

# 虚拟网映射 问题及算法研究

余建军 / 著

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社



# 虚拟网映射 问题及算法研究

余建军 / 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

虚拟网映射问题及算法研究 / 余建军著. —杭州:  
浙江大学出版社, 2018. 12  
ISBN 978-7-308-18809-8

I. ①虚… II. ①余… III. ①虚拟网络—研究 IV.  
①TP393

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 296030 号

## 虚拟网映射问题及算法研究

余建军 著

- 
- 策划编辑 张小苹  
责任编辑 沈巧华  
责任校对 丁沛岚  
封面设计 春天书装  
出版发行 浙江大学出版社  
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)  
(网址: <http://www.zjupress.com>)  
排 版 浙江时代出版服务有限公司  
印 刷 杭州高腾印务有限公司  
开 本 710mm×1000mm 1/16  
印 张 15.75  
字 数 275 千  
版 印 次 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 978-7-308-18809-8  
定 价 55.00 元
- 

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社市场运营中心联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

# 前 言

网络虚拟化作为构建未来网络的关键技术,旨在通过基础设施提供商和服务提供商的分离,构建出完全虚拟化的网络环境。服务提供商根据用户的业务需求,在由一个或多个基础设施提供商提供的底层物理网络上,通过抽象和重构机制构建出共存但相互隔离的、多样化的、异构的虚拟网络。新的网络服务和网络协议可以在任意的虚拟网络中运行而不影响其他虚拟网络中的服务。虚拟网络完全控制属于自己的虚拟资源,可以根据自身的业务和需求定制网络架构和网络协议,并可以根据网络环境的动态变化实时调整虚拟节点资源和虚拟链路资源,从而实现对网络资源的可管和可控。

虚拟网映射问题是网络虚拟化的核心问题,其任务是在底层物理网络为虚拟网络分配资源,且分配资源时必须满足相应的约束条件。虚拟网映射问题是 NP 难问题,面临资源约束、接入控制和服务质量等诸多挑战。高效的虚拟网映射算法可以提高底层物理网络资源的效用,进而提高基础设施提供商的收益和虚拟网络构建请求的接受率,同时也可以有效提高基础设施提供商的服务能力并降低用户的运维成本。虚拟网映射算法的性能和效率将直接影响到网络虚拟化技术能否走向实际应用,因此开展虚拟网映射问题的研究具有重要的应用价值。

本书是作者主持的浙江省自然科学基金资助项目(项目名称:虚拟网映射问题的计算复杂性和竞争算法研究,项目编号:LY14F020010)的研究成果之一,本书的出版得到该项目经费的资助。本书共分为 5 个部分。

第 1 章在简要介绍网络虚拟化背景、网络虚拟化技术和网络虚拟化环境之后,给出了单个虚拟网映射问题、在线虚拟网映射问题和离线虚拟网映射问题的定义和数学模型。然后,概述了单个虚拟网映射问题、在线虚拟网映射问题、单个虚拟网映射可行问题、虚拟节点映射问题和离线虚拟网映射

等问题的计算复杂性的现有结论。最后,分析了现有的求解在线虚拟网映射问题的精确算法、启发式算法和元启发式算法。

第2章主要介绍作者在虚拟网映射问题的计算复杂性分析方面的研究成果。首先,根据虚拟节点映射是否已知、底层物理网络是否支持路径分割和物理节点是否支持重复映射,将各种虚拟网映射问题进行分类。然后,针对离线虚拟网映射问题、单个虚拟网映射可行问题、单个虚拟网映射问题和在线虚拟网映射问题等四种虚拟网映射问题的各类问题,证明其计算复杂性;并且给出了各种各类问题在某些特殊情况下的计算复杂性分析结论。

第3章主要介绍作者在在线虚拟网映射算法设计方面的研究成果。针对以物理网络提供商长期收益最大化为目标的一般在线虚拟网映射问题,作者设计了节点和链路同步映射的虚拟网映射算法、模拟退火遗传算法、基于负载均衡的虚拟网映射随机算法、支持接入控制的虚拟网映射竞争算法、基于二分图K优完美匹配的虚拟网映射算法、在线虚拟网映射问题的竞争算法VNMCA、在线虚拟网映射问题的竞争算法VNM\_PDA等七种求解算法。

