



智能光网络发展历程的回顾和展望： 从 ASON 到 PCE,再到 SDON*

华楠,郑小平

(清华大学光网络与微波光子学实验室 北京 100084)

摘要:回顾了智能光网络的发展历程,并根据其多域异构化的发展趋势,分析和比较了现有典型光网络架构的特点和性能,进而综合其各自优点,提出了基于 PCE 和域间连接控制的多域异构光网络管控架构 PIONEER 以及面向未来可灵活配置、扩展和升级的软件定义光网络(SDON)架构。

关键词:自动交换光网络;路径计算单元;软件定义光网络;异构互联

doi: 10.3969/j.issn.1000-0801.2014.02.012

Review and Outlook of the Development Course of Intelligent Optical Networks: from ASON to PCE and then to SDON

Hua Nan, Zheng Xiaoping

(Laboratory of Optical Networks & Microwave Photonics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The feature and performance of the representative optical network architectures were reviewed, and a novel PIONEER architecture that combines their advantages was proposed. Finally, programmable, scalable and upgradable software defined optical network (SDON) architectures were proposed for future optical networks.

Key words: automatic switched optical network, path computation element, software defined optical network, heterogeneous network inter-connection

1 引言

自 20 世纪 90 年代开始,光网络蔚然兴起,带来了网络世界前所未有的变革。在联合国“1999 年世界电信论坛会议”的开幕演说时,副主席 John Roth 提出了光纤定律:光纤通信容量每 9 个月会增加一倍,但成本降低一半,比集成电路 18 个月的摩尔定律还快^[1]。按照这个速度发展,光网络注定会在世界范围的电信基础结构中扮演极其重要的角色。

需求推动技术创新,技术创新推动产业革命。这个规

律同样适用于光网络的发展历程。迄今为止,光网络体系结构的每一次重大变革均是由新技术或新器件的出现所导致的。20 世纪 70 年代至今,光网络的体系结构已经经历了 3 次重大变革:第一次变革从单波长 SDH 光网络转向点到点的 WDM 光网络;第二次变革从点到点的 WDM 光网络转向静态波长路由光网络;第三次变革从静态波长路由光网络转向动态智能光网络。而真正意义上光网络的出现,是从 WDM 技术出现开始的。

波分复用 (wavelength-division multiplexing, WDM) 的概念最早在 1970 年被提出^[2],然而直到 1977 年,关于该技

* 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(No.2010CB328203, No.2014CB340105),国家高技术研究发展计划(“863”项目)基金资助项目(No.2012AA011301),国家自然科学基金资助项目(No.61201188)

术的基础研究才逐渐展开。自此之后,关于光纤、光源、光探测器以及光复用/解复用器等 WDM 光纤传输系统关键器件的研究取得了戏剧化的飞速发展,商用光通信系统的容量也随之不断提升。WDM 技术的出现使得越来越多的人开始关注光纤通信的巨大带宽。理论上,单模光纤通信的潜在带宽可达 100 Tbit/s,比目前的电传输速率高出 3 个数量级。WDM 技术带来的巨大带宽优势使得光在中长距离高速传输上无可争议地取代了电,成为了信息的主要承载媒质。与此同时,WDM 光网络也取代了第一代 SDH 光网络,并迅速发展壮大。

WDM 光网络最初是一种点到点的网络形式,网络节点间通过光纤连接,并采用 WDM 技术进行数据传输。WDM 技术带来的巨大带宽成功解决了网络传输过程中的带宽瓶颈问题,然而与第一代 SDH 光网络相同,在最初的 WDM 光网络节点处,数据仍需进行光电光(OEO)转换,并在电层进行处理和交换。点到点的 WDM 光网络仍然无法克服节点电交换速率的瓶颈。随着 WDM 波长数以及单波长数据传输速率的提高,该瓶颈表现得愈加突出,直到全光交换器件出现后,这种情况才得以改变。

为了解决点到点 WDM 光网络节点处的光电转换瓶颈问题,20 世纪 90 年代初出现了以光分插复用器(OADM)及光交叉连接器(OXC)为代表的全光交换器件^[3,4],从而在网络节点处避免了 OEO 转换,实现了波长粒度的全光透明交换。在采用这些全光交换器件后,点到点 WDM 光网络演变为波长路由光网络^[5,6]。然而,最初的波长路由光网络只具备静态配置传输资源的功能,无法满足多种新型业

务的动态需求;而且,随着光网络规模的扩大,光网络的管理和维护成本逐步提高,业务服务质量难以保证。

为了实现光网络的高度灵活性、扩展性并保证服务质量,必须为光网络引入智能控制和管理功能,从而针对业务请求和光网络状态,实现传输资源的动态优化配置。在此需求的推动下,21 世纪初,人们提出一种新的光网络体系结构,把光层组网技术和基于 IP 的网络智能技术相结合,形成了所谓的“智能光网络”。

智能光网络体系结构最成功的代表是在 2000 年 3 月日本京都会议上,由国际电信联盟 (ITU-T) Q19/13 研究组提出的自动交换光网络(automatically switched optical network,ASON)^[7,8]。ASON 在传统波长路由光网络传输平面和管理平面的基础上增加了控制平面,并引入了路由、信令和链路管理等协议,自动完成数据的交换、传输等功能,从而使光网络由静态的传送网变为可动态重构的智能光网络。ITU-T 关于 ASON 的建议框架结构如图 1 所示。

随着光传送网络规模的不断扩大,网络中设备的种类和数目不断增加,光网络的发展呈现出明显的异构化趋势,形成多域异构光网络。传统 ASON 在实现多域异构光网络互联互通的过程中遇到一些新的问题和挑战。

(1) 网络信息具有隐蔽性需求

主要包括:各个网络运营商对运营范围内的网络拓扑和资源信息具有隐蔽性要求;各个设备制造商对其产品设备所采用的技术和参数信息也具有保密性需求。这一主观因素一定程度上决定了光网络信息的选择性扩散特性。

