远程通信，核心测发网络和异地终端网络的互联网接入方式通常为有线网络运营商提供的光纤、宽带等网络，或由移动网络运营商提供的移动网络。常用的网络协议主要包括 IPV4 (Internet Protocol Version 4) 与 IPV6 两种，目前部分有线网络运营商仅提供 IPV4 协议网络，而移动网络运营商和部分有线网络运营商则同时提供 IPV4 和 IPV6 协议网络。

在使用基于 IPV4 协议的网络地址分配机制时, 由于地址长度 32 位 (4 字节) 的限制, 理论最多支持 42 亿个 IP 地址, 其中具有固定功能的 IP 地址网段无法作为公网 IP 地址, 能够使用的公网 IP 数量更少。因此, 网络运营商通常使用 NAT (Network Address Translation) 机制为用户提供网络接入, 即以小区、街区、公司或学校等区域为单位, 组建 1 层或多层内网, 共享同一个公网 IP 地址。处于内网中的各终端仅会被分配到内网 IP 地址, 无法通过公网直接访问, 若有访问需求, 需要经过 NAT 机制进行网络地址转换^[14]。

核心测发网络中的测发控服务器和异地终端网络中的测发控显示终端, 若使用 IPV4 协议接入互联网, 所分配到的 IP 地址均为内网 IP 地址。在 IPV4 协议的网络下, 由于测发控服务器或测发控显示终端使用内网 IP 地址, 无法直接互联网访问和数据发送, 必须通过云服务网络对数据进行转发^[15-16]。

例如, 测发控显示终端的互联网接入需要经过路由器、光猫 (路由模式) 和运营商网路服务器等设备, 若要访问具有公网固定 IP 的云服务器, 需要经过 NAT 机制进行网络地址转换, 转换示意如图 2 所示。



图 2 测发控显示终端与云服务器通信示意

在图 2 中, 当测发控显示终端需要向云服务器发送测试指令时, 指令数据包从测发控显示终端发出, 源地址为其自身的内网 IP 地址 192.168.1.3, 目标地址为云服务器的公网固定 IP 地址 10.96.11.23; 当数据包通过路由器发出时, 源地址被替换为路由器的地址 192.168.1.1, 目标地址无变化; 当数据包由光猫发出时, 源地址被替换为光猫的地址 100.64.10.2, 目标地址不变; 当数据包由运营商网络服务器发出时, 源地址被替换为网络服务器的公网 IP 地址 45.123.157.11, 目标地址不变, 最终数据包经过运营商其他网络节点转发后, 到达云服务器。

在图 2 中, 当云服务器向测发控显示终端发送飞行器遥测数据时, 遥测数据包从云服务器发出, 源地址为其自

身的公网固定 IP 地址 10.96.11.23, 目标地址为网络服务器的公网 IP 地址 45.123.157.11; 当数据包通过网络服务器发出时, 源地址无变化, 目标地址变为光猫的地址 100.64.10.2; 当数据包由光猫发出时, 源地址不变, 目标地址被替换为路由器的地址 192.168.1.1; 当数据包由路由器发出时, 源地址不变, 目标地址被替换为测发控显示终端的地址 192.168.1.3, 最终数据包抵达测发控显示终端。

而基于 IPV6 协议的网络由于网络地址长度达到 128 位 (16 字节), 相较 IPV4 协议可以提供 2^{96} 倍的 IP 地址容量, 理论上全世界的每个终端都可被分配到唯一的 IPV6 地址^[14]。因此 IPV6 协议为设备间的直接访问提供了可能性。基于 IPV6 协议的网络, 为测发控服务器和测发控显示终端之间数据直接传输提供了条件。

2 测发控系统设计

2.1 网络架构

下面对本文提出的异地远程测发控系统搭建网络模型, 如图 3 所示。该测发控网络包括:

- 1) 位于测试和发射场核心测发网络的“测发控服务器”, 作为测发控网络中的终端设备;
- 2) 云服务网络中具有公网固定 IP 地址的“云服务器 (主)”和“云服务器 (备)”, 通过设置主备服务器, 实现云服务功能的冗余备份;
- 3) 位于异地终端网络中的“测发控显示终端 1”和“测发控显示终端 2”, 同样作为测发控网络中的终端设备。

当测发控服务器、测发控显示终端 1/2 首次访问云服务器 (主/备) 时, 会被分配到唯一的终端 ID, 云服务器保证各终端的 ID 均不同。此时, 测发控服务器、测发控显示终端 1/2 能够实现与云服务器 (主/备) 的加密通信, 但此时各终端之间还不能够互相访问。

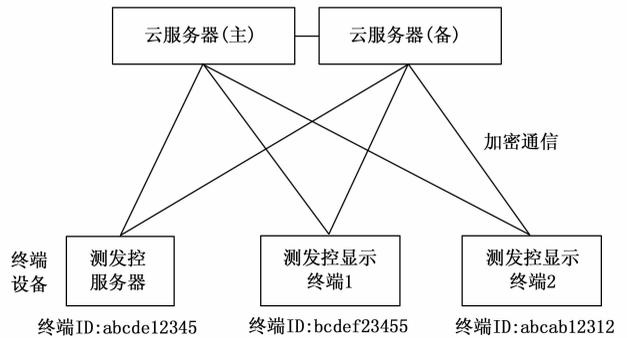


图 3 终端与云服务器连接

为实现各终端的互相访问, 在云服务器 (主/备) 中设置网络权限控制器。如图 4 所示, 网络权限控制器根据测发控任务, 生成唯一的网络 ID, 并可根据任务需求, 依照终端 ID 将各终端按需加入到本次任务的测发控网络中, 并将网络 ID 分发给授权的终端。仅加入到本次任务中具有相同网络 ID 的终端才可进行数据传输, 避免不同任务之间产

生数据误传输。网络权限控制器可通过账户和密码登陆云服务器的 WEB 页面进行各终端授权信息的配置。

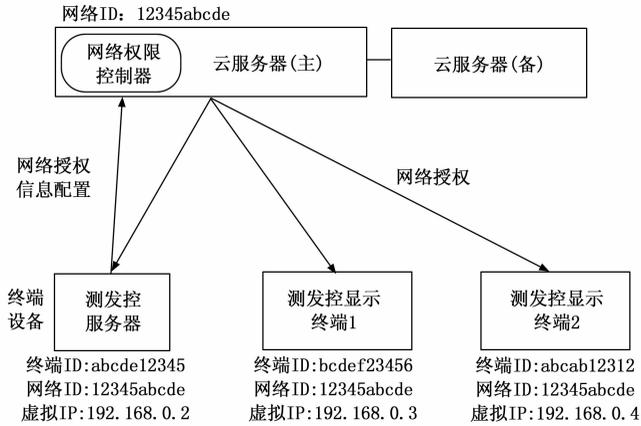


图 4 网络权限控制器分配网络 ID

为使本文的测发控系统兼容现有的测发控软件^[17]，各终端设备采用虚拟网络 IP 为测发控软件提供网络地址信息。通过将网络 ID 与终端 ID 组合，为每个终端生成唯一的 ID 信息，并与本终端的虚拟 IP 地址进行绑定，如表 1 所示。云服务器（主/备）负责对各终端的网络 ID、终端 ID 和绑定的虚拟 IP 地址进行记录。

表 1 各终端与虚拟 IP 地址

序号	终端	网络 ID	终端 ID	绑定虚拟 IP
1	测发控服务器	12345abcde	abcde12345	192. 168. 0. 2
2	测发控显示终端 1	12345abcde	bcdef23456	192. 168. 0. 3
3	测发控显示终端 2	12345abcde	abcab12312	192. 168. 0. 4

