



SDN/NFV

重构未来网络

电信运营商愿景与实践

邵广禄 中国联通网络技术研究院 / 编著



中国工信出版集团



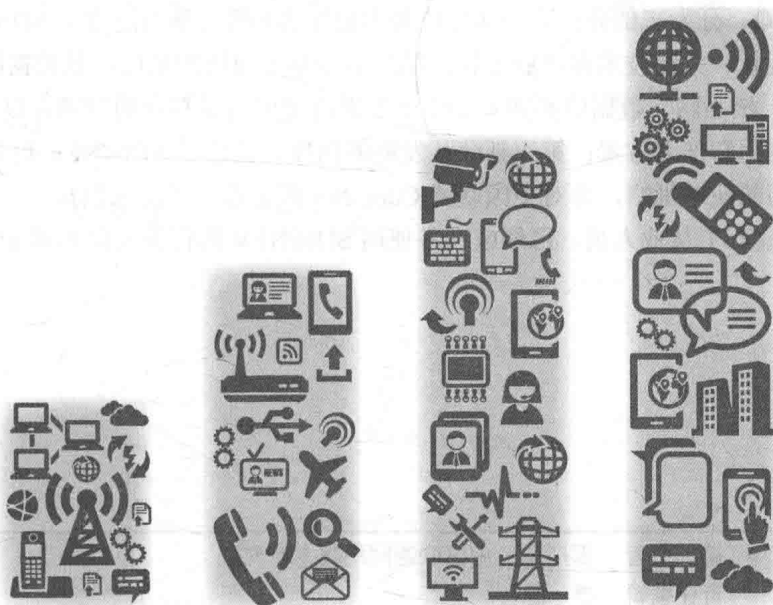
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

SDN/NFV

重构未来网络

电信运营商愿景与实践

邵广禄 中国联通网络技术研究院 / 编著



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

SDN/NFV重构未来网络：电信运营商愿景与实践 /
邵广禄编著. — 北京：人民邮电出版社，2016.10
ISBN 978-7-115-43701-3

I. ①S… II. ①邵… III. ①计算机网络—网络结构
—研究 IV. ①TP393.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第241331号

内 容 提 要

近年来，SDN/NFV 技术所倡导的开放化、虚拟化、智能化和融合化理念得到了业界的广泛认同，全球产业界将 SDN/NFV 作为未来演进的重要方向。本书是一本全面、细致且极具指导意义的著作，从 SDN/NFV 的基本原理出发，阐明了 SDN/NFV 技术在运营网络中的主要应用场景和基本技术方案，根据 ICT 产业的发展趋势为读者铺开了一幅未来网络的精美画卷。

全书共 15 章，分为三部分：第一部分从基本原理的角度，重点阐述了 SDN/NFV 技术的基本概念、标准现状、关键技术和产业现状；第二部分基于应用的角度，从数据网、接入网、传送网、IP RAN、核心网、数据中心和安全 7 个方面讲述了当前存在的问题，以及 SDN/NFV 在相应场景下的应用和部署方案；第三部分从发展的角度，论述了 SDN/NFV 对 ICT 产业的影响以及未来运营商的应对策略，并对中国联通 Cube-Net 理念进行了深入剖析。

本书适合通信/IT 从业人员、已经或准备使用 SDN/NFV 的行业人员和对 SDN/NFV 有兴趣的人员阅读。

-
- ◆ 编 著 邵广禄 中国联通网络技术研究院
责任编辑 李 静
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本：787×1092 1/16
印张：19 2016 年 10 月第 1 版
字数：328 千字 2016 年 10 月北京第 1 次印刷
-

定价：88.00 元

读者服务热线：(010)81055488 印装质量热线：(010)81055316

反盗版热线：(010)81055315

编 委 会

傅 强 迟永生 唐雄燕 王光全 赫 罡

符 刚 华一强 曹 畅 郑 毅 苗 杰

薛 淼 童俊杰 郭爱鹏

前言

随着“互联网+、工业 4.0、智慧城市”等概念的提出，智能终端以及云服务的大量普及应用，网络的规模和流量快速激增，预计未来 5~10 年，宽带流量会有 10 倍的增长，连接节点数会增加到百亿量级，网络和信息化服务领域不再限于公众用户，更多的传统服务和行业应用领域会成为互联网的新兴发展领域。同时，以 SDN 和 NFV 技术为核心的新兴技术不断涌现，推动网络和信息化服务基础设施开始新一轮的变革。