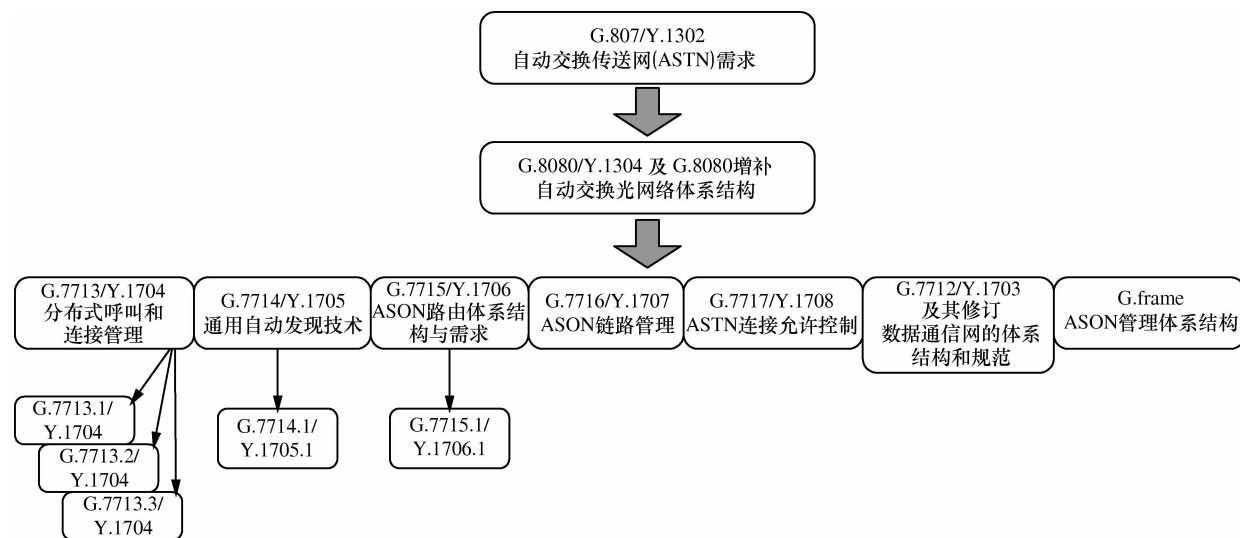


图 1 ASON 框架结构^[9]



(2) 网络规模扩大导致交互信息和计算负荷增加

随着光网络互连规模的扩大,管理网络和信令网络中需要泛洪或扩散的信息量越来越大,路径计算和连接控制的复杂度也不断增加,这对支撑网络的线路和设备都提出了更高的要求。

(3) 管控平面的高度异构化现状

管理和控制平面异构化源于传送平面的异构化。多种异构传送体制(如 SDH、WDM、OTN 等)长期共存,各设备制造商的交换设备结构和交换方式也不一致,而现有管理和控制协议对设备传送平面物理层的屏蔽能力有限,同时各设备制造商的管理和控制平面依据的协议版本和参数也不一致,这些都导致了光网络管控平面互联互通客观上的困难。

目前,可实现多域异构光网络互联互通的典型架构主要有 3 种,即统一网络管理系统(generalized network management system,GNMS)架构、基于外部网间接口(external network to network interface,E-NNI)的域间互通控制架构,路径计算单元(path computation element,PCE)域间路由控制架构。本文首先对这 3 种架构进行叙述,并通过仿真比较结果总结其优缺点。在此基础上,本文还介绍了一种新型集成 PCE 路由和域间连接控制(ICCE)的多域异构光网络管控架构 PIONEER(PCE and ICCE-based optical network e-signaling exchange and routing)。该架构相比现有的 3 种架构具有明显优势。

PIONEER 可以很好地解决现有异构传送体制下的多域光网络互联互通问题。然而,该架构难以做到与传送体制的严格分离。当面对未来可能出现的新型交换设备或交换方式,PIONEER 架构或需要进行较大修改以支持这些新型设备的互联互通,其扩展性和网络平滑升级能力受到限制。随着斯坦福大学的科研人员于 2009 年提出基于 OpenFlow 的软件定义网络(software defined network,SDN),网络架构发生了重大变革。如果将 SDN 中网络设备控制面与数据面分离的概念引入到光网络中,构建软件定义光网络(software defined optical network,SDON),或可从根本上解决光网络扩展性和平滑升级的问题。本文将对 SDON 这种新型光网络架构的概念以及可能的关键技术和技术难点进行介绍。

2 现有多域异构光网络管控架构

2.1 统一网络管理系统架构

统一网络管理系统(GNMS)架构是集中式的管理平面

域间互通机制,其基本架构如图 2 所示。GNMS 架构在管理平面增加一个新的网络管理系统,使之通过北向接口管理、配置和查询各个域独立的网络管理系统,从而实现对整个网络的管理。

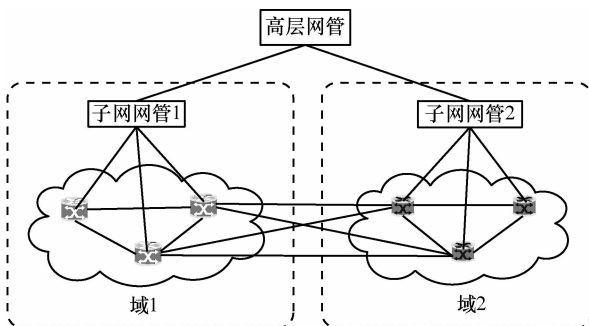


图 2 多域光网络统一管理系统基本架构

GNMS 机制的路径计算一般采用静态方式,连接建立和恢复等功能也需要人工参与,因此使用这种机制进行连接调度和恢复的速度相对较慢。另外,这一管理机制的正常工作依赖于一个集中式 GNMS 实体,因此这种光网络的扩展性和生存性有较大局限性。不过,这种互连互通机制对网络影响较小,并且不需要域间信息交互信令,实现简单灵活,比较适用于中小规模网络。

2.2 基于外部网间接口的域间互通控制架构

E-NNI 是分布式的控制平面域间互连互通机制,其基本架构如图 3 所示。E-NNI 最早由 ITU-T 在 G.807 和 G.8080 中定义,用于两个互不信任关系网络间的通信。光互联论坛(OIF)在此基础上提出 E-NNI 的信令和路由协议^[10,11]。目前,E-NNI 已经发展到 2.0 版本,并在进一步完善中。与协议发展相对应,2004—2009 年,OIF 发起了多次国际范围内的互连互通测试,并取得了一些基本互连互通成果。