第4章主要分析各类特殊的在线虚拟网映射问题及其求解算法的研究现状。在线虚拟网映射问题的特殊性体现在两个方面:第一,不是直接以物理网络提供商长期收益最大化为目标,而是在优先考虑可靠性、绿色节能、安全等目标的前提下,再考虑成本最小、收益最大等其他目标;第二,针对的底层物理网络不是由单基础设施提供商提供的普通物理网络,而是由多基础设施提供商提供的物理网络、数据中心网络、无线网络、光网络、软件定义网络等特殊底层物理网络。

第5章首先分析了离线虚拟网映射问题及其求解算法的研究现状,然后介绍了资源批量出租的精确离线虚拟网映射算法,最后提出了求解一般静态离线虚拟网映射问题的贪婪算法和禁忌遗传算法。

余建军

2018年7月于浙江衢州

# 目 录

<b>1 虚拟网映射问题</b> .....	(1)
1.1 网络虚拟化 .....	(1)
1.2 虚拟网映射问题 .....	(15)
1.3 虚拟网映射问题计算复杂性分析概述 .....	(26)
1.4 在线虚拟网映射算法概述 .....	(32)
参考文献 .....	(40)
<b>2 虚拟网映射问题的计算复杂性</b> .....	(47)
2.1 组合优化问题 .....	(47)
2.2 问题复杂性 .....	(49)
2.3 在线问题计算复杂性 .....	(51)
2.4 离线虚拟网映射问题计算复杂性 .....	(52)
2.5 单个虚拟网映射可行问题计算复杂性 .....	(57)
2.6 单个虚拟网映射问题计算复杂性 .....	(61)
2.7 在线虚拟网映射问题计算复杂性 .....	(65)
参考文献 .....	(67)
<b>3 一般在线虚拟网映射问题的算法设计与分析</b> .....	(70)
3.1 节点和链路同步映射的虚拟网映射算法 .....	(70)
3.2 求解虚拟网映射问题的模拟退火遗传算法 .....	(83)
3.3 基于负载均衡的虚拟网映射随机算法 .....	(97)
3.4 支持接入控制的虚拟网映射竞争算法 .....	(113)

3.5 基于二分图 K 优完美匹配的虚拟网映射算法 .....	(127)
3.6 在线虚拟网映射问题的竞争算法 VNMCA .....	(136)
3.7 在线虚拟网映射问题的竞争算法 VNM_PDA .....	(147)
参考文献 .....	(161)
<b>4 特殊的在线虚拟网映射问题及其求解算法 .....</b>	<b>(166)</b>
4.1 生存性虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(166)
4.2 节能虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(172)
4.3 安全虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(176)
4.4 跨域虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(181)
4.5 数据中心网络的虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(186)
4.6 无线网络的虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(193)
4.7 光网络的虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(199)
4.8 软件定义网络的虚拟网映射问题及其求解算法 .....	(205)
参考文献 .....	(208)
<b>5 离线虚拟网映射问题的算法设计 .....</b>	<b>(225)</b>
5.1 离线虚拟网映射算法简介 .....	(225)
5.2 资源批量出租的精确离线虚拟网映射算法 .....	(227)
5.3 一般离线虚拟网映射问题的求解算法设计 .....	(231)
参考文献 .....	(242)
<b>索引 .....</b>	<b>(244)</b>

# 1 虚拟网映射问题

网络虚拟化是下一代互联网、移动通信网、云计算、软件定义网络和网络功能虚拟化的重要技术,该技术通过抽象、分配和隔离机制,在底层物理网络上构建多个独立的虚拟网络,从而实现支持多种服务和网络体系结构的目的。虚拟网映射是网络虚拟化的关键环节,它负责在底层物理网络为虚拟网络分配资源,且分配资源时必须满足相应的约束条件。