下文以测发控服务器向测发控显示终端 1 发送飞行器遥测数据为例，说明遥测数据传输的途径，测发控显示终端向测发控服务器发送测试指令的方法与此相同，传输方向相反。

当测发控服务器需要向测发控显示终端 1（虚拟 IP: 192. 168. 0. 3）传输数据时，测发控服务器根据网络 ID: 12345abcde，在云服务器中搜索此网络 ID 中具有虚拟 IP: 192. 168. 0. 3 的终端，当搜索到测发控显示终端 1 具有此虚拟 IP 后，需要根据测发控服务器和测发控显示终端 1 网络环境的实际情况进行选择。

2.2 基于 IPV4 的数据传输

当测发控服务器或测发控显示终端 1 仅有 IPV4 协议网络时，测发控服务器无法直接向测发控显示终端 1 发送数据，需要使用云服务器对数据进行转发。

如图 5 所示，测发控服务器和测发控显示终端 1 均为 IPV4 协议网络，测发控服务器发送的数据经 NAT 地址转换后发送到云服务器，云服务器向测发控显示终端 1 发送数据时，同样需要经过 NAT 地址转换。在这种模式下，数据传输速率受到云服务器自身接收和发送数据带宽的限制。由于云服务器的数据传输带宽与运营商的网络服务费用或

租用服务器的租金成正比，因此若要实现较高的数据传输速率，需要支付更多的费用。

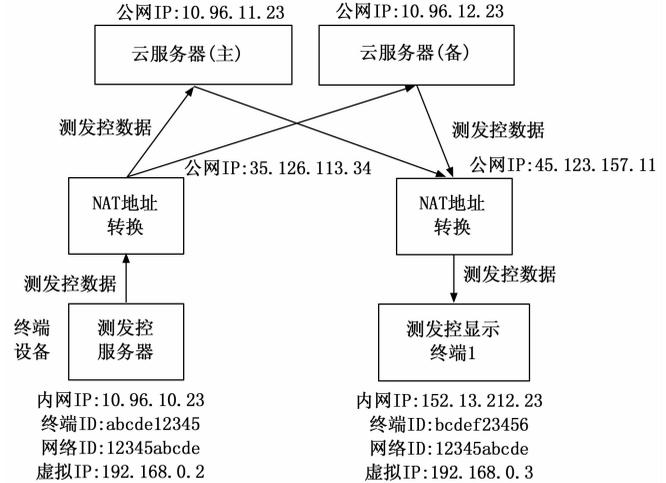


图 5 基于 IPV4 的遥测数据传输

2.3 基于 IPV6 的数据传输

在保证数据传输速度的前提下，为降低云服务器的搭建成本，本文的异地远程测发控系统使用了基于 IPV6 网络协议的数据传输功能。在测发控服务器、测发控显示终端 1 双方均包含 IPV6 网络协议且具有公网 IPV6 地址的情况下，云服务器能够为双方建立基于 IPV6 网络协议的数据传输隧道，实现数据的直接传输，如图 6 所示，具体步骤如下：

1) 在通过 IPV4 网络协议连接至云服务器时，测发控显示终端 1 同步检测并获取到自身的 IPV6 地址（2409: 8900: 372f: cd30: ad7f: fee3: 3b11: 5876），将地址信息通过 IPV4 协议发送至云服务器，云服务器对该 IPV6 地址信息进行登记；

2) 云服务器收到测发控显示终端 1 的 IPV6 地址信息并登记后，立刻将此信息通过 IPV4 网络协议发送至具有相同网络 ID 的其他终端设备，从而使各终端得到测发控显示终端 1 的 IPV6 地址；

3) 测发控服务器在获取测发控显示终端 1 的 IPV6 地址后，尝试通过此地址与测发控显示终端 1 建立网络连接，在连接成功后直接通过此 IPV6 地址向测发控显示终端 1 发送遥测数据。

