

DRAGON-Lab——新一代互联网技术综合实验验证平台

王继龙^{①②}, 李钟辉^②, 吕国晗^②, 姜彩萍^②, 李星^{①②}, 张千里^{②*}

① 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

② 清华大学信息网络工程研究中心, 北京 100084

* E-mail: zhang@cernet.edu.cn

收稿日期: 2008-06-03; 接受日期: 2008-08-21

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2003CB314807)和中国高技术研究发展计划(批准号: 2005AA112130)资助项目

摘要 实验平台在互联网技术的发展进程中具有举足轻重的作用, 不仅互联网自身起源于实验平台, 下一代互联网研究也起始于实验平台建设. 互联网实验平台大体可分为 2 类: 实验网络, 如 CNGI-CERNET2, Internet2, Geant 等; 实验系统, 如 PlanetLab, NS2 等. DRAGON-Lab 具有实验网络和实验系统双重特征. 首先, DRAGON-Lab 是互联网上独立的 AS(autonomous system), 紧密依托多个生产网络, 具有鲜明的实验网络特点. 其次, DRAGON-Lab 整合了大量实验资源, 包括自有资源、伙伴资源和互联网上的开放资源, 能够提供开放的定制实验服务. DRAGON-Lab 的主要技术特点是规模大、开放性、支持远程可视化实验和可编程实验. 文中介绍了 DRAGONLab 的体系结构设计和关键实验技术.

关键词

互联网
实验平台
联邦

互联网起源于实验平台, 实验平台在互联网技术的发展进程中一直占据重要位置^[1~3]. 今天, 新一代互联网研究的浪潮正席卷全球^[4], 在探索和设计未来互联网的工作中, 实验平台也必然再次扮演重要角色. 事实上, 下一代互联网研究正是起萌于实验平台建设. 1997 年, 美国政府启动下一代互联网研究计划——NGI (next generation internet)^[5], 而 NGI 计划最直接的成果就是一个实验床 vBNS. 此后数年间, Internet2^[6], Geant^[7], CNGI^[8] 等实验网络项目拉开了全球性下一代互联网研究的帷幕.

互联网实验平台大体可分为 2 类: 实验网络, 如 CNGI-CERNET2^[8], Internet2^[6], Geant^[7] 等; 实验系统, 如 PlanetLab^[9] 等. 实验网络具备生产网络的特点, 而且一般情形下都会是全球互联网的一部分. 实验网络能够较好支持对现有互联网问题的研究和新技术的验证. 但是由于实

验网络与Internet具有紧密的关系, 往往承载大量用户, 使得实验网络上的实验成本很高, 通常只面向成员单位, 一般不响应其他研究者的实验需求. 实验网络的建设成本较高, 对成员单位往往有一定要求. 而且即便是成员单位, 也不能随意进行实验. 相比之下, 实验系统一般具有建设成本低、开放性强、实验方便灵活等特点. 但是实验系统只是模拟或仿真平台, 不具备生产网络特点, 实验验证能力具有局限性.

近期, 美国和欧盟相继启动了新的互联网技术实验平台项目GENI^[10]和FIRE^[11]. GENI和FIRE都考虑到了对实验网络和模拟仿真平台的整合问题. 例如, 其中的FIRE主要包含PanLab (Pan-European laboratory)^[12]和OneLab (open networking laboratory)^[13], 这2个实验床侧重于现有欧洲各个实验床的联邦. PanLab的主要目的是, 建立一个更大规模的实验床联邦, 从而使得新服务、新概念、新架构的验证和评估更加容易, 目前, PanLab已经有11个参与单位. OneLab则侧重于在欧洲扩展PlanetLab的服务. 不过, 目前PanLab和OneLab主要还是在模型定义阶段, 对于如何进行资源整合、如何能够定义和开展实验服务, 仍然处于探索阶段.

DRAGON-Lab 是一个基于联邦架构的大规模互联网技术合作研究平台. 其中联邦是一种独特的合作形式. 联邦的2个要素是: 自治与合作. 即联邦中的资源由各成员自主投入, 自行维护, 自愿合作. 联邦是一种松耦合的合作形式, 成员投入的资源可能不是稳定的, 但是具有一定规模后, 随机效应的影响会逐渐降低, 而优势非常明显, 即发展和运行成本低, 可持续发展能力强.

DRAGON-Lab 的主要技术特点可以归纳为以下几个方面:

- 基于联邦架构的资源开发模型. DRAGON-Lab 面向全球研究者开放自身拥有的网络和设备资源, 以联邦的形式积极开展国际间合作, 重视对互联网上开放资源的利用. 目前, DRAGON-Lab 上已建成全球最大的分布式测量实验系统.

- 有限目标. DRAGON-Lab 并不奢望支持所有的互联网技术实验需求, 而是把重点集中于对流量研究、主动测量和 BGP 路由研究方面的支持.