## 1.1 网络虚拟化

### 1.1.1 网络虚拟化提出背景

互联网的诞生是人类历史发展中的一个伟大的里程碑,经过多年的飞速发展,互联网成为覆盖全球,涵盖通信、娱乐、金融、军事等众多领域,集数据、语音、视频等多种媒体于一身的网络传送平台。互联网已经成为现代社会重要的基础设施之一,它作为知识经济的基础和载体逐渐渗透到人类社会的各个领域,互联网的发展已深刻地影响和改变了人们的工作、学习和生活的方式,对人类社会和经济的进步产生了巨大的推动作用。

TCP/IP 互联网体系具有三大典型特征:一是提供尽力而为的服务;二是尽量采用无连接的互联方式;三是网络没有全局层面的运营管理控制。互联网的设计初衷是为科研人员提供信息交互和文本传输等数据通信功能,尽力而为的服务使得网络控制模型简单且易接入,这为互联网规模的扩



展带来了便利。

随着互联网规模的不断扩大、异构网络的大量出现和互联网用户数量的迅速增加,实时服务、多媒体服务、物联网服务、云计算服务、大数据服务、移动互联网应用、电子商务、大型网络流媒体等新型业务不断涌现,传统的提供尽力而为服务的 TCP/IP 互联网体系已经难以适应应用的变化,它在扩展、升级、移动、服务质量、信任安全等各方面的问题都在日益凸显,即互联网体系结构僵化的问题不断暴露,这给互联网带来了极大的挑战<sup>[1-4]</sup>。

现在的互联网由很多异构的自治域构成,这些自治域的建设、管理、维护是由不同的互联网服务提供商(Internet Service Provider,ISP)负责的。由于 TCP/IP 的网络体系结构自身缺乏自进化能力,面对新技术和新业务对互联网提出的更多要求,为了节约改造成本,ISP 通常采用演进式的路线来改造当前的互联网,即通过打补丁的方式扩展新的功能,ISP 大约每六个月就要对网络进行一次人工升级改造,这对新业务的支撑起到了一定的缓解作用,但其改造成本越来越高<sup>[3,4]</sup>,网络被改造得越加复杂,传输性能越来越差,部署新型业务的难度越来越大。

改造当前互联网的演进式技术主要是针对 IP 协议所存在的问题进行“修修补补”。例如,由于传统的 IP 网络只能提供尽力而为的服务,其网络机制、质量指标、保护手段以及维护要求等各方面都无法适应新的 IP 实时业务,如语音业务、视频业务等。为此,国际标准组织互联网工程任务组(Internet Engineering Task Force,IETF)提出了两种网络体系结构模型,即集成服务模型(Integrated Services, InteServ)<sup>[5]</sup>和区分服务模型(Differentiated Services, DiffServ)<sup>[6]</sup>,为网络传输提供服务质量(Quality of Service, QoS)保证。又如,针对传统的 IPv4 网络受到可扩展性和安全性等问题的限制<sup>[7,8]</sup>,IETF 提出了 IPv6。与 IPv4 相比,IPv6 具有更大的地址空间、更小的路由表以及更高的安全性等诸多优势,这是演进式路线的代表技术,其主要研究计划有欧盟的“欧洲教育科研网络”(Gigabit European Academic Network,GEANT),美国的“下一代互联网”(Next Generation Internet,NGI),日本、韩国和新加坡发起的“亚太地区先进网络”(Asia-Pacific Advanced Network,APAN),中国的“中国下一代互联网(China Next Generation Internet,CNGI)示范工程”等。除 IPv6 外,这些计划还提出了多协议标签交换协议(Multi-Protocol Label Switching,MPLS)<sup>[9]</sup>、为适应移动性提出的 Mobile IP<sup>[10]</sup>、为解决 IP 网络的服务质量问题设计的 DiffServ 和 RSVP<sup>[11]</sup>、为加强安全性设计的 IPSec<sup>[12]</sup>等。这种修补的方式由于难以改变基

于 IP 协议的互联网架构,缺乏自适应的组网能力,不能从根本上解决互联网在体系结构上的固有问题,因而无法从根本上解决互联网所面临的问题,难以支撑互联网的进一步发展。