由于网络运营商提供的公网 IPV6 地址通常为动态地址，该地址会定期变化。若测发控显示终端 1 的公网 IPV6 地址发生变化，将导致测发控服务器无法通过变化前的 IPV6 地址向测发控显示终端 1 发送数据。因此，设置测发控显示终端 1 按照固定周期对自身的 IPV6 地址进行检测，当发现地址发生变化时，立刻向云服务器发送当前的 IPV6 地址信息。收到此 IPV6 地址信息后，云服务器立刻向具有相同网络 ID 的其他终端设备发送此信息，使各终端设备更新测发控显示终端 1 的 IPV6 地址信息为当前的状态，保证测发控服务器能够向测发控显示终端 1 发送数据。

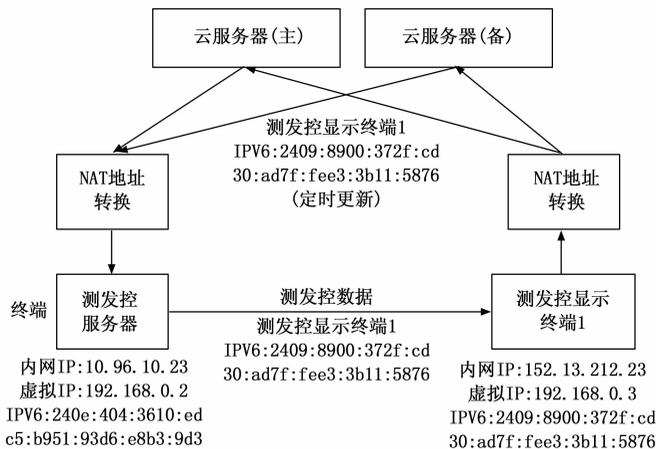


图 6 基于 IPV6 的遥测数据传输

在基于 IPV6 网络协议进行遥测数据传输时, 传输带宽仅与测发控服务器、测发控显示终端 1 的网络带宽有关, 云服务器仅需要传输各终端设备的 IPV6 地址等信息, 因此可以显著降低遥测数据传输对云服务器带宽的占用, 使云服务器为其他任务分配更多的空闲带宽, 并能够降低云服务器的搭建成本。

2.4 数据加密

为防止在执行测试和发射任务时, 测发控数据被泄露和篡改, 或未授权人员对测发控网络的非法入侵, 需要对测发控网络数据进行加密。

本文采用 SSH (Secure Shell) 端口转发实现数据的加密传输^[18-20]。SSH 是一种有状态的客户端-服务端协议, 其由三层组成, 包括传输层、用户身份验证层和连接层。当测发控服务器和测发控显示终端启动连接时, 传输层在网络通信的 TCP/IP 协议上设置一个安全的通信通道。该通道提供完整性、保密性、服务器身份验证, 并可能提供数据压缩。在传输层建立安全通道后, 客户端身份验证由用户身份验证层处理。最后, 建立一个或多个 SSH 应用程序通信通道, 这些通道可以用于各种目的, 比如提供交互式命令行、端口隧道等^[21-22]。

通过 SSH 自动加密测发控服务器与测发控显示终端之间的网络数据, 同时提供端口转发功能, 由于核心测发网络中使用防火墙对网络端口进行了限制, 通过 SSH 连接, 能够实现 TCP 协议的端口转发。

3 网络通信测试

3.1 测试条件

为验证测发控系统的远程通信性能, 搭建网络数据传输测试平台, 包括数据发送计算机、云服务器和数据接收计算机三部分。数据发送计算机向数据接收计算机发送模拟数据和模拟指令, 从而模拟遥测数据和测试指令在 IPV4 网络协议和 IPV6 网络协议下的传输, 测试的主要参数包括遥测数据和测试指令传输的平均延迟时间、最大延迟时间和误码率。

数据发送计算机主要网络接入指标如表 2 所示。

表 2 数据发送计算机主要网络接入指标

序号	项目	内容
1	数据发送计算机 IPV4 地址	10.96.10.23(内网地址)
2	数据发送计算机 IPV6 地址	240e:404:3610:edc5:b951:93d6:e8b3:9d3(公网地址)
3	网络通信实测下行速率	90.88 Mbps
4	网络通信实测上行速率	37.07 Mbps