在现阶段 OIF 正式发布的 E-NNI 协议中,域间控制主要包括两个方面:路由和信令。在路由方面,目前的协议主

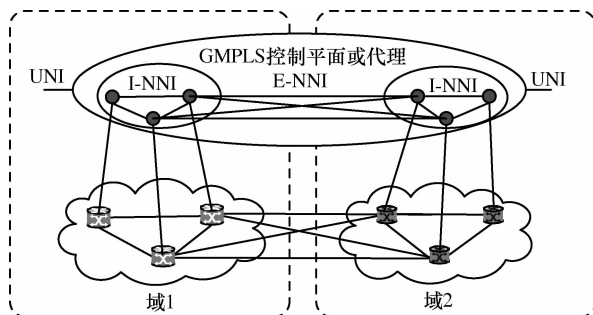


图 3 基于 E-NNI 的域间控制

要集中在运营商内部的 E-NNI。路由协议基于分层架构和拓扑抽象的方式, 并采用 2.0 版本开放最短路径优先 (OSPFv2) 路径计算方法^[11]。在信令方面, E-NNI 支持对基于流量工程扩展的资源预留协议 (RSVP-TE)、基于路由受限标签分发协议 (CR-LDP) 和专用网间接口协议 (PNNI) 3 种信令协议的扩展, 并在两个相邻域间使用相同的 E-NNI 信令协议^[10,12]。

E-NNI 分层架构有利于网络可扩展性和域间隔离, 拓扑抽象则有利于减少域间交互信息量^[11]。因此, E-NNI 在理论上适用于大规模异构光网络的互连互通。不过, 现有的 E-NNI 机制仍然存在着一些问题。在标准化方面, E-NNI 协议目前并不完善, 在分层架构、恢复机制和自动发现等部分的标准尚在修订中。在技术方面, 由于 E-NNI 引入了拓扑抽象, 不能保证连接的路径计算结果达到最优, 降低了网络的使用效率, 对域间信息隔离的效果也有限。在产业化方面, 由于各个设备制造商对 E-NNI 的支持程度有差异, 在协议版本和技术参数的设置上仍然有所区别, 对其推广带来一定程度的困难。

2.3 路径计算单元域间路由控制架构

路径计算单元 (PCE) 是集中或分布式的控制平面跨域路径计算模型。它的基本思想是把路由功能从控制平面独立出来, 承载在专用实体上完成受约束的路径选择和计算。它最早由互联网工程任务组 (IETF) 在 2006 年提出的 RFC4655 中定义^[13]。

PCE 架构在定义上比较灵活, 可以采用集中或分布式的多种方式。在结合了域间信息隐蔽性要求后, PCE 的域间分布式架构如图 4 所示, 其优势则非常明显。目前的多域 PCE 组织架构有多种, 包括基于后向递归路径计算

(BRPC)^[14] 的扁平 PCE 架构, 基于分层串行路径计算的 PCE 架构, 基于分层并行路径计算的 PCE 架构等。由于 PCE 在域间路径计算采用的是一致的路径计算架构和协议, 相当于搭建了一层统一的域间路由平面。

基于 PCE 的路径计算有 3 个主要优点。第一, 由于 PCE 将路由功能从 ASON 控制平面独立出来由专用实体实现, 因此可以较大地提升路径计算效率; 第二, PCE 在域间传递虚拟最短路径树 (VSPT), 对域间拓扑和流量工程 (TE) 信息有较强的隐蔽作用; 第三, PCE 在架构、路由、通信、发现机制等诸多方面有比较完善的协议支持。不过, PCE 架构只约定了路径计算模型, 对域间连接控制等方面的信令机制并没有明确定义, 因此它需要与其他控制机制 (如 E-NNI) 配合完成整个跨域连接服务功能。另外, BRPC 的路径计算优化程度非常依赖于域序列选择算法, 成为限制路由效果的主要因素。

2.4 现有管控机制性能比较

参考文献[15]给出了上述 GNMS、E-NNI、PCE 3 种多域异构光网络管控架构的性能比较, 结果见表 1。

表 1 3 种现有域间管控机制比较

管控机制	GNMS	E-NNI	PCE
统一标准	无	有	有
路由优化	高	中	高
算路效率	非实时	实时	实时
域间信令流量	无	大	小
网络改造	小	大	小
扩展性	弱	强	强
域间隐蔽性	弱	中	强
连接控制	有	有	无

从表 1 中可以看到, 基于 PCE 的管控架构在标准化、路由优化、算法实时性、域间信令流量、网络扩展性和域间信息私密性等方面均优于另外两种架构。但该架构在跨域连接控制方面比较薄弱, 需要诸如 E-NNI 等控制协议的配合才能完成跨域连接建立等功能, 从而使整个协议簇变得非常复杂。

2.5 基于 PCE 和域间连接控制的多域异构光网络管控架构

为改变现有 PCE 域间路由由控制架构在跨域连接控制方面的缺陷, 参考文献[15]提出了一种域间连接控制单元 (inter-domain connection control element, ICCE) 实体, 采用状态机控制解决快速域间连接调度和信令交换问题。在此基础上, 文章进一步提出基于 PCE 和 ICCE 的多域异构光

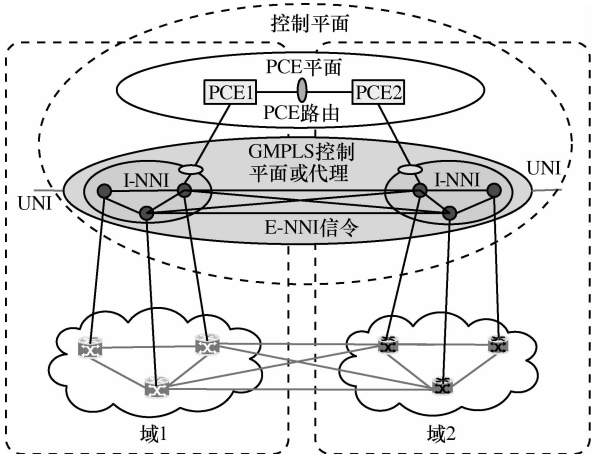


图 4 基于 PCE 的跨域路由



网络管控架构 PIONEER。

图 5 描述了一个典型的 PIONEER 网络架构。该架构在各个传统域内 GMPLS 控制平面之上增加统一的域间控制平面和适配平面,通过域间交互和域内标准适配接口完成对各个域内控制平面的联动控制。域间控制平面至少为每个域配置一个 PCE 和一个 ICCE 实体。一个域的 PCE 仅存储域内的流量工程(TE)信息,并与域序列经过的其他各域 PCE 配合采用 BRPC 算法完成跨域路径计算。一个域的 ICCE 存储经过该域的连接信息,并采用源域 ICCE 主控的方式完成域间连接控制。ICCE 是一种域间控制和通信密集型实体,采用状态机控制解决快速域间连接调度和信令交换问题。不同域的 PCE 和 ICCE 之间由信令网连通。适