为了解决当前互联网所面临的问题,应对各种应用对互联网提出的挑战,人们于 2005 年前后提出了未来互联网(Future Internet, FI)的概念。这类创新理念和技术对于当今的互联网而言,属于革命式的改造路线。未来互联网的关键目标中,除了实现对现有网络的兼容性和 IPv6 的高度可扩展性之外,还要实现 RFC 1550 中没有涉及的多种业务模式及相应的支撑网络结构。

FI 的概念被提出之后,Thomas Anderson 和 Larry Peterson 等人在 HotNets 会议上提出了搭建虚拟化网络平台的思想<sup>[13]</sup>,首次将网络虚拟化的概念纳入 FI 体系架构的研究中。网络虚拟化的核心思想是对网络资源进行抽象和封装,实现基础设施提供商(Infrastructure Provider, InP)和服务提供商(Service Provider, SP)的分离,使二者的关系从传统的紧耦合变成松耦合,用户可以根据自身的业务需求,定制底层物理网络资源为其提供相应的网络服务。网络虚拟化通过构建虚拟网络的形式得到实现,不同的虚拟网络可以共享底层物理网络资源,支持不同的网络体系结构,为用户提供多样化的网络服务。

在对 FI 体系架构的研究中,加入网络虚拟化的概念,其重要意义有三点<sup>[3]</sup>。首先,网络虚拟化为新型网络体系结构的研究提供了支撑,各种创新网络技术可以独立部署且并行在各自的虚拟网络上,从而有效解决当前网络技术创新遇到的瓶颈问题。其次,网络虚拟化允许多个服务提供商共享同一个基础设施提供商所提供的底层物理网络。运营不同业务的服务提供商在共享的底层基础设施上构建各自的运营网络(虚拟网络)后,不必采用不同的网络架构来保证 QoS,也能提供各自的端到端服务。因此,网络虚拟化是一种很有前途的 FI 运营模式。最后,网络虚拟化对当前互联网的兼容性是其发展的根本推动力。当前的互联网是一个全球范围的商用网络,只有市场利益的驱动才可能使互联网发生根本的变革,要在短期内完全替换当前的互联网络根本行不通,这就要求未来互联网的设计必须基于现有的物理网络基础设施,并能与之互联互通。网络虚拟化使得任何创新的互联网体系架构都能够借助其实现该要求,从而使得运营商可能接受并部署新型网络,逐步推进新型的未来网络的推广。

网络虚拟化在未来互联网技术中占据举足轻重的地位<sup>[14,15]</sup>,它为以服

务为中心的网络、以信息为中心的网络等新型网络结构提供了支持,同时,为未来的互联网络、软件定义网络(Software Defined Network,SDN)以及云计算网络提供了新的发展方向<sup>[16-18]</sup>。

### 1.1.2 网络虚拟化和未来网络研究大型项目

网络虚拟化对未来网络建设意义重大,近年来,各国陆续推出各自基于网络虚拟化的未来网络研究大型项目<sup>[2,3,19]</sup>,如美国的 CABO 计划、Planet-Lab 计划、GENI 计划、FIND 计划和 OpenFlow 计划,欧洲的 4WARD 计划和 FIRE 计划,加拿大发起的 Nouveau 计划,日本的 AKARI 计划和 JGN2+ 计划等。我国的国家自然科学基金、国家高技术研究发展(“863”)计划项目、国家重点基础研究发展(“973”)计划项目、国家科技重大专项项目、国家发改委支撑的 CNGI 项目等从基础研究、关键技术突破、推广应用三个层次,大力支持下一代互联网体系结构的探索、研究与实践,如解放军信息工程大学的可重构信息通信基础网络项目、中科院的面向服务的未来互联网体系结构与机制研究项目、北京交通大学的智慧协同网络理论基础研究项目等。这些研究项目,按研究的性质可将其分为基于体系结构的研究项目和基于实验平台的研究项目,下面对部分研究项目进行介绍。

#### 1.1.2.1 CABO 计划

CABO(Concurrent Architecture is Better than One)<sup>[20]</sup>是一种面向网络虚拟化的网络体系结构设计方案。其核心思想是网络虚拟化,将基础设施提供商与服务提供商从当前的 ISP 中分离,以方便用户根据自身的业务需求,通过服务提供商定制底层网络资源为其提供相应的网络服务,以打破现有互联网的僵化结构。