- 远程可视化实验配置和环境自动生成. DRAGON-Lab 是一个远程实验室, 使用一个专用客户端程序就能够以可视化的方式远程定制实验环境.

- 可编程实验. DRAGON-Lab 提出了可编程实验的创新思想. 通过把实验环境定义转化为可执行的实验脚本程序, 提高了实验的可重复性.

本文后续各章节分别介绍了 DRAGON-Lab 的体系结构设计、创新实验技术和关键服务.

1 DRAGON-Lab 体系结构

1.1 DRAGON-Lab 体系结构

DRAGON-Lab 体系结构模型如图 1 所示. DRAGON-Lab 具有 4 层体系结构: 物理层、业务逻辑层、管理调度层和用户逻辑层. 分层原则可以屏蔽底层实现细节, 提高可扩展性和开放性. 物理层由各类物理资源构成, 如路由器、交换机、服务器、测试仪表等, 既包括自有资源, 也包括合作伙伴资源和互联网上的开放资源. 使用物理层资源之前, 必须为其创建 DRAGON-Lab 驱动程序. 业务逻辑层包含所有实验资源的驱动及其在 DRAGON-Lab 中的逻

辑实体或称为管理应用接口. 用户真正可见的是逻辑实体, 物理层实体的驱动对用户透明. 这样的设计便于整合各种异构的设备和资源, 增加设备只需增加一个驱动, 设备的规格型号乃至物理位置对上层透明. 管理调度层主要负责实验调度和管理, 包括对实验方案进行符合性检查, 生成实验脚本, 安排实验时间, 并按指定时间加载实验环境. 这一过程中对底层设备的操作通过调用业务逻辑层功能实现. 用户通过一个专用客户端程序选择实验资源, 设计并提交实验方案. 实验环境的搭建由 DRAGON-Lab 自动完成. 在用户服务层, 看到的是经过封装的实验资源, 称为 DRAGON-Lab 服务, 关于 DRAGON-Lab 服务的详细描述见本文第 3 节.

1.2 实验资源

DRAGON-Lab 整合的实验资源包括以下 3 类:

1) 自有资源.

DRAGON-Lab 有丰富的自有资源, 主要来自清华大学多年来科研和建设项目的积淀, 具体包括:

- 网络资源. DRAGON-Lab 是互联网上独立的自治域(AS24575) 与 CERNET, CERNET2, NSFCNET 和 TUNET 等网络千兆互联
 - 网络设备. DRAGON-Lab 有来自 Bitway, Huawei, ZTE, Cisco 等多家厂商的核心路由器、核心交换机及低端网络设备
 - 测试仪表. DRAGON-Lab 有 IXIA, Agilent, Sperient, COMPASS 等多个品牌的测试仪表.
 - 服务器. DRAGON-Lab 有 IBM, LENOVO, DELL 等多个品牌的高端服务器和刀片式服务器.
 - 实验装置. DRAGON-Lab 中还有自主研发的实验装置, 支持 IPv4/IPv6 双协议栈, 支持组播通信, 支持 OSPF, BGP 等主要路由协议, 可以根据实验的要求修改系统软件、协议甚至硬件设置. 利用自主研发的实验装置可为前沿学术研究提供商业产品无法提供的定制服务.
- ### 2) 合作伙伴资源.
- 广泛分布的测量节点. DRAGON-Lab 在中国境内有 61 个测量节点, 覆盖所有省份. 在国际, DRAGON-Lab 与其他实验平台积极合作, 与 FINET, NORDUNET, PlanetLab, PerfSonar 等平台结成合作伙伴, 在贡献自身资源的同时, 也获得大量外部资源.
 - 真实互联网流量和路由信息. 在进行必要的去隐私处理后, DRAGON-Lab 提供来自 TUNET 和 CERNET2 的流量数据和路由信息, 既有 IPv4 流量和路由信息, 也有 IPv6 流量和路由信息.
 - 网络监控和测量工具. DRAGON-Lab 获准使用清华大学自主研发的网络测量和监控工具, 用于监测实验过程.
- ### 3) 互联网上的开放服务.

DRAGON-Lab 非常重视对互联网上各种开放服务的开发和利用. 目前, DRAGON-Lab 利用互联网上的开放服务建成拥有近千节点的分布式测量平台, 覆盖全球 100 多个国家.