配平面由对应各个域的适配单元(AE)组成,用于完成本域 GMPLS 控制平面与 ICCE 之间的域内交互信息过滤和格式转换。

PIONEER 网络架构的优势如下。

(1)采用域间分布式 BRPC 算法可以保证域间资源和拓扑信息的隐蔽性,平衡路径计算负荷,优化路径计算。

(2)采用域间分布式和域内集中式的 ICCE 连接控制机制,可以平衡跨域连接控制和通信负荷,保证快速连接调度。

(3)采用了统一的域间适配接口,仅与各个域交互最小完备域间信息集,对各个设备厂商现有控制平面影响最小,能够实现异构光网络管控平面互连互通的平滑升级。

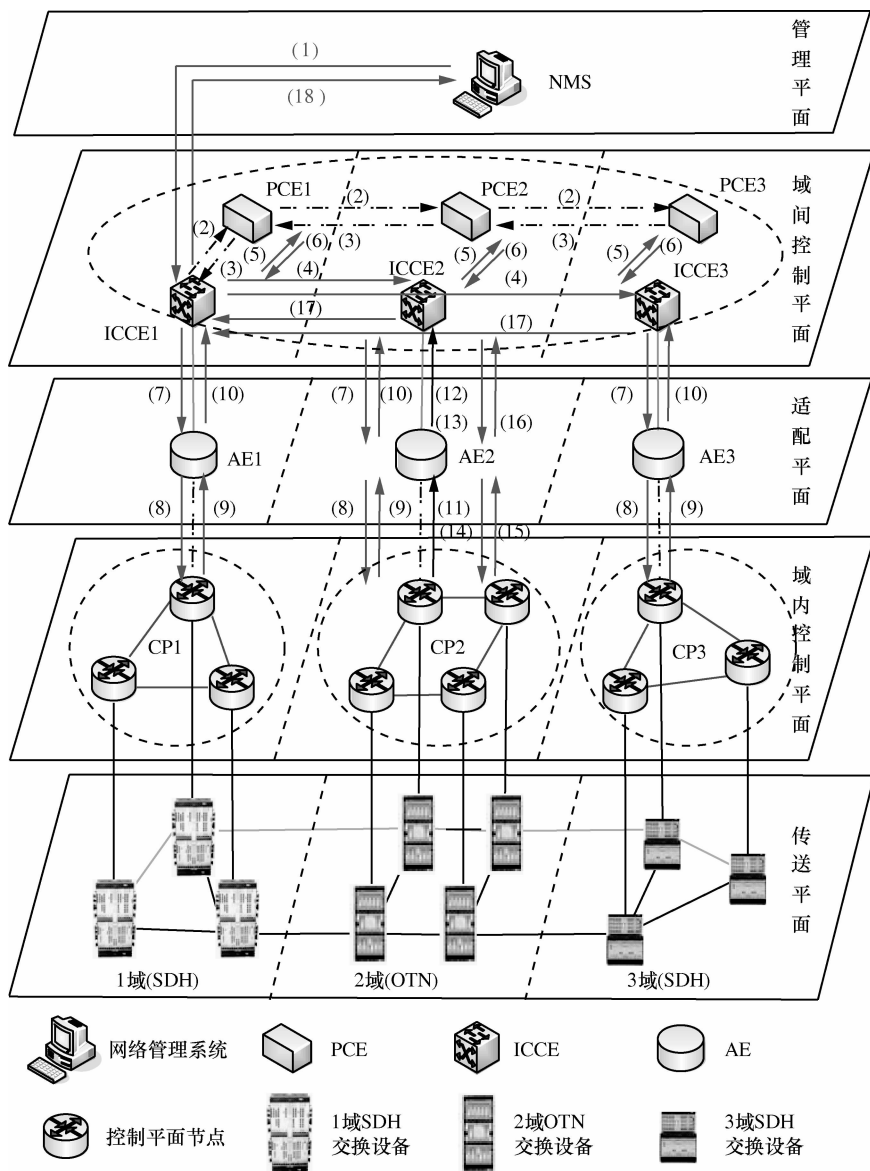


图 5 PIONEER 网络架构

3 软件定义光网络

3.1 软件定义光网络概念及优势

基于 PCE 和域间连接控制的 PIONEER 网络架构可以很好地解决现有异构传送体制下的多域光网络互联互通问题。然而,该架构的路由计算以及连接控制流程和传送体制高度相关。需要进行较大修改才能支持未来可能出现的新型交换设备或交换方式,因此网络建设成本、扩展性以及网络平滑升级能力等将受到很大限制。SDN 的出现为解决该问题提供了一种很好的思路。

2009 年,斯坦福大学的科研人员提出基于 OpenFlow 的 SDN 概念^[6],其核心思想是网络设备控制面与数据面分离。如果将该思想引入到光网络中,构建 SDON,或可从根本上解决光网络扩展性、灵活性和平滑升级的问题。然而,由于光网络发展的历史原因及光(电路)交换自身的特性,当前的光网络相比 IP 网络具有很强的异构性,表现为不同传送体制下网络资源的差异化构成和表示方式、不同的路由计算限制以及不同的连接控制方式等。因此,简单地将基于 OpenFlow 的 SDN 技术移植到光网络中难以同时很

好地解决光网络中的异构互联、扩展性、灵活性和平滑升级等问题。

图 6 给出了一种软件定义光网络的架构。该架构中的适配平面从 PIONEER 网络架构引入,其适配单元可完成不同厂商交换设备和 SDON 控制器之间的资源/控制信息过滤和格式转换。SDON 控制器是架构的核心。同基于 OpenFlow 的 SDN 控制不同,SDON 控制器需针对光网络的资源、业务和控制特性,建立异构传送体制下的统一虚拟资源矩阵以及统一虚拟控制状态机等实体,以达到通过软件改变参数的方式定义不同种类业务的功能,最终实现异构网络在不同业务环境下自适应的互联互通。