CABO 中的虚拟网络由虚拟节点和虚拟链路构成,服务提供商基于底层网络中的物理节点建立虚拟节点,并利用特定的算法构建连接虚拟节点的虚拟路径。此外,CABO 还支持虚拟节点的迁移(即虚拟节点可从一个物理节点自动迁徙到另一个物理节点<sup>[21]</sup>),引入可问责能力来满足用户的需求<sup>[22]</sup>,并使用能迅速响应网络变化且可扩展的路由方案<sup>[23]</sup>。与主动网络的思想相似,CABO 支持对路由器的可编程,但 CABO 是由 SP 根据用户的需求自定义虚拟网络,并实现虚拟网络在物理网络上的映射,从而为用户提供 E2E(端到端)的服务,即对路由器的映射或者编程的过程不能由用户直接执行,这是与主动网络的最大不同点。

### 1.1.2.2 4WARD 计划

4WARD(architecture and design for the future internet)<sup>[24]</sup>是欧盟 FP7 (Frame Project 7)的研究项目,本质上也是面向网络虚拟化的网络体系结构设计方案。和 CABO 一样,4WARD 基于网络虚拟化在一个公共的物理网络平台上同时运行多个结构相异的虚拟网络。4WARD 按虚拟网络的需求进行实例化,并支持结构各异的虚拟网络在一个安全可信的商业环境中进行可靠的交互操作。在对 4WARD 的设计中,考虑了异构网络技术(如有线技术和无线技术)的虚拟化。

4WARD 在其商业模型中引入三种不同的角色:基础设施提供商,负责管理底层的物理网络资源;虚拟网络提供商,负责创建虚拟网络与管理;虚拟网络运营商,它基于已创建的虚拟网络为用户提供服务。尽管 4WARD 与其他网络虚拟化项目在很大程度上存在相似性,但它有一个显著的特点,即承诺将网络虚拟化真正地带给最终用户,而不仅仅将它用于网络实验。

### 1.1.2.3 Nouveau 计划

Nouveau<sup>[25]</sup>是由加拿大发起的项目,旨在设计面向网络虚拟化的体系结构方案。Nouveau 使用网络虚拟化的思想创建一个灵活、可管理且安全的 E2E 网络。

为了能给终端用户提供一个真实的网络虚拟化环境,该项目考虑了异构网络的虚拟化技术。Nouveau 把对编程的安全管理交给 InP,当 SP 提出虚拟网络的构建请求时,InP 提供端到端身份管理框架,并提供能够容错且可靠的资源分配机制,以及 InP 与 SP 间的协议,从而对构建请求进行管理和控制。另外,通过对虚拟网络的递归和继承,该项目支持在网络体系结构中的任意层创建定制虚拟网络。

### 1.1.2.4 PlanetLab 计划

PlanetLab<sup>[26]</sup>创建了一种面向服务的网络结构,是一个全球性的网络研究平台,并且是一个基于网络虚拟化的测试床,可支持新型网络应用的开发。开发 PlanetLab 的目的是设计、部署和评估分布在不同地理位置的网络服务,并同时将其用于商业和科研。作为一个开放性的开发测试平台,PlanetLab 的存在形式是将网络节点资源进行“切片”的覆盖网。每个覆盖网包括用于提供接口的虚拟机和用于覆盖网自身管理的服务程序。切片技术可以使得各个虚拟切片共享底层网络资源,同时又将各虚拟切片完全隔离,每个切片之间完全独立,不会互相影响。使用者可以在每个切片上部署自己的

应用。

PlanetLab 项目有四个基本特征:第一,在 PlanetLab 实验床中的每个应用运行于覆盖网络的一个切片上,网络切片是由虚拟机监控器创建和调度的运行在物理节点上的虚拟机集合;第二,PlanetLab 实验床的控制结构是分散的,不是集中的,每个节点有自身的本地策略;第三,对覆盖网的管理也是分散的,不存在集中的管理,PlanetLab 实验床将管理任务划分为多个子管理服务,每个子管理服务运行在网络切片之上,并对网络切片进行管理;第四,覆盖网支持通用的编程接口,其接口形式固定,但其内容可以随应用需要的改变而改变,这一特点有利于对服务进行长期持续的开发。