SDN/NFV 作为未来网络演进的重要方向，成为当前业界关注的热点。但是对于 SDN/NFV 从何而来、往何处去，业界当前尚没有较为完整和系统的资料供参考。特别是从运营商业务需求和网络演进的角度考虑较少。因此，本书从技术发展和网络演进的角度，系统地阐述了 SDN/NFV 技术的基本概念及其关键技术和解决方案，并提出了网络演进的方向，为通信/IT 的从业人员全面了解 SDN/NFV 的概念、原理和应用提供指南。

本书将 SDN/NFV 技术整体分为三个部分：原理篇、应用篇和展望篇。

原理篇在第 1 章介绍了 SDN/NFV 技术诞生的背景，并给出了对 SDN/NFV 技术的定义，让读者对 SDN/NFV 形成基本认识；第 2 章介绍了相关标准组织在 SDN/NFV 方面相关的工作和进展，让读者对 SDN/NFV 的标准化现状有全面深入的了解；第 3 章深入阐释了关键技术和关键问题，主要包括 SDN 的整体架构、OpenFlow 技术以及 NFV 的关键技术；第 4 章通过对当前产业和产业链的描述和对比，剖析了新技术给产业格局带来的影响和变化。

应用篇的第 5 章对电信运营商的整体网络做了简要介绍，让读者对当前网络组织有大致了解；第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 10 章和第 11 章从现网的现状出发，以存在的问题为需求，分别

描述了 SDN/NFV 在数据网、接入网、传送网、IP RAN 和核心网数据中心中的应用和相关解决方案；第 12 章给出了安全方面的整体考虑。

展望篇的第 13 章通过对当前 ICT 产业的概述，根据其发展趋势，分析了 SDN/NFV 对 ICT 产业的影响；第 14 章在给出了 ICT 产业发展和趋势下，运营商的应对策略；最后，第 15 章深入讲解了中国联通 CUBE-Net 2.0 的理念，形成了 SDN/NFV 在网络中部署的完整蓝图。

本书是近年来中国联通网络技术研究院根据联通集团所确立的网络技术发展和演进方向而开展的 SDN/NFV 技术相关项目和开展相关研究工作的阶段性总结，也是中国联通网络技术研究院从事 SDN/NFV 技术研究的同事们的集体智慧的结晶。其中，邵广禄对本书的出版进行了精心策划，拟定了全书的结构、主旨和核心思想；傅强、迟永生协助制定了全书的架构，并对关键章节进行了指导和编写；唐雄燕、王光全负责组织编写、讨论，并对全书进行了统稿；赫罡对本书各章节的编写提供了大量素材；符刚负责本书第一部分第 4 章、第二部分第 7 章部分章的编写并协助对全书进行了统稿；童俊杰负责本书第一部分第 1 章的编写；华一强负责本书第一部分第 2 章、第二部分第 5 章、第 6 章部分章节的编写；苗杰负责本书第一部分第 2 章、第 3 章、第二部分第 10 章部分章节的编写；郭爱鹏负责本书第一部分第 2 章、第二部分第 6 章部分章节的编写；薛淼负责本书第一部分第 2 章、第 4 章、第二部分第 10 章部分章节的编写；许阳和甘震负责本书第一部分第 2 章部分章节的编写；程海瑞负责本书第一部分第 2 章、第二部分第 7 章部分章节的编写；郑毅负责本书第一部分第 2 章、第 3 章部分章节和第二部分第 11 章的编写；曹畅负责本书第一部分第 2 章、第 3 章部分章节和第二部分第 9 章、第三部分的编写；师严和简伟负责本书第二部分第 8 章的编写；姜楠负责本书第二部分第 12 章的编写。在编写过程中，还得到了各专业专家如夏俊杰、廖军、王海军、马铮、张贺、张沛、黄永亮、何晓峰、杨艳松、周光涛、文湘江等人的悉心指导，在此一并表示感谢。在编写过程中，参考了许多文献资料，在此对文献作者表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在谬误，欢迎各位读者批评、指正。

目 录

第一部分 原理篇	1
第1章 引言	2
本章参考文献	4
第2章 标准组织	5
2.1 ONF	5
2.2 ODL	11
2.3 ETSI	14
2.4 IETF	17
2.5 ITU-T	22
2.6 3GPP	26
2.7 BBF	29
2.8 CCSA	31
2.9 ONOS	32
本章参考文献	35
第3章 关键技术和关键问题	37
3.1 SDN 架构技术	37
3.1.1 SDN 架构总览	37
3.1.2 基础设备层	38
3.1.3 控制层	40
3.1.4 协同平台与应用层	43
3.1.5 SDN 的整体架构及协议、接口问题	45