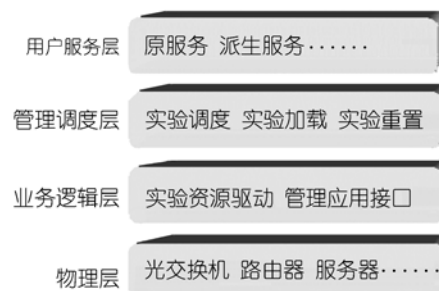


图 1 DRAGON-Lab 体系结构

1.3 交换引擎

DRAGON-Lab 的一大特色在于, 实验环境的搭建由 DRAGON-Lab 自动完成. 这其中交换引擎是实现这一功能的核心部件, 它位于业务逻辑层. 它能够按需连接各种实验资源, 使得 DRAGON-Lab 能够根据用户要求自动生成实验环境. 在交换引擎中, 必须要兼顾各种实验环境生成的需求, 为此, 我们采用了由光交换单元和电交换单元共同组成的架构, 如图 2 所示.

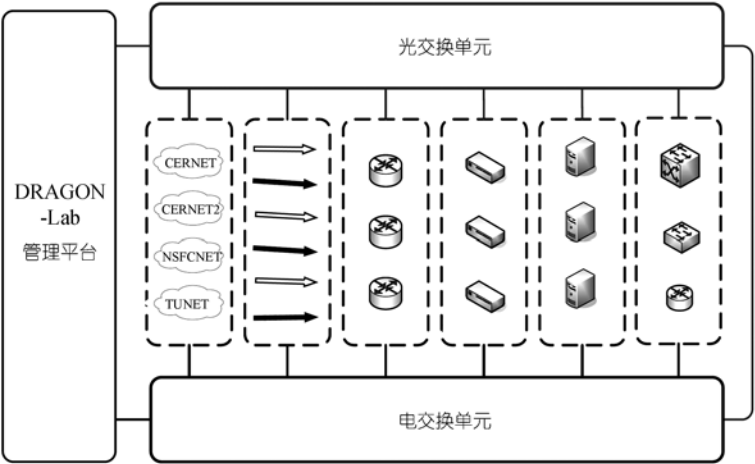


图 2 交换引擎

光交换单元负责各种设备的点到点物理连接, 提供 0 层到 1 层交换能力, 在链路上不会引入额外的性能开销, 适合流量采集分析和设备性能测试等实验.

电交换单元采用以太网交换机技术, 提供 2 层交换能力. 其优势在于拓扑结构灵活, 接口数量比较充裕, 适合完成复杂拓扑结构的搭建. 但由于交换设备自身可能会对数据吞吐量及带宽性能产生影响, 不适合做设备的压力测试和流量分析实验. 电交换单元可作为光交换单元的扩展和备份.

1.4 管理平台

DRAGON-Lab 管理平台由业务逻辑层实体和管理调度层实体共同构成, 结构设计如图 3 所示.

DRAGON-Lab 的调度管理以脚本语言为支撑, 物理资源的驱动都用脚本语言描述, 应用接口 API 则是一个脚本调用, 甚至实验本身也定义为一个可执行的脚本程序. 当增加新的设备资源时, 只需为新设备写一个脚本驱动, 并实现已经定义好的 API 接口, 就可以将新设备投入使用了, 上层管理系统不需要为此做改动.

实验调度上, 目前使用的是串行独占式的调度. 即同一时刻只能加载一个实验, 一个实验完成后, 才能进行下一个实验. 随着实验需求和实验资源的增加, 将考虑实现多用户脚本执行环境.



图 3 DRAGON-Lab 管理平台

1.5 DRAGON-Lab 联邦

一个机构所拥有的实验资源是有限的, 能够投入的开发力量是有限的, 能够直接连接的生产网络是有限的, 能够形成的影响力是有限的. 因此 DRAGON-Lab 的一个重要发展策略是通过广泛合作进行资源整合. 目前互联网上很多知名的实验平台都是由众多机构合作建设并运行的, 如 PlanetLab.

但是目前这种合作存在 2 方面的局限性:

- 一是多个同类平台之间缺乏合作机制. 例如, 目前互联网上有多个知名的分布式测量平台, 但是都是独立运行的, 没有能够彼此合作, 互相补充.
- 二是没有能够充分开发和利用互联网上的开放资源. 仅仅依靠主动发展合作伙伴, 很难迅速形成规模, 并且在客观上浪费大量资源.

DRAGON-Lab 独创了联邦合作架构. 在 DRAGON-Lab 中, 联邦的含义是自治与合作. 即联邦中的资源由各成员自主投入, 自行维护, 自愿合作. 事实上, 联邦是一种合作姿态, 联邦的技术架构取决于实际需求, 我们很难定义一个通用的联邦模型来适应所有的实验需求. 迄今为止, DRAGON-Lab 联邦主要有 3 种形式: 主动联邦、被动联邦和混合联邦, 如图 4 所示.