#### 1.1.2.5 GENI 计划

GENI<sup>[27]</sup> (Global Environment for Network Innovations)是由美国发起的基于 PlanetLab 的实验床项目,旨在全球范围创建一个高度开放的、大规模的和真实的网络实验床,该实验床支持切片封装、可扩展性接口以及资源虚拟化等技术。该实验床不仅可以连接真实用户,而且能够与当前互联网互联。创建 GENI 的目的是测试和评估创新的网络体系结构,研究人员可以通过该实验床定制新型的网络体系结构,并且能够获取终端用户的真实流量。GENI 将网络资源在时间和空间上进行了划分,实现了网络资源虚拟化,可支持多个研究者的不同实验,充分提高资源利用率。此外,GENI 平台上的各组件都是可编程的,研究人员可以加载自己的应用程序进行评估。

与其他测试床的区别在于,GENI 是一个大规模且通用的实验设施,旨在为研究人员提供服务,同时不限制运行在其上的网络结构、服务类型和应用类型。

#### 1.1.2.6 VINI 计划

VINI<sup>[28]</sup> (Virtual Network Infrastructure)是对 PlanetLab 计划的扩展,是 PlanetLab 计划上的一个特殊实例,即在其上运行的覆盖实验网。VINI 中的虚拟机的实现方式与 PlanetLab 计划类似,网络中的实验可以预定 CPU 处理能力与网络带宽,并在不同的虚拟机中同时进行。与 PlanetLab 计划的不同之处在于 VINI 能够响应外部事件,从而创建复杂真实的网络。其实,VINI 与 GENI 计划类似,同样利用虚拟化的思想共享底层网络资源,允许研究者在真实的网络环境中部署自己的应用,独立地展开各自的研究工作,可以把 VINI 看作是 GENI 试验床的小规模原型。

### 1.1.2.7 AKARI 计划

AKARI(a small light in the dark pointing to the future)项目<sup>[29]</sup>的研究目标是设计出可以满足多种需求的新一代网络架构。AKARI 项目是参考美国的 GENI 和 FIND 计划进行构建的,以网络虚拟化为基础,具有透明、公开和简单等特点的网络模型。AKARI 具有鲁棒性、可靠性、隐私保护和可寻迹性等特征,并提供对技术升级的支撑,具有成为未来网络商业模式的特质。AKARI 计划借鉴当前互联网的体系架构并增加了新的内容,AKARI 体系架构包括四层,从上至下分别是应用层、覆盖层、网络层和物理层。应用层是最上层,与现有网络架构类似。覆盖层是 AKARI 的核心部分,可以为不同功能和不同需求的业务构建不同的覆盖网络,从而保证异构网络业务的独立运行。网络层(承载网)主要实现路由和转发,包括对 IP 网络和  $\alpha$  网络的支持。物理层支持光网络、移动网络和传感器网络。

### 1.1.2.8 OpenFlow 计划

OpenFlow<sup>[30]</sup>由 GENI 资助实现,其目标是在现有的网络基础上构建出新型的网络协议实验环境。OpenFlow 网络由 OpenFlow 交换机(OpenFlow Switch)和中心控制器(controller)构成,中心控制器通过 OpenFlow 协议对网络中的交换机进行管理。OpenFlow 技术解耦了传统分布式网络的控制层面和转发层面,由工作在控制层面的中心控制器负责对整个网络的集中管理,处在转发层面的交换机包含一个数据流表并根据流表条目转发数据。中心控制器可以实时监测每个交换机的网络流量,建立网络实时状态和历史状态信息,方便用户的精细化管理。

FlowVisor 是 OpenFlow 技术的重要组件之一,利用 FlowVisor 可以将现有的 OpenFlow 网络划分成多个虚拟网络片(slice)。FlowVisor 扮演着中心控制器和交换机之间代理的角色,每个中心控制器只能管理和控制属于自己的片,FlowVisor 将每个中心控制器的控制消息传递给与之对应的片。片之间的数据是相互隔离的,一个片的数据并不会影响其他的片。通过 FlowVisor 建立的实验平台可以在不影响背景流的转发速度的情况下,允许多个网络实验在不同的虚拟网络片上同时进行。