本文中数据发送计算机发送模拟数据的最高速率为 10 Mbps, 发送模拟指令的最高速率为 500 kbps, 根据表 2 中的网络连接速率测试结果, 上行速率为 37.07 Mbps, 高于模拟数据和模拟指令传输速率的需求, 因此, 数据发送计算机的网络接入速度不会成为模拟数据和模拟指令的传输瓶颈。

数据接收计算机主要网络接入指标如表 3 所示。

表 3 数据接收计算机主要网络接入指标

序号	项目	内容
1	数据接收计算机 IPV4 地址	152.13.212.23(内网地址)
2	数据接收计算机 IPV6 地址	2409:8900:372f:cd30:ad7f:fee3:3b11:5876(公网地址)
3	网络通信实测下行速率	60.52 Mbps
4	网络通信实测上行速率	58.48 Mbps

根据表 3 中的连接速率测试结果, 网络通信下行速率为 60.52 Mbps, 高于模拟数据传输速率最高 10 Mbps 和模拟指令传输速率最高 500 kbps 的需求。因此, 测发控显示终端的网络接入速度不会成为模拟数据和模拟指令的传输瓶颈。

通过将云服务器的最高数据传输带宽分别限制在 5 Mbps 和 20 Mbps 两种状态, 用以验证云服务器的数据传输速度对数据发送计算机和数据接收计算机之间数据传输性能的影响。

3.2 测试方法

针对本文的测发控系统, 开展验证测试项目如下:

1) 数据发送计算机向数据接收计算机发送模拟数据时, 传输协议使用 UDP 组播, 将模拟数据速率分别设置为 1、5、10 Mbps 三种状态, 验证云服务器的数据传输带宽对不同模拟数据传输速率的影响, 数据接收计算机持续接收 5 min 模拟数据, 通过将接收数据与发送数据进行比较, 可以计算模拟数据传输的丢帧率; 在数据发出和接收时刻, 分别参照北京时间在数据中加入时标信息, 可以统计从数据发出至数据接收的最大延迟时间和平均延迟时间;

2) 数据发送计算机向数据接收计算机发送模拟指令, 传输协议使用 TCP/IP 方式, 指令长度为 108 字节, 在指令发出和接收时刻, 分别参照北京时间加入时标信息, 测试中共发送 50 条指令, 统计从指令发出至收到指令的最大延迟时间和平均延迟时间。

为测试在 IPV4 与 IPV6 协议下的数据传输性能差别,

首先在数据发送计算机和数据接收计算机的网络适配器设置中,将二者的 IPV6 协议功能禁用,仅通过 IPV4 协议接入网络,并开展测试;随后,将二者的 IPV6 协议功能启用,再次开展测试。对测试数据进行记录和整理,并在测试后进行统计和分析。

3.3 测试结果

数据发送计算机向数据接收计算机发送模拟数据,在不同测试环境下,模拟数据的丢帧率如表 4 所示。

表 4 模拟数据传输丢帧率统计

序号	云服务器带宽限制	连接方式	模拟数据速率	丢帧率/%
1	5 Mbps	IPV4	1 Mbps	2.78
2			5 Mbps	4.38
3			10 Mbps	67.29
4		IPV6	1 Mbps	2.39
5			5 Mbps	3.34
6			10 Mbps	5.28
7	20 Mbps	IPV4	1 Mbps	2.69
8			5 Mbps	4.56
9			10 Mbps	7.82
10		IPV6	1 Mbps	2.54
11			5 Mbps	3.75
12			10 Mbps	6.02

由表 4 的测试结果可以看出:

1) 使用 IPV4 和 IPV6 协议进行数据传输时,随着模拟数据传输速率的提高,数据的丢帧率随之提高,其主要原因因为数据发送协议使用 UDP 组播方式,发送方对接收方是否收到正确的数据不做判断和重新传输,受到网络稳定性的影响,模拟数据速率提高导致丢帧率提升;