- 主动联邦指经过双方协商后建立的合作关系. 目前 DRAGON-Lab 主要通过 2 种方式建立主动联邦. 一是与每个可能的合作伙伴协商, 二是加入一个已有的合作群体, 以少量

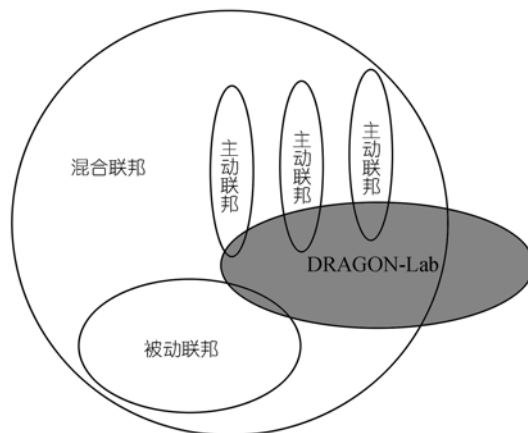


图 4 DRAGON-Lab 联邦合作模型

资源投入一次性获得大量合作伙伴。

- 被动联邦指对互联网上开放资源的整合。互联网上有很多开放的实验资源，只要不存在商业目的，就可以自由使用而不必事先协商。被动联邦的发展成本很低，建设效率非常高。

- 混合联邦是指整合具有相似性质的主动联邦和被动联邦资源，支持特定的实验需求。例如，DRAGON-Lab 整合了多方面的资源，建成了全球最大的分布式测量系统 GPERF。

DRAGON-Lab 通过联邦合作模型实现了网络资源叠加、设备资源叠加、维护开发资源叠加和影响力叠加，以较少的投入迅速整合大量资源。

2 创新实验技术

2.1 远程可视化实验和可编程实验

互联网技术实验研究经常遭遇以下问题：

- 实验场地限制。现场实验往往受限于场地，空间狭小、操作不便、声音嘈杂、室温较低等问题都会给实验造成不利影响。

- 人为误差问题。网络技术实验过程通常包括搭建环境、操作设备和仪表、实验过程控制和获取数据等众多环节，各环节都存在一些人为误差因素，尤其对于一些过程繁琐、现场工作强度比较大的实验，很容易出错，而一旦出错，排错和纠正的难度和成本都比较高。

- 重复实验问题。间隔一段时间后，如果希望重复实验，很可能意味着要重新搭建实验环境，因为其他人在使用实验室时很可能会破坏原有环境。

- 实验效率问题。一次实验从头至尾往往花费很长时间。典型的例子是设备测试，测试一台路由器的各项功能和性能往往要花上 1 周时间，即使之前已经做过很多次类似工作。

DRAGON-Lab 提供了远程可视化实验和可编程实验机制，能够有效解决上述问题。

1) 远程实验环境的可视化定义和自动实现。

实验者能够使用专用客户端程序远程定义实验环境，提交 DRAGON-Lab 自动生成。

2) 可编程实验。

可编程实验的基本技术思想是将实验过程脚本化，自动化，参数化，降低网络实验中事务性和重复性工作的比重。对于用户提交的实验请求，DRAGON-Lab 可自动将其转换为一个可解释执行的实验脚本程序。实验脚本程序可导入、导出和运行，执行脚本程序即可自动生成实验环境。如需修改实验方案，可通过编辑修改脚本程序来完成，这使得实验的复用性大大增强，重复实验也非常简单，只要重新加载实验脚本即可。这一功能使得实验的可重现性、可复用性和可调试性得到极大提高。

2.2 基于通用计算平台的高速流量采集技术

高速网络流量采集往往都依靠专用设备实现，成本较高，不利于发展合作伙伴。为此，DRAGON-Lab 将 nCap^[14] 和 PF_RING^[15] 2 种技术结合起来，实现真正零拷贝和高度并行处理的 Linux 下流量采集系统，在普通 PC 服务器上就能够实现。目前已经实现了原型系统并命名为 mpfring^[16]。

mpfring 提供 2 种数据包采集模式: 单轮询模式和双轮询模式. 其中, 双轮询模式实现了数据包的分步、并行处理, 虽然在采集效率上比单轮询模式要低一些, 但提供了更多的灵活性, 尤其适用于多 CPU 计算环境. 具体来说, 如果我们需要处理的链路数目和系统 CPU 数目相同, 则使用单轮询模式的效果比较好. 但当 CPU 数目多于链路数目时, 使用双轮询模式则能更充分利用 CPU 资源.

2.3 高速 IP 地址随机化技术

DRAGON-Lab 定位于开放的平台, 但是开放一些数据时必须考虑去隐私问题, 如流量信息. 其中一个具体问题就是 IP 地址随机化. 在 IP 地址随机化算法中, 最常见的是保持前缀地址随机化算法. 所谓保持前缀, 就是对于任何 2 个 IP 地址, 如果在映射前它们前 k 比特是相同的, 那么映射后的前 k 比特也相同. 针对以往的保持前缀地址随机化算法性能差的问题, DRAGON-Lab 设计了一系列快速保持前缀算法 (基于比特字符串、基于 Block-tree、基于嵌入字符串、混合算法)^[17], 这些算法比以前的同类算法快 3~8 倍以上, 从而使得高速网络的流量随机化能够实时进行.