### 1.1.2.9 FARI 项目

国内的解放军信息工程大学提出的可重构信息通信基础网络<sup>[1,3]</sup>(Flexible Architecture of Reconfigurable Infrastructure, FARI)是一种基于网络虚拟化,且综合其他各种新技术和新概念的未来互联网体系结构设计方案。

FARI 以当前互联网所存在的关键问题为切入点,构建了一个功能可动态重构和扩展的基础物理网络,从而为不同业务提供满足其需求的且可定制的基础网络服务。另外,FARI 通过增强网络层和传输层的功能以解决目前互联网中 IP 网络层的功能瓶颈,并能够支持丰富的光传输物理资源,使之与日益增长、持续变化的应用需求以及不断创新的底层传输物理资源相匹配。在 FARI 项目中,网络虚拟化为项目的实现提供支持,是项目中实现可定制网络的关键一环。

### 1.1.3 网络虚拟化相关技术

在信息和通信领域,虚拟化概念的应用非常宽泛。这个概念首次于 20 世纪 60 年代在计算机领域被提出,是一种从物理资源中抽象出逻辑计算资源的通用技术。在计算机领域,虚拟化技术已经被应用到了内存虚拟化、存储虚拟化、计算机虚拟化和桌面虚拟化等不同层面当中。在通信领域,虚拟化与许多技术相关,例如异步传输模式(Asynchronous Transfer Mode, ATM)虚拟电路、多协议标记交换(Multiprotocol Label Switching, MPLS)虚拟路径、虚拟专有网络(Virtual Private Network, VPN)、虚拟局域网(Virtual Local Area Network, VLAN)、虚拟重叠网、主动网络、可编程网络等<sup>[4,31]</sup>。

网络虚拟化的目的是使一个物理网络看起来好像是多个逻辑网络,但彼此又相互隔离,可以运行各自的协议,部署各自的架构。这种提供多个网络共享的理念很有意义。下面对基于相同理念的虚拟专用网、虚拟局域网、覆盖网、主动/可编程网络进行简要介绍。

#### 1.1.3.1 虚拟专用网

虚拟专用网络<sup>[32]</sup>是一种在公用网络上建立专用网络的技术。一个 VPN 网络是架构在公用网络服务商所提供的网络平台(如互联网、异步传输模式网、帧中继网络等)之上的逻辑网络,通过数据安全机制,用户数据可在逻辑链路中进行安全传输。

虚拟专用网具有两层含义:其一,所谓的“专用”是指 VPN 技术利用公众信息网传输数据,通过对网络数据的封装和加密传输,实现在公网上传输私有数据并达到私有网络的安全级别;VPN 技术基于隧道协议、加密算法、身份认证等方法保障用户专网数据通过安全的加密管道在公众网络中传播。其二,谓之“虚拟”则是因为用户不再需要租用实际的长途数据线路,而是使用公众信息网络基础设施。

VPN 网络在实际应用中具有灵活性、可扩展性、可管理性、QoS 与安全保障等特点。VPN 能够实现在一个共同的基础设施上承载多个虚拟网络,但是 VPN 在网络虚拟化方面却存在以下主要问题:第一,所有的 VPN 网络运用相同的技术和协议栈,限制了多种组网方案的并存;第二,虚拟网络之间并不是真正的隔离;第三,基础设施提供者和服务提供者依然没有分开。

### 1.1.3.2 虚拟局域网

虚拟局域网<sup>[33]</sup>从逻辑上把网络资源和网络用户按照一定的原则进行划分,把一个实际的物理网络划分成多个小的逻辑网络。将一组位于不同物理网段上的用户在逻辑上划分为一个局域网,其在功能和操作上与传统局域网基本相同,可以提供一定范围内终端系统的互联,大大提高了网络搭建的灵活性。定义 VLAN 成员的方法有很多,主要分类标准有基于端口、基于 MAC 地址、基于路由和基于策略等。