SDON 架构的主要优势体现在以下几个方面。

(1) 降低网络建设成本和运营成本

正如计算机的软硬件分离架构带来整个行业成本降低和繁荣,SDON 的控制平面与数据平面分离也能够避免网络节点的重复建设,大大降低网络建设成本;此外,SDON 架构可以支持网络的自动运营和管理,减少人工操作的必要性,从而降低网络运营成本。

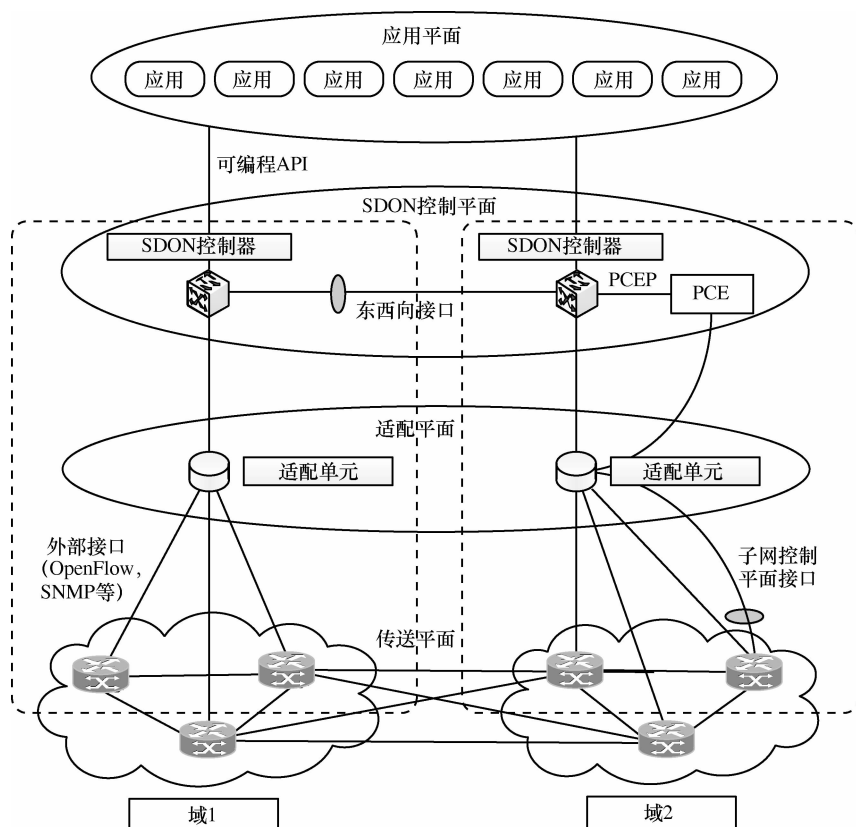


图 6 软件定义光网络架构



(2)支持广义异构网络的互联互通

SDON 架构不但可以实现不同设备商以及现有不同类型交换设备的互联互通,还可以通过统一虚拟资源矩阵、统一虚拟控制状态机等实体的构建实现对未来可能出现的新型交换设备、交换方式以及新型业务的支持。

(3)支持网络平滑升级

控制平面与数据平面分离可以使网络的升级(包括底层交换设备升级和上层应用升级)完全通过软件的方式完成,确保不会对现有网络业务和硬件造成影响。

(4)支持更灵活的路由计算

提供统一虚拟资源接口以及灵活的路由计算接口,可按需利用网络资源并优化路由。

(5)可提供灵活的网络创新实验环境

通过对统一虚拟控制状态机进行软件编程,并利用灵活的路由计算接口,可在真实网络环境下实现复杂的路由及连接控制策略,缩短研发周期,同时降低研发成本。

3.2 SDON 控制器架构

SDON 控制器是 SDON 的核心组成部分。图 6 中涉及了两种 SDON 控制器架构,分别是 Pure SDON 架构以及 SDON+PCE 架构。本节将对这两种控制架构进行详细介绍,并比较其优缺点。

3.2.1 Pure SDON 架构

在 Pure SDON 架构中,SDON 控制器将控制平面与数据平面完全隔离。一方面,控制器为应用商提供统一、抽象的可编程接口,不同应用商可以实现各自不同的网络控制需求。另一方面,由于网络资源的虚拟化技术(如 OpenFlow 协议)、交换设备(如 OF-switch)的智能控制功能得到了最大程度的简化,只需要通过 OF 控制模块接受来自控制器对本地流表(local flow table)的配置,就可决定数据流的转发。