3 DRAGON-Lab 重要服务

DRAGON-Lab 提供的服务分为元服务和派生服务. 元服务指 DRAGON-Lab 提供的基本实验资源; 派生服务指在利用元服务 2 次开发后得到的实验系统. 某种意义上讲, 派生服务本身就可以看作是 DRAGON-Lab 上的一个特殊实验, 只不过实验结果是生成一个可以提供服务的平台. 因此派生服务也可以由 DRAGON-Lab 之外的第 3 方来开发.

3.1 元服务

目前, DRAGON-Lab 提供以下元服务:

- 1) 网络实验服务. 利用 DRAGON-Lab 中的网络设备可以搭建各种实验网络, 进行路由、组播、QoS、IPv6、无线、网络管理等方面的实验. 甚至还可以选择一条互联网连接, 把创建的实验网络和互联网联通.
- 2) 系统实验服务. DRAGON-Lab 提供可远程登录和使用的服务器, 可以用来进行网络测量、模拟仿真和应用系统等方面的实验.
- 3) 真实网络流量和路由信息. 在进行必要的去隐私处理后, DRAGON 提供来自 TUNET 和 CERNET2 的流量数据和路由信息, 既有 IPv4 流量和路由信息, 也有 IPv6 流量和路由信息.

3.2 流量研究中心 TRC

流量研究中心 (TRC: traffic research center) 是基于 DRAGON-Lab 自有资源的派生服务. TRC 能够按需导入生产网络流量, 进行必要的处理并存储, 并能够根据实验需要, 按照数据包时间序列重放这些数据包, 从而更好地体现真实网络特征, 再现网络过程, 为实验验证制造“准真实”的网络环境. 如图 5 所示, 整个系统包括 5 部分内容: 数据采集系统、数据存储中心、流量重放系统、控制系统和流量分析系统, TRC 在 DRAGON-Lab 中的实现原理如图 6.

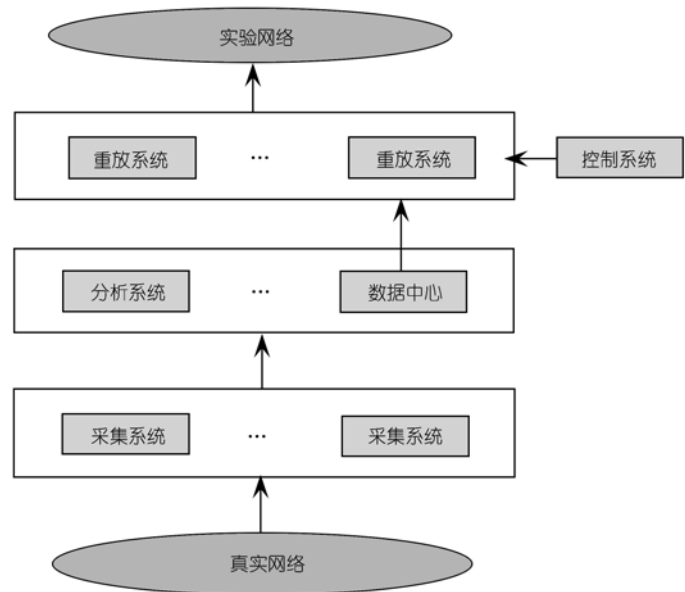


图 5 TRC 体系结构

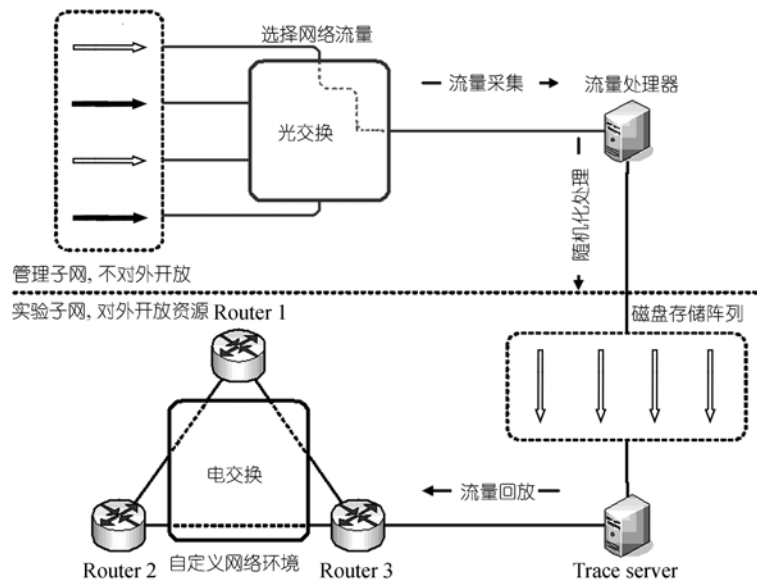


图 6 TRC 在 DRAGON-Lab 中的实现原理图

3.3 路由研究联邦 BGP-Grid

BGP-Grid 是 DRAGON-Lab 的另一项重要派生服务，主要用于支持 BGP 路由策略优化方面的研究和实验，如图 7 和 8 所示。它的基本设计思想如下：