2) 使用 IPV4 协议进行数据传输时,需要依靠云服务器转发,若云服务器的最大带宽被限制在 5 Mbps,当数据速率为 10 Mbps 时,数据的丢帧率高达 67.29%,将云服务器的数据传输带宽提高至 20 Mbps 后,丢帧率下降至 7.82%,由此可见,使用 IPV4 协议传输模拟数据将占用大量的云服务器数据传输带宽,若超过云服务器的最大传输能力,将出现数据大量丢失的情况;

3) 使用 IPV6 协议进行数据传输时,数据能够直接由数据发送计算机发送至数据接收计算机,因此数据的丢帧率不受云服务器数据传输带宽的影响,并能够有效节省云服务器的数据传输带宽。

在不同测试环境下,模拟数据的传输延迟时间如表 5 所示。

由表 5 的测试结果可以看出:

1) 使用 IPV4 和 IPV6 协议进行数据传输时,随着数据传输速率的提高,平均延迟时间逐渐提高,主要因为云服务器和其他网络设备对数据转发的延迟时间略有提升,而最大延迟时间具有一定随机性,与测试期间的网络性能有关;

表 5 模拟数据传输延迟时间统计

序号	云服务器带宽限制	连接方式	模拟数据速率	平均延时	最大延时
1	5 Mbps	IPV4	1 Mbps	1.7 s	5.3 s
2			5 Mbps	2.9 s	6.1 s
3			10 Mbps	30 s	1.5 min
4		IPV6	1 Mbps	1.0 s	7.8 s
5			5 Mbps	1.2 s	7.1 s
6			10 Mbps	1.9 s	8.2 s
7	20 Mbps	IPV4	1 Mbps	1.1 s	4.1 s
8			5 Mbps	1.4 s	5.9 s
9			10 Mbps	1.8 s	5.8 s
10		IPV6	1 Mbps	0.9 s	5.2 s
11			5 Mbps	1.3 s	6.5 s
12			10 Mbps	1.7 s	6.2 s

2) 使用 IPV4 协议进行模拟数据传输时,若云服务器的最大带宽被限制在 5 Mbps,当测发控数据速率为 10 Mbps 时,数据传输的平均延迟时间高达 30 s,最大延迟时间为 1.5 min,将云服务器的数据传输带宽提高至 20 Mbps 后,数据传输的平均延迟时间减低至 1.8 s,最大延迟时间降低为 5.8 s,由此可见,当数据速率超过云服务器的最大传输速率时,服务器将发生堵塞,影响正常通信;

3) 使用 IPV6 协议进行模拟数据传输时,由于数据能够由数据发送计算机直接发送至数据接收计算机,因此数据的传输延迟时间与云服务器的数据传输带宽无关。

通过数据发送计算机向数据接收计算机发送模拟指令,测试指令传输延迟时间如表 6 所示。

表 6 模拟指令传输平均延迟时间统计

序号	云服务器带宽限制	连接方式	平均延时/ms	最大延时/ms
1	5 Mbps	IPV4	107.91	507.25
2		IPV6	92.82	205.63
3	20 Mbps	IPV4	114.29	498.10
4		IPV6	89.41	310.73

在测试全程无误码,由表 6 的测试结果可以看出:通过 IPV6 协议进行模拟指令直接通信发送的传输延迟略低于通过 IPV4 协议进行云服务器转发的传输延迟,因此在 IPV6 协议下能够降低模拟指令传输的延迟时间。

综上,本文搭建的测发控系统测试平台在遥测数据传输速率不超过云服务器带宽时,主要技术参数如表 7 所示。

表 7 主要技术指标

序号	项目	连接方式	平均延时	最大延时	误码率
1	遥测数据	IPV4	优于 2.9 s	优于 6.1 s	不超过 7.82%
2		IPV6	优于 1.9 s	优于 8.2 s	
3	测试指令	IPV4	优于 114.29 ms	优于 507.25 ms	0%
4		IPV6	优于 92.82 ms	优于 310.73 ms	

(下转第 22 页)