为了对以上两方面提供良好的支撑,控制器的模块结构如图 7 所示,包括控制器内核、流表、资源发现模块、路

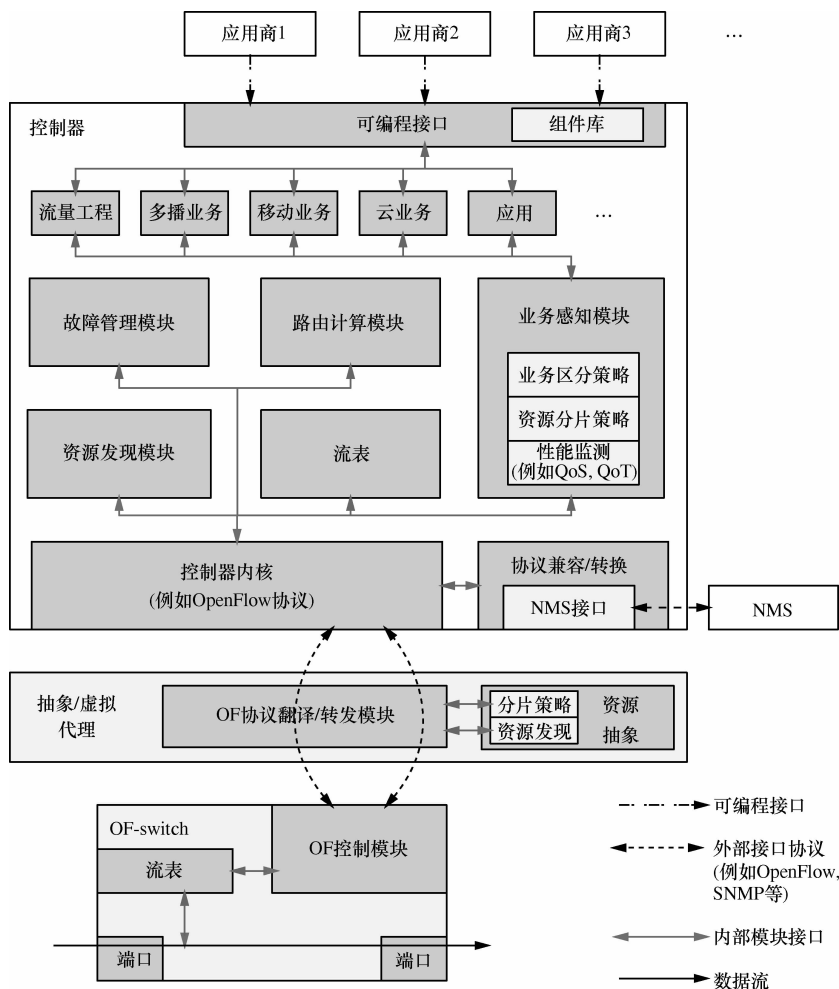


图 7 Pure SDON 架构的控制器模块结构与交互接口

由计算模块、故障管理模块、业务感知模块、协议兼容/转换模块等基本模块,这些基本模块又为应用开发提供组件库,应用商通过统一、抽象的可编程接口可以开发各种各样的应用模块,如流量工程应用、多播业务应用、移动业务应用、云业务应用等。

控制器的内核是唯一与底层交换硬件设备进行交互的模块,然而与计算机的操作系统一样,内核的实现不应该依赖于底层硬件,否则每更换一次交换设备,SDON 控制器都需要修改内核模块,因此在控制器内核与交换设备之间需要经过一个抽象/虚拟代理,也就是虚拟平面。抽象/虚拟代理的核心功能是发现交换设备并进行资源抽象,并在此基础上完成控制器与交换设备间交互协议的翻译与转发功能。

下面将分别对控制器各个模块的功能进行说明。

(1) 控制器内核

主要有两方面功能:第一,负责控制器与底层交换硬件设备的交互,交互协议如 OpenFlow,实际上,底层硬件的实现细节已被抽象/虚拟代理所屏蔽,控制器内核对交换设备的认知仅以抽象的虚拟形式;第二,对控制器所有功能模块进行事件调度,使得所有功能有序、正确、高效、稳定地运行,因此控制器内核是所有模块的基础。

(2) 资源发现模块

获取交换设备的资源状态,资源发现有两种方式:控制器主动查询与交换设备主动上报,前者可以用于网络启动、业务主动查询需求等情况,后者可以用于资源更新、网络故障等情况。不同的应用商还可以设置自己的资源分片策略(业务感知模块),在设置分片策略后,抽象/虚拟代理会将该资源分片与其他资源(共享资源或其他应用商的资源分片)进行隔离,并根据分片策略对资源发现进行过滤,使得该应用商的网络视图仅限该资源分片。

(3) 业务感知模块

该模块主要有 3 方面功能,分别是业务区分、资源分片与性能监测。其中业务区分根据业务应用设置的业务区分策略,对新到达的业务流进行匹配从而进行区分处理。资源分片根据业务应用设置的资源分片策略,为该应用提供特定的网络视图。性能监测对已建立的业务流的 QoS 与 QoT 等网络性能进行实时监测,当性能质量不满足业务需求时,重新触发路由计算与资源分配。

(4) 路由计算模块

当新到达的业务流在本地流表找不到对应表项时,则

该业务流的第一个分组被向上提交给控制器的路由计算模块,路由计算模块首先查询业务感知模块中的业务区分策略,之后在当前的网络资源下计算满足业务需求的路由。

(5) 流表

当一条新的路由计算成功时,路由计算模块对流表进行添加操作。当业务流结束时,路由计算模块对流表进行删除操作。当重新计算路由成功时,路由计算模块对流表进行修改操作。

(6) 故障管理模块

当网络发生故障时,故障管理模块能够发现故障并对流表进行删除操作,进而触发受影响的业务流重新进行路由计算与资源分配。

(7) 协议兼容/转换模块

对网络其他控管设备提供兼容接口,如提供网管系统(NMS)的协议接口(如 SNMP)。

(8) 可编程接口模块

在以上 7 个基本模块提供的组件库的基础上,对应用商开放统一的可编程接口,使得应用商可以自主开发网络应用。

(9) 应用模块

应用商根据自己的业务特点与实际需求在 SDON 控制器自主开发应用模块,实现特定的网络控制功能。应用模块也可以向组件库提供组件。

3.2.2 SDON+PCE 架构

由于路由计算通常占用较多的 CPU、内存等资源,为了降低 SDON 控制器的处理负担,SDON+PCE 架构由专门的路径计算单元(PCE)进行业务感知的路由计算,并保留了 GMPLS 的资源自动发现功能。因此,交换设备需要具有 2 个控制模块,分别是 GMPLS 控制模块(仅保留了资源自动发现功能)以及 OF 控制模块,用来接受来自控制器对本地流表的配置,并决定数据流的转发。

图 8 给出了 SDON+PCE 架构的模块结构。在该架构中,由于控制器不需要资源信息进行路由计算,因此抽象/虚拟代理可以仅对交换设备进行无资源的简化抽象,不需要进行资源发现与资源分片,从而 OF 协议的翻译与转发模块也相应简化(不需要考虑分片策略等)。

控制器与 PCE 共同完成网络的控制功能,下面将分别对控制器与 PCE 的各个模块进行功能说明。相比 Pure SDON 架构,SDON+PCE 架构下控制器的流表、故障管理模块、协议兼容/转换模块以及可编程接口模块的功能有所不同。