- 1) 为每台边界路由器配置一个镜像设备，镜像设备从边界路由器学习全部的路由信息和策略。

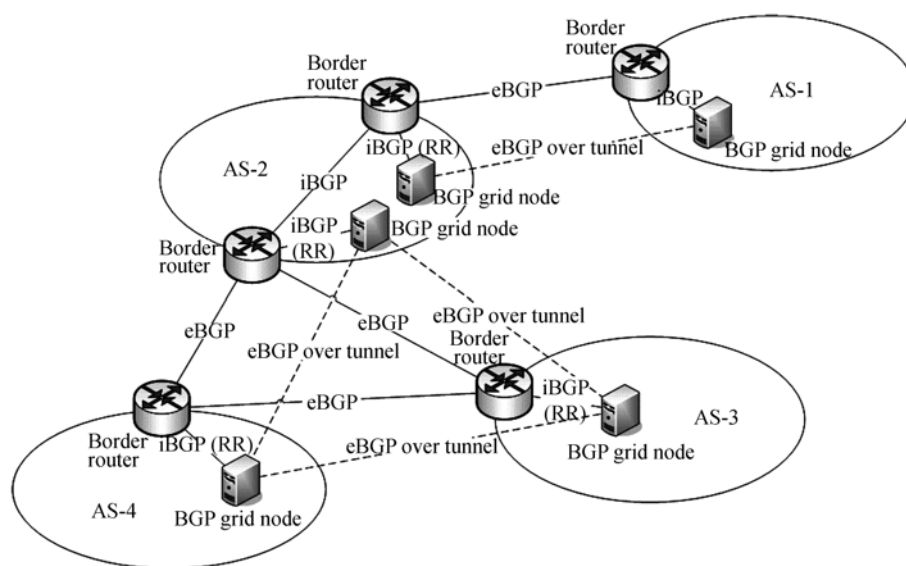


图 7 BGP-Grid 示意图

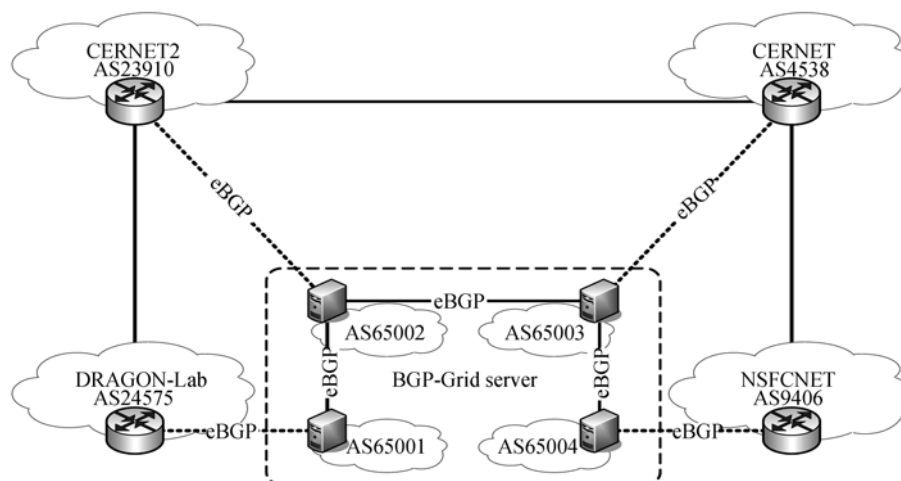


图 8 BGP-Grid 实现原理图

2) 根据伙伴 AS 之间的实际拓扑, 利用隧道技术建立镜像设备之间的连接, 从而能够完全仿真 AS 之间的路由过程, 并能够在不干扰生产网路的情形下, 进行策略优化实验。

BGP-Grid 的实现用到了 DRAGON-Lab 的 Partner 资源, 目前主要合作伙伴包括 CERNET, CERNET2, TEIN2, NSFCNET, IPv6-CJ。

3.4 全球分布式性能测量联邦 GPERF

GPERF 是一项用于主动测量实验的派生服务, 它的目标是支持全球规模的主动测量实验。GPERF 的实现不仅用到了 DRAGON-Lab 的自有资源和 Partner 资源, 还用到了 Internet 上的开