3.1.6	SDN 的硬件问题	47
3.1.7	SDN 与其他技术的协调发展问题	48
3.1.8	网络平滑演进的问题	49
3.2	OpenFlow 关键技术	51
3.2.1	OpenFlow 原理	51
3.2.2	OpenvSwitch	52
3.2.3	NOS 网络操作系统	55
3.3	NFV 关键技术	57
3.3.1	概念定义	57
3.3.2	价值分析	57
3.3.3	应用场景	58
3.3.4	架构	60
3.3.5	概念模块与接口	62
3.3.6	关键技术	64
3.3.7	SDN 与 NFV 的关系	67
	本章参考文献	69
第 4 章	产业现状及对产业链的影响	71
4.1	SDN 产业研究概况	71
4.1.1	通信设备商研究情况	71
4.1.2	IT 及新兴设备厂商研究情况	75
4.1.3	芯片厂商研究情况	77
4.1.4	传统运营商研究情况	78
4.1.5	ICP 研究情况	79
4.1.6	小结	80
4.2	SDN 对产业链的影响评估	80
4.2.1	SDN 对网络运营商的影响	80
4.2.2	SDN 对 ICP 的影响	81
4.2.3	SDN 对传统通信设备商的影响	81
4.2.4	SDN 对 IT 厂商的影响	82

4.2.5 产业格局的变化	82
4.2.6 小结	82
4.3 NFV 产业研究概况	83
4.3.1 通信设备商的研究情况	83
4.3.2 IT 及软件厂商研究情况	86
4.3.3 传统运营商研究情况	88
4.3.4 小结	94
4.4 NFV 对产业链影响评估	94
4.4.1 NFV 对通信设备商的影响	94
4.4.2 NFV 对 IT 及软件厂商的影响	94
4.4.3 NFV 对网络运营商的影响	95
4.4.4 小结	95
本章参考文献	95
第二部分 应用篇	99
第 5 章 引言	100
5.1 电信运营商的网络介绍	100
5.2 数据网	101
5.3 有线接入网	102
5.4 传送网	102
5.5 IP RAN 网络	103
5.6 核心网	103
5.7 数据中心	104
5.8 安全	104
本章参考文献	104
第 6 章 数据网	106
6.1 数据网概况及发展趋势	106
6.1.1 数据网介绍	106
6.1.2 数据网的发展趋势	108

6.2 数据网存在的问题	108
6.2.1 数据网扩容频繁的问题	108
6.2.2 城域网的边缘层	109
6.3 场景需求和解决方案	110
6.3.1 IP 骨干网	110
6.3.2 城域网智能化边缘	115
6.4 厂商设备支持情况	119
6.4.1 设备厂商一：华为	119
6.4.2 设备厂商二：思科	121
6.4.3 设备厂商三：贝尔	122
6.4.4 设备厂商四：中兴	123
6.5 总结和期望	124
6.5.1 基于 SDN/NFV 的数据网目标架构	124
6.5.2 基于 SDN/NFV 的数据网展望	127
本章参考文献	127
第7章 接入网	129
7.1 接入网现状及发展趋势	129
7.1.1 接入网现状	129
7.1.2 接入网发展趋势	130
7.1.3 接入网虚拟化的研究进展	132
7.2 接入网虚拟化的应用场景和解决方案	133
7.2.1 宽带客户网关虚拟化的技术与方案	133
7.2.2 宽带客户网关虚拟化的部署策略	139
7.2.3 语音功能虚拟化的技术与方案	143
7.2.4 宽带客户网关虚拟化的部署案例	146
7.3 接入网虚拟化对网络结构和业务承载的影响	148
7.3.1 对网络架构的影响	148
7.3.2 对网络流量流向的影响	149
7.3.3 对业务流程的影响	150

7.3.4 对网络安全的影响	150
7.3.5 对业务部署的影响	151
7.3.6 对 IPv6 的影响	152
本章参考文献	152
第 8 章 传送网	154
8.1 网络现状及存在的问题	154
8.1.1 传送网网络现状	154
8.1.2 传送网存在的问题	155
8.2 光传送网中 SDN 技术的发展现状	156
8.2.1 软件定义可编程的光传送技术(传送平面)	156
8.2.2 软件定义智能化的传输控制技术(控制平面)	159
8.3 软件定义光传送网国内外标准现状	162
8.4 传送网虚拟化的应用场景和解决方案	163
8.4.1 基于 SDN 的 IP 与光资源协同	163
8.4.2 基于 SDN 的 IP 与光协同的具体架构	165
8.4.3 IP 和光协同的研究场景-OTN 和 IP RAN 融合场景	172
8.5 本章小结	173
本章参考文献	174
第 9 章 IP RAN	176
9.1 IP RAN 网络现状及存在的问题	176
9.1.1 IP RAN 网络现状	176
9.1.2 IP RAN 存在的问题	177
9.2 基于 SDN 的 IP RAN 网络技术	178
9.2.1 基于 SDN 的 IP RAN 技术特征	178
9.2.2 网络参考架构	179
9.3 基于 SDN 的 IP RAN 组网模型	181
9.3.1 IP RAN 网络接入 SDN 化	181
9.3.2 IP RAN 网络全网 SDN 化	182