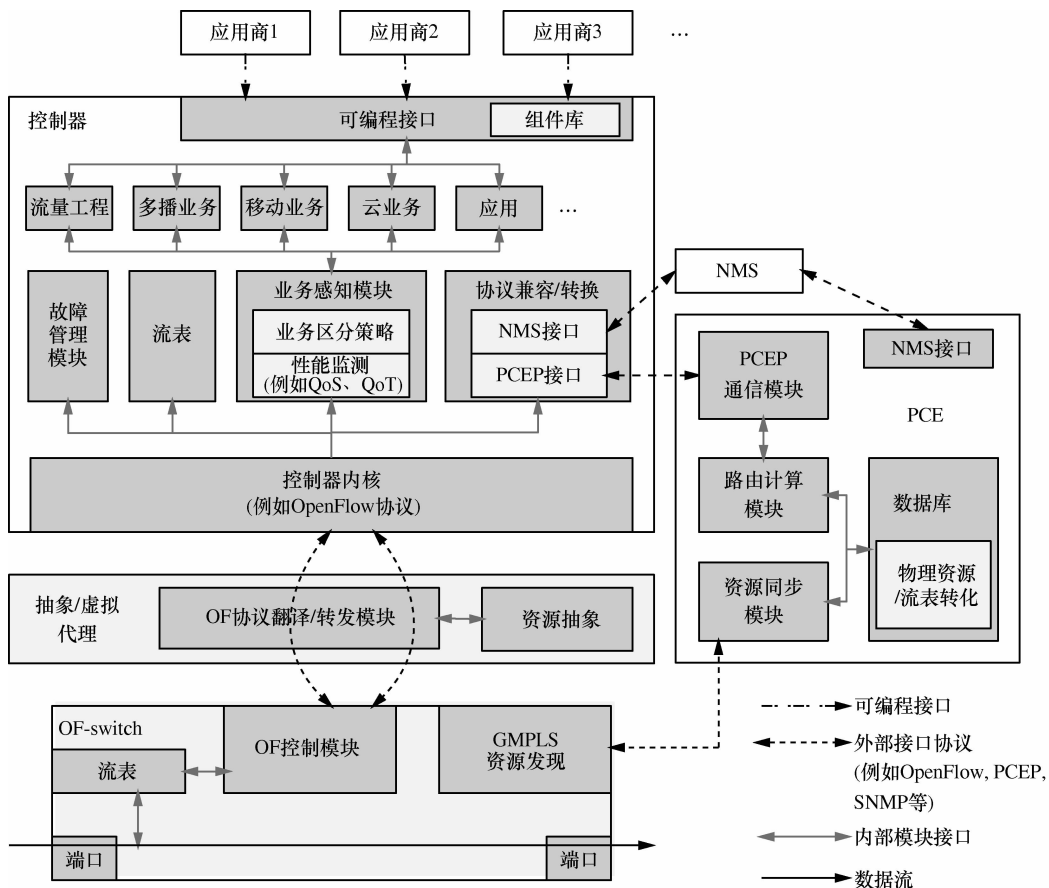


图8 SDON+PCE架构的控制器模块结构与交互接口

(1)流表

当PCE返回一条新的路由时,对流表进行添加操作。当业务流结束时,对流表进行删除操作。当PCE修改一条路由时,对流表进行修改操作。

(2)故障管理模块

当网络发生故障时,故障管理模块能够发现故障并对流表进行删除操作,进而触发受影响的业务流重新向PCE提交路由计算请求。

(3)协议兼容/转换模块

对网络其他控管设备提供兼容接口,其中包括与PCE间的PCEP接口及与网管系统(NMS)间的接口。SDON控制器与PCE间的PCEP通信需要对现有的PCEP进行扩展,比如增加PCEP对流表的支持,增加对业务感知参数传递的支持等。

(4)可编程接口模块:对应用商开放统一的可编程接口,使得应用商可以自主开发网络应用。由于路径计算有专门的PCE完成,SDON控制器欠缺资源信息相关的编程组件,应用商仅能通过设置业务区分策略影响路由计算,

而难于开发自己的路由算法。

此外,该架构的PCE部分由资源同步模块、路由计算模块、数据库模块、PCEP通信模块、NMS接口等模块构成,具体功能如下。

- 资源同步模块:通过与GMPLS控制平面的接口获取资源信息。
- 路由计算模块:控制器向PCE提交的路由计算请求应该包括服务质量等参数,PCE的路由计算模块再根据数据库模块中的资源状况进行受限路由计算。
- 数据库模块:存储从GMPLS控制平面获取的资源信息,并应该能够将物理资源信息与SDON控制器所需的流表信息进行转化,从而使SDON控制器能够理解PCE路由计算模块的计算结果。
- PCEP通信模块:与SDON控制器的PCEP接口进行通信。PCEP需要增加对流表的支持,增加对业务感知参数传递的支持等扩展功能。
- NMS接口:PCE与网管系统(NMS)间的接口,从而NMS可以对PCE进行管理。

3.2.3 架构比较

Pure SDON 和 SDN+PCE 架构适用于具有不同需求的光网络控制。表 2 比较了两种架构在不同方面的优缺点。从表中可以看到, Pure SDON 架构比较适合没有域间信息隐蔽性要求、网络路径优化程度比较高、控制平面与数据平面隔离度较高的全新重建光网络的动态控制; 而 PCE+SDN 架构比较适合具有域间信息隐蔽性要求、基于 GMPLS 控制平面、需要平滑升级的现有光网络动态控制。

表 2 Pure SDON 架与 SDN+PCE 架构的比较

比较方面	Pure SDN	SDN+PCE
信令开销	低	高
路径计算效率	低	高
路径优化程度	高	低
域间信息隐蔽性	低	高
控制/数据平面隔离度	高	低
网络改造难度	较高	较低
标准	比较单一	比较多
可扩展性	较弱	较强

3.3 SDON 实现过程中可能面临的难点问题

作为一种新兴的网络架构, SDON 的发展尚处于初期, 在其未来的实现和完善过程中将会遇到种种挑战和困难, 等待研究和解决。

(1) 高效、稳定、扩展性强、具有并发事件处理能力的控制器内核调度

SDON 采用集中式控管机制, 一个 SDON 控制器需要同时控制多个底层硬件设备。在高动态网络环境下, 上层业务与底层网络资源之间的交互以及底层硬件设备与 SDON 控制器之间的交互非常频繁, SDON 控制器需要处理的信息和事件数量巨大, 需要 SDON 控制器具有高效的并发事件处理能力。因此, 如何实现高效、稳定、扩展性强、具有并发事件处理能力的控制器内核调度技术是 SDON 控制器内核设计与实现的一个关键问题。

(2) 适用于不同的交换设备的资源抽象机制与网络资源的虚拟化技术

网络设备交换粒度和交换方式的差异, 造成管控平面无法直接对网络资源进行调度, 需要根据网络中设备和资源的特点, 基于网络资源抽象机制, 对底层设备进行统一的虚拟化。通过抽象和虚拟化技术, 将种类繁多的底层硬件设备生成统一化视图, 是实现 SDON 底层资源动态灵活调度的关键。