放服务。GPERF 目前在全球范围内已经拥有近千个测量点，是一个典型的混合联邦系统。GPERF 的设计和实现原理如图 9 和 10 所示。

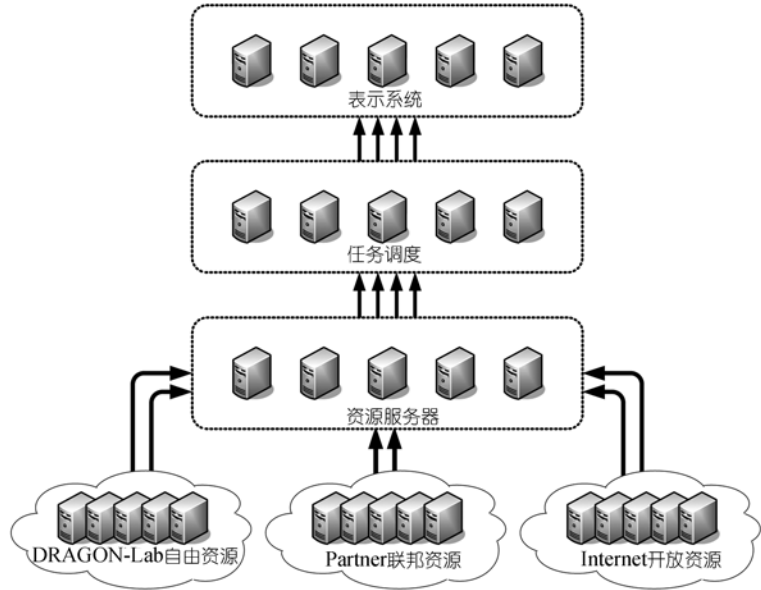


图 9 GPERF 示意图

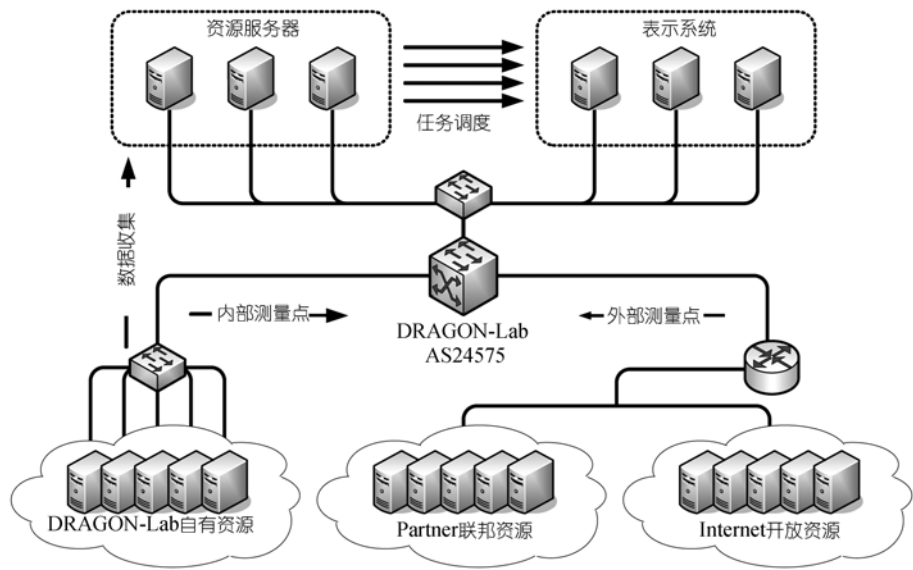


图 10 GPERF 实现原理图

4 DRAGON-Lab 实验过程

在 DRAGON-Lab 实验平台申请并完成一个实验，需经历 5 个步骤：实验定义、实验申请、实验调度、实验加载和实验重置。前 2 个步骤由实验者完成，后 3 个步骤由实验平台管理系统

自动完成。

一个与网络技术和应用相关的实验往往离不开网络设备、服务器、测试仪等设备的支持, 有了明确的实验目的, 实验环境的设计搭建过程可以看作是一个实验拓扑的设计、相关设备端口互联的匹配过程。与传统实验方法类似, 实验者在实验定义阶段完成对实验方案的设计, 包括明确实验目的、实验内容、绘制实验拓扑、分解实验过程等。但与传统实验方法完全不同的是, 基于远程实验平台的实验者只需“纸上谈兵”, 利用实验平台专用客户端, 可视化拖动选择实验设备、设计绘制实验拓扑, 进而向平台系统提交设计好的实验拓扑, 而不需要考虑实验设计方案如何转化成可进行实际实验操作的实验环境, 也不需要亲自到实验室搬运设备、连接调试等操作。新定义一个实验分为 6 个可视化的步骤: 定义新实验、选择实验设备、选择互联端口、设备互联、保存方案、提交方案。

定义好的实验以脚本的方式保存在实验平台管理系统中。实验的启动采用时间预约机制, 实验者需提出实验时间申请, 平台管理系统统筹安排实验时间, 确定预约授权。对于已经取得预约授权的实验, 平台系统将自动发送标题为“DRAGON-Lab 实验时间安排通知”的邮件, 通知具体的实验时间情形。这个过程称为实验调度。