9.3.3 SDN 控制器层级结构	183
本章参考文献	184
第 10 章 核心网	186
10.1 核心网现状及发展趋势	186
10.2 基于 SDN/NFV 的核心网演进	187
10.2.1 需求与场景	187
10.2.2 关键技术	189
10.2.3 面临挑战	192
10.3 基于控制转发分离的分组域网关	193
10.3.1 需求与场景	193
10.3.2 关键技术与方案	194
10.3.3 面临挑战	195
10.4 基于 SDN 的 Gi-LAN Service Chaining	196
10.4.1 需求与场景	197
10.4.2 Service Chaining 关键技术	199
10.4.3 Service Chaining 挑战	204
10.5 核心网行业进展	205
10.5.1 设备商情况	205
10.5.2 运营商情况	211
10.6 基于 SDN/NFV 的未来核心网架构展望	214
本章参考文献	215
第 11 章 数据中心	217
11.1 IDC 的发展趋势	217
11.1.1 市场发展趋势	217
11.1.2 业务发展趋势	219
11.1.3 IDC 的技术发展趋势	220
11.2 现有数据中心组网现状及问题	221
11.3 基于 SDN 的 IDC 解决方案	225

11.3.1 数据中心单站点 (DCF) SDN 组网方案	226
11.3.2 基于 SDN 的 DCI 网络流量疏导方案	234
11.3.3 传统 IDC 的 SDN 演进方案	237
本章参考文献	240
第 12 章 安全	242
12.1 概述	242
12.2 SDN 可提供的安全服务能力	243
12.2.1 出色的流量控制能力	243
12.2.2 强大的网络控制能力	244
12.2.3 灵活的 IP 防御能力	245
12.2.4 便捷的网络溯源能力	245
12.3 SDN 网络安全威胁	246
12.3.1 SDN 控制器面临巨大挑战	247
12.3.2 网络接口面临潜在安全威胁	248
12.3.3 策略下发和执行面临潜在冲突	249
12.3.4 突发意外事件	250
12.4 SDN 安全防护策略	250
12.4.1 制定组网部署安全方案	250
12.4.2 有针对性地设立安全威胁防护机制	251
12.4.3 应急恢复机制	253
12.5 SDN 安全未来研究方向	254
本章参考文献	255
第三部分 展望篇	257
第 13 章 ICT 产业的融合与变革	258
13.1 智能化家庭	258
13.2 车联网	259
13.3 融合通信	259
13.4 移动通信与大数据	260

13.4.1 海量数据	261
13.4.2 业务类型演进	261
13.4.3 数据多样化	262
13.4.4 数据的空-时域大动态变化	262
13.5 产业互联网	263
13.6 SDN/NFV 对 ICT 产业的重大影响	265
本章参考文献	266
第 14 章 未来运营商的应对策略	268
14.1 SDN/NFV 对电信运营商的实现意义	268
14.1.1 网络应对策略	269
14.1.2 业务模式和运营模式策略	270
14.2 海外运营商基于 SDN/NFV 的发展战略	272
14.2.1 AT&T Domain 2.0 计划	272
14.2.2 Verizon N ² GN 战略	274
本章参考文献	275
第 15 章 中国联通 CUBE-Net 理念解析	277
15.1 CUBE-Net 2.0 架构理念	277
15.1.1 泛在超宽带是基础	278
15.1.2 弹性网络是目标	279
15.1.3 云网协同是手段	279
15.2 CUBE-Net 2.0 关键特征	280
15.2.1 一项原则: 网络服务能力领先与总体效能最优	280
15.2.2 两个中心: 云端双服务中心的网络格局	281
15.2.3 三维解耦: 实现弹性灵活的网络服务	282
15.2.4 四类集约: 打造高效经济的网络基础	283
15.3 CUBE-Net 2.0 展望	287
本章参考文献	287
后记	289