(3) 适用于不同上层应用和业务类型的可编程控制状

态机设计和实现

由于不同上层应用、业务类型和策略的路由、连接控制流程不尽相同。若要对其进行全面支持, 需要 SDON 控制器对其各自的控制状态机进行分别实现, 控制架构复杂, 扩展性差。解决该问题的一种方法是建立可编程控制状态机架构, 通过设置统一的虚拟状态机和输入可软件定义的状态转移矩阵, 可实现各种复杂的控制流程。其中, 统一虚拟状态的确定以及状态转移矩阵和控制流程的映射关系是研究的难点问题。

(4) 基于网络资源虚拟化技术的网络资源的实时动态分配问题

光网络的路由及资源分配需要遵循波长连续性约束等诸多限制性条件, SDON 中基于虚拟化网络资源的跨层规划优化需要在这些限制性条件下进行, 虚拟化网络资源的调度需要考虑到实际网络资源分配中的约束, 因此基于虚拟化网络资源的跨层规划优化与资源调度具有一定难度。

(5) 对不同类型底层设备的接口协议进行适配

核心网转发设备种类繁多, 包括 MPLS 路由器、PTN、OTN 等。此外, 不同厂商设备的控制通常采用大量私有协议和消息格式。这些网络异构特性将给网络资源获取、虚拟化以及转发设备的控制带来极大阻碍。

4 结束语

回顾光网络的发展历程, WDM 技术的出现极大地扩展了光纤传输的带宽, 成功解决了网络传输过程中的带宽瓶颈问题, 光网络的概念应运而生; 波长路由概念和器件的出现解决了 WDM 光网络节点处的光电转换瓶颈问题, 全光网络的概念产生, 光网络蔚然兴起; 控制平面的引入实现了光网络业务的动态调度, 出现以 ASON 为代表的智能光网络。

随着光网络规模的不断扩大, 未来智能光网络的发展将面临显著的异构化、扩展性等方面的问题。为解决这些问题, E-NNI、PCE 等网络架构出现, 并逐步向 SDON 架构演进, 最终使光网络控制架构脱离上层应用和底层设备的限制, 实现光网络的低成本化、高扩展性和灵活性。

参考文献

- 1 张杰, 徐云斌, 顾晓仪等. 自动交换光网络 ASON. 北京: 人民邮电出版社, 2004



- 2 Delange O E. Wide-band optical communication systems, part II -frequency division multiplexing. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(10):1683
- 3 Brackett C A. Dense wavelength division multiplexing networks: principles and applications. IEEE Journal Sel Areas Commun 1990, 8(6):948~964
- 4 Tachikawa Y, Inoue Y, Kawachi M, *et al.* Arrayed-waveguide grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths. Electronics Letters, 1993, 29(24):2133~2134
- 5 Ramaswami R, Sivarajan K N. Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks. IEEE on IEEE Journal Selected Areas Communications, 1996, 14(5):840~851
- 6 Banerjee D, Mukherjee B. Wavelength-routed optical networks: linear formulation, resource budgeting tradeoffs, and a reconfiguration study. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2000, 8(5):598~607
- 7 ITU-T G.8080/Y.1304. Architecture for the Automatic Switched Optical Network (ASON),2001
- 8 ITU-T G.8080-Adm1. Architecture for the Automatic Switched Optical Network (ASON) Amendment, 2003
- 9 张成良. ASON 的标准化和技术进展. 电信技术, 2003(9)
- 10 OIF. OIF E-NNI Signaling Specification, 2009
- 11 OIF. External Network-Network Interface (E-NNI) OSPFv2-based Routing-2.0 (Intra-Carrier) Implementation Agreement, 2011
- 12 OIF. Intra-Carrier E-NNI Signaling Specification. OIF-E-NNI-Sig-01.0, 2004
- 13 Farrel A, Vasseur J-P, Ash J. A Path Computation Element (PCE)-based Architecture. RFC4655, 2006
- 14 Vasseur J, Zhang R, Bitar N, *et al.* A Backward-recursive PCE-based Computation (BRPC) Procedure to Compute Shortest

Constrained Inter-domain Traffic Engineering Label Switched Paths. RFC5441, 2009

- 15 鲁睿, 郑小平, 华楠. 多域异构光网络互连互通管控机制研究和实现. 清华大学学报(自然科学版), 2013(2)
- 16 Das S, Parulkar G, McKeown N. Unifying packet and circuit switched networks. Proceedings of 2009 IEEE GLOBECOM Workshops, Honolulu, HI, 2009

[作者简介]



华楠,男,博士,清华大学助理研究员,从事光网络控制管理及全光交换技术等方面研究,发表高水平期刊/会议论文 40 余篇,获授权发明专利 8 项,担任 OSA Advanced Photonics for Communications、ChinaCom 国际会议 TPC 成员以及 IEEE JLT、IEEE JOCN、IEEE JSAC、SPIE Optical Engineering、IET Communications、OSN 等杂志审稿人,IEEE、OSA 会员。



郑小平,男,清华大学教授、博士生导师,面向国家宽带信息网络发展的重大需求,长期致力全光通信网络与微波光子学的研究,先后负责、参与国家重大/重点基金项目、国家重点基础研究发展计划(“973”计划)、国家高技术研究发展计划(“863”项目)、国防专项等 20 余项国家级科研项目,获省部级科技进步奖二等奖 2 项、三等奖 2 项,获国家发明专利 16 项,发表论文百余篇。

(收稿日期:2014-01-22)

·简讯·

2013 年 12 月通信业主要指标完成情况(二)

指标名称	单位	本月末到达	比上年末净增	本月净增
固定电话用户合计	万户	26 698.5	-1 116.8	-130.1
公用电话用户	万部	2 233.4	-113.7	-10.2
城市电话用户	万户	18 456.8	-436.6	-107.0
住宅电话用户	万户	10 474.3	-538.9	-75.1
农村电话用户	万户	8 241.7	-680.2	-23.1
住宅电话用户	万户	6 643.4	-672.3	-27.1
移动电话用户合计	万户	122 911.3	11 695.8	581.6
其中:3G 用户	万户	40 161.1	16 880.8	1 473.3
互联网拨号用户	万户	485.1	-84.7	0.4
互联网宽带接入用户	万户	18 890.9	1 905.6	83.4
其中:xDSL 用户	万户	10 716.5	-1 174.6	-159.8
移动互联网用户	万户	80 756.3	4 319.8	398.6
固定电话普及率	部/百人	19.7		
移动电话普及率	部/百人	90.8		

(来源:工业和信息化部运行监测协调局)