实验加载由平台系统按预约授权自动、顺序执行。首先, 当预约授权时间到达时, 平台系统按保存的脚本自动加载实验方案, 即按照实验定义调度实验设备, 配置设备互联端口, 自动完成实验环境的搭建。同时, 自动向实验申请人发送标题为“DRAGON-Lab 实验就绪通知”, 通知实验者实验环境就绪、实验的登录地址、登录帐号和实验注意事项。在预约授权时间结束前 24 小时, 平台系统将自动向实验申请人发送标题为“DRAGON-Lab 实验结束通知”的邮件, 提醒实验具体结束时间。当预约授权时间结束时, 平台系统自动启动下一个实验方案的加载过程。如前所述, 实验是以脚本的方式保存的, 实验重置时只需重复调度、加载一次实验方案即可。实验的调度、加载和重置如图 11 所示, 可以多次重复和循环。

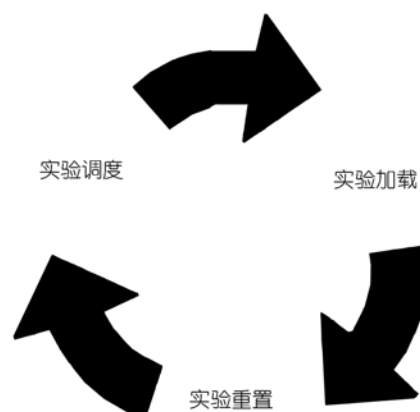


图 11 实验调度、加载、重置过程

5 结论

光电交换引擎提高了 DRAGON-Lab 的自动化程度, 远程可视化实验技术和可编程实验技术极大提高了 DRAGON-Lab 的实验效率, mpfring 技术使高速网络流量采集变得非常简便, 快速 IP 地址随机化技术使信息资源开放无后顾之忧, TRC, BGP-Grid, GPERF 等派生服务为 DRAGON-Lab 增添亮点, 分层体系结构设计使 DRAGON-Lab 具有良好的开放性和可扩展性。由于采用了独特的联邦合作模型, DRAGON-Lab 能够以较低的成本迅速整合大量资源, 建成大规模互联网技术实验平台。然而 DRAGON-Lab 的发展才刚刚起步, 与更多国际知名的实验平台达成合作, 整合更多互联网上离散的开放资源, 提高实验调度管理能力等工作都是近期努力的方向。

致谢 参加 DRAGON-Lab 建设工作的还有田斌、蒋锦鹏、郑志延和管凌峰等, 在此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- 1 Lu X C, Wang H M, Wang J. Internet-based virtual computing environment (iVCE): concepts and architecture. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2006, 49(6): 681—701
- 2 Mei H, Huang G, Zhao H Y, et al. A software architecture centric engineering approach for Internetwork. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2006, 49(6): 702—730
- 3 Hou L S, Jin Z, Wu B D. Modeling and verifying Web services driven by requirements: an ontology-based approach. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2006, 49(6): 792—820
- 4 Wang J L, Ni C S, Wu J P, et al. Next generation internet. In: *Proceedings of the International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks*. Washington: IEEE Computer Society, 2004. 351—356
- 5 Fowler D. The next internet. *Networker*, 1999, 3(3): 20—29 [\[DOI\]](#)
- 6 Internet2. <http://www.internet2.edu/>
- 7 Geant. <http://www.geant.net/>
- 8 Cernet2. <http://www.cernet2.edu.cn/>
- 9 Chun B, Culler D, Roscoe T, et al. PlanetLab: an overlay testbed for broad-coverage services. *ACM SIGCOMM Comput Commun Rev*, 2003, 33(3): 3—12 [\[DOI\]](#)
- 10 GENI Planning Group. GENI Design Principles. *Computer*, 2006, 39(9): 102—105
- 11 FIRE. <http://www.future-internet.eu/>
- 12 PanLab. <http://www.PanLab.net/>
- 13 OneLab. <http://www.fp6-ist-OneLab.eu/wiki/view/OneLab>
- 14 Deri L. nCap: wire-speed packet capture and transmission. In: *Proceedings of the End-to-End Monitoring Techniques and Services*. Washington: IEEE, 2005. 47—55
- 15 Deri L. Improving passive packet capture: beyond device polling. In: *Proc SANE*, 2004
- 16 Shen W C, Yang B, Lv G H, et al. Commodity PC based on flow aggregation system for gigabit networks. *J Xiamen Univ*, 2007, z2
- 17 Zhang Q L, Wang J L, Li X. On the design of fast prefix-preserving IP address anonymization scheme. LNCS 4861. In: *Proc ICICS*. Heidelberg: Springer, 2007