第一部分

原 理 篇

水之积也不厚，则其负大舟也无力！ ——庄子



Chapter 1

第 1 章 引 言

当今时代，是信息产业和通信产业共同发展的时代。信息技术（IT，Information Technology）和通信技术（CT，Communication Technology）互相渗透，互相影响，一些跨界技术应运而生，SDN（Software Defined Networking，软件定义网络）就是其中之一。

第一次电报、第一次跨洋电话、第一颗通信卫星，以及光纤通信、无线通信的出现，使人类彻底告别了烽火和驿站，从此天涯若比邻。第一台电子计算机的成功研制、个人电脑的诞生以及互联网的出现，极大地推动着人类社会网络化、信息化的进程。移动互联网、移动商务、大数据等 ICT（Information Communications Technology，信息通信技术）服务^[1]的兴起，对人们的日常生产、生活产生了深刻的影响，为用户带来了极大的便利，但同时对 IT 和 CT 的基础设施建设提出了更高的要求，希望它能做到按需供给、随需而变、灵活健壮。

为了满足这些需求，业界提出了软件定义基础设施的概念和方法，将基础设施的资源通过虚拟化方式进行抽象，包括服务器、存储、网络等，并将资源变成一种 IT 服务，通过自动化的流程与软件方式提供给客户。SDN 技术的出现适应了网络 IT 化、设备软件化和硬件标准化的趋势。SDN 的设计理念是将网络的控制平面与转发平面进行分离，逻辑上集中的控制层面能够支持网络资源的灵活调度，灵活开放的转发面能够支持网络

能力的按需调用, 并实现可编程化控制^[2]。通过这种方式, 推动网络能力被便捷地调用, 支持网络业务的创新。

SDN 技术首先孕育于信息产业, 反过来应用于通信产业, 这是信息产业发展和通信产业需求到达一定阶段契合的必然结果。信息产业高速发展, 推动了用户平均使用流量的高速增长, 但是通信运营商业收入的同步增长却很难实现, 造成流量/成本与收入的剪刀差持续扩大。通信产业的需求是降低网络成本, 而通信网络复杂而僵硬的网络架构阻碍了这一目标。通信设备普遍是软硬件垂直一体化的封闭架构, 网络由具备复杂功能的专用设备构成, 新业务的提供往往需要开发新设备, 导致网络的 CAPEX (Capital Expenditure, 资本性支出) 和 OPEX (Operating Expense, 运营成本) 居高不下。SDN 的软硬件解耦和 NFV (Network Function Virtualisation, 网络功能虚拟化) 的网络虚拟化可以降低设备的 CAPEX, 集中控制可以降低网络的 OPEX, 网络可编程可以快速提供新业务, 从而降低网络成本, 保持通信运营商的利润率, 适应流量高速增长的需求。

关于 SDN 的定义, 众说纷纭, 迄今为止并没有一个权威性的定义。不同的组织从不同的角度给出了不同的定义。

ONF (Open Networking Foundation, 开放网络基金会) 认为, SDN 的典型架构分为三层, 最上层为应用层, 包括各种不同的业务和应用; 中间的控制层主要负责处理数据平面资源的编排、维护网络拓扑和状态信息等; 最下层的基础设施层负责数据处理、转发和状态收集^[3]。除了上述三个层次之外, 控制层与基础设施层之间的接口和应用层与控制层之间的接口也是 SDN 架构中的两个重要组成部分。按照接口与控制层的位置关系, 前者通常被称作南向接口, 后者则被称作北向接口。其中, ONF 在南向接口上定义了开放的 OpenFlow 标准^[4], 而在北向接口上还没有做统一要求。因此, ONF SDN 架构更多地是从网络资源用户的角度出发, 希望通过对网络的抽象推动更快速的业务创新。

IETF 也以软件驱动网络 (Software Driven Network) 为出发点研究 SDN, 成立了 SDN BOF, 并提出了 IETF 定义的 SDN 架构。IETF 定义 SDN 的核心思路是重用当前的技术而不是 OpenFlow, 关注重点是设备控制面的功能与开放 API, 从而充分利用现有设备, 保护投资, 并快速实现 SDN。

编者认为, SDN 是一种新型的网络架构, 是对现有网络的一种颠覆性创新。它的设计理念是将网络的控制平面与数据转发平面进行分离, 并实现可编程化控制。SDN 网络满足“控制和转发分离、集中控制、开放北向接口”的特性, 同时希望它实现软硬件解耦。

在 2012 年 4 月的开放网络峰会上, 谷歌分享了他们在数据中心网络中遭遇的管理