VLAN 的实现原理是,支持 VLAN 的交换机从工作站接收到数据后,将对数据的部分内容进行检查,并与一个 VLAN 配置数据库(该数据库含有静态配置的或者动态学习而得到的 MAC 地址等信息)中的内容进行比较,然后确定数据去向。如果数据要发往一个 VLAN 设备,则给这个数据加上一个标记(tag)或者 VLAN 标识,根据 VLAN 标识和目的地址,VLAN 交换机就可以将该数据转发到同一 VLAN 上适当的目的地;如果数据发往非 VLAN 设备,则 VLAN 交换机发送不带 VLAN 标识的数据。

VLAN 在广播风暴抑制、动态组网等方面具有其他网络无法比拟的优越性,因此得到了很大的发展。但 VLAN 仅是逻辑上在同一广播域下连接起来的一组主机。

### 1.1.3.3 覆盖网

在可以预见的未来,网络上的分布式应用系统只能建立在一种“尽力而为”的数据包传输体系上面,但这样一种服务远不能满足许多有特定需求的应用系统的需要。具有特定需求的应用系统包括需要端到端服务质量保证的网络多媒体应用系统,需要控制数据包传输路径的涉密应用系统,需要能够有效进行群组交流的视频会议系统以及网络广播系统,需要寻找最短延迟路径的股票应用系统,需要有效发布和存储数据的内容分发网络等。而覆盖网<sup>[34]</sup>能很好地解决这些问题,它可以绕开上面的问题,给应用系统提供良好的网络服务。

覆盖网是由端系统在下层网络基础设施之上构建的能提供特定服务的虚拟网络,即覆盖网是在现有网络物理拓扑结构之上创造的虚拟拓扑结构。



在覆盖网络中,分布在网络中的相互协作的服务器作为覆盖节点组成了一个虚拟的网络。覆盖网的节点通过虚拟链路连接,虚拟链路对应底层网络的路径,这样利用底层网络层提供的服务,数据包就可以在这些虚拟的路由器之间交换数据,且对于特定的应用,这些节点可以任意地调整它们的功能来为特定应用服务。覆盖网通常是指在应用层的覆盖,如 P2P 网络,同时覆盖网也被用于网络测试床,PlanetLab 就是一个例子。但覆盖技术不能实现路径分离,同时只能在基于 IP 层上的应用层进行部署和设计,因此不能支持异构的网络架构。

#### 1. 1. 3. 4 主动/可编程网络

根据用户需要,快速地产生、利用和管理新的服务是推动可编程网络研究的一个关键因素。对 ISP 来说,引进新种类的服务是一项富有挑战性的工作,这需要在产生服务的方法和工具上有很大的提高和进步,如需要大量的服务计算、数据处理和交换;并且必须提供新的网络编程环境使将来的网络基础是开放的、可扩展的和可编程的。

可编程网络(Programmable Network, PN)<sup>[35]</sup>和主动式网络<sup>[36,37]</sup>(Active Network, AN)的概念就是在上述情况下提出的。这两种网络在概念上稍有不同,但是其中中心思想是一致的,它们都为网络添加可编程能力以适应未来网络中可能出现的各种新业务,并进一步提高网络的性能。

可编程网络主要在网络节点中提供标准的网络应用编程接口,从而向用户和网络业务供应者提供一个“开放”的网络控制机制,它与传统网络的区别在于传统网络是无状态的(stateless),而可编程网络是有状态的并且可由用户控制和改变的。可编程网络允许用户利用网络物理资源构建并管理适合自己所需的业务系统,其主要目标包括提供开放的信令结构、支持快速构建新业务和增强网络对 QoS 的支持能力,但其本质上并没有解决如何在网络中部署新协议和新应用的问题<sup>[29]</sup>。

主动网络支持在网络环境下动态实时部署新的服务,除了提出如可编程网络概念一样的网络节点的可编程特性外,它还侧重于构造由主动式数据包(active packets)或封装体(capsules)所携带的可执行程序。通过将这种封装体注入网络节点,结合网络节点所提供的编程应用接口,主动网络能向用户提供各种服务。由于主动网络允许在数据包传输层定制网络服务,而不是在控制层编程实现,因而更加灵活,但由于主动网络更强调用户的参与性,其实加重了端用户的负担。