

中国移动创新系列丛书



中国移动通信研究院院长 黄晓庆

上海贝尔副总裁 桑须雷

JDSU 传输仪表全球首席执行官 Lars Friedrich

联袂推荐

100G 超宽带

技术与测试

徐荣 沙慧军 陆庆杭 龚倩 主编

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

中国移动创新系列丛书



100G 超宽带 技术与测试

徐莹 沙慧军 陆庆杭 龚倩 主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

100G超宽带技术与测试 / 徐荣等主编. — 北京 :
人民邮电出版社, 2013. 2
(中国移动创新系列丛书)
ISBN 978-7-115-30360-8

I. ①1… II. ①徐… III. ①光通信—光传输技术②
光通信—测试技术 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第302172号

内 容 提 要

本书以 100G 技术和测试为核心,系统地介绍了 100G 发展的驱动力、关键技术、测试方案和测试工具。全书共分 4 章。第 1 章简要介绍了发展 100G 的市场推动力、100G 面临的挑战和应对措施、100G 的标准化及产业发展状况、100G 的全球应用案例。第 2 章分别从 100G 的业务侧 100GE 接口、100G 的 OTN 封装映射和 100G 的线路传输 3 个角度详细介绍了 100G 的使能技术,其中重点介绍了高速系统中的新型编码调制技术、相干及数字信号处理技术、超强前向纠错技术。第 3 章详细论述了 100GE 以太网的测试技术、100G OTN 客户侧测试技术以及 100G OTN 线路侧测试技术。第 4 章介绍了 JDSU 公司关于 100G 的测试工具,并详细阐述了基于 JDSU 公司的 100G 测试方案的 100G 重点测试案例。

本书可供从事干线传输、光传送网、城域网、无线接入网传输维护和运营管理人员参考,也可作为全业务接入、宽带运营、大客户业务提供的运营管理人员的培训教材与高等院校教师和学生的教材或参考书。

中国移动创新系列丛书

100G 超宽带技术与测试

- ◆ 主 编 徐 荣 沙慧军 陆庆杭 龚 倩
责任编辑 李 静
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京艺辉印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16
字数: 372 千字
- 2013 年 2 月第 1 版
2013 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-30360-8

定价: 50.00 元

读者服务热线: (010)67119329 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

本书编写组

主编：徐 荣 沙慧军 陆庆杭 龚倩

编著：陈 国 邓春胜 邹宏强 李允博 徐国军

王 强 钱军波 王晓义 高静敏 王崇民

季海峰 张金亮 李敏峰 罗建虹 陈孟奇

谢剑文 罗伟民 王应波 马伟成 杨 迪

张先娥 刘 剑 张 海 平宏伟 刘珺炜

褚文轩 云雅琼 张海懿 赵文玉 李 芳

丁 浩 郭中华 蒋俏峰 沈 翔 王玉明

说 明

100G 是 100Gbit/s 的简称, 100GE 是 100Gbit/s 以太网的简称。不过, 本书所论述的 100G 不仅仅是一个 100Gbit/s 信息传输“速率”的概念, 主要指的是信息通信网络全局化地具有提供 100Gbit/s 服务的能力, 包括 100Gbit/s 的传输能力、100Gbit/s 的业务接入能力、100Gbit/s 的承载能力、100Gbit/s 的交换能力。在信息通信网络中这些能力分别由不同的通信设备来承担, 例如 100G 的传输能力就由单波 100Gbit/s 的波分复用(WDM)系统来提供; 100G 的业务接入能力就由 100Gbit/s 的以太网交换机或路由器来提供(也就是所谓的 100GE 技术); 100G 的承载和交换能力就由光传送网(OTN)设备和骨干路由器来提供。因此, 在本书行文中统一用“100G”来代表网络所具有的 100Gbit/s 的传输、接入和交换能力。为简便起见, 本书中的 2Mbit/s、4Mbit/s、10Mbit/s、40Mbit/s 简称为 2M、4M、10M、40M。

前 言

100G 的市场驱动力主要来自五个方面：一是 IP 流量的激增；二是 100G 可以降低每比特的成本；三是 100G 可以提供新的收益机会；四是有助于运营商对已有光纤的利用，提高投资回报率；五是可以降低网络的时延。

相对于 10G 和 40G 线路速率而言，100G 线路速率能更好地解决运营商日益面临的业务流量及网络带宽持续增长的压力。100G 高速核心路由器端口效率比 $10 \times 10G$ 效率高 60% 以上，简化管理、降低功耗并提高了集成度。100G 路由器及数据业务的应用也将成为 100G WDM 的直接动力。

在 IEEE、ITU-T 和 OIF 等标准组织的努力下，100G 相关标准已成熟，这为 100G 规模部署奠定了基础。在 2010 年中，IEEE802.3ba 对 100GE 完成了规范，而 ITU-T 在 2009 年底就为 100GE 业务承载定义了 OTU4，同时 OIF 规范了业务的 100G 长距模块的实现以及 100G 互联互通接口规范。

随着 100G 相关标准的相继发布，2011 年国际主流设备商先后推出了 100G DWDM 骨干传输解决方案及相关设备。目前，不管正在开发还是已经部署的 100G 的长途传输系统，都是基于单载波 PMD-QPSK 调制格式并采用相干检测和数字信号处理 (DSP) 技术。这样在传统的 50GHz 波长间隔的情况下所获得的频谱效率 (SE) 是 2bit/s/Hz，从而将系统容量在光纤 C 段提升到约 10Tbit/s。

为了解决干线传输带宽压力，全球领先的电信运营商积极推进 100G 商用化进程，在国外有诸如 Verizon、德国电信、俄罗斯电信、马来西亚电信等海外电信运营商都已经先后部署了 100G 系统。

2011 年，中国电信启动了 100G DWDM 设备研究性测试，在此基础上完成了中国 100G DWDM 设备技术要求 (行业标准)。伴随着中国移动 TD-SCDMA 网络的建设以及 CMNET 业务、云业务以及诸多互联网应用不断加载，在某些特殊线路上，10G 技术平台开始面临较大压力；如果采用多线路捆绑的模式，也只能是缓解眼前压力，反而对管线资源和运行维护提出了更大的挑战。如果再考虑到即将到来的 TD-LTE 网络的规模部署，40G 可能都会捉襟见肘。因为 LTE 的站点回传需要带宽将会超过 200M，而接入网所需带宽的激增，将最终传导到骨干网。在这个时候，中国移动开始面临着一场技术选择，结果中国移动再一次勇敢地承担起了培育产业链的使命，选择跳过 40G 直接步入 100G 时代。中国移动认为直接使用 100G 虽然初期的 CAPEX 会比较高，但也会节省大量的管线等资源，也能在一定程度上降低 OPEX。于是中国移动在 2011 年就开始进行的 100G 的测试验证工作的基础上，于 2012 年上半年进行了杭州到福州全长无电中继 1014km 的现网 100G 试点应用测试，该测试系统中间设置 13 个光放站，最长光放段 89km，系统配置为 20 波 100G 或者 10 波 100G+10 波 40G 两种模式，该试点测试对 100G 能否大规模商用进行了全面细致的可行性研究，试点完成后很快就发起了中国移动首次大规模的 100G 集中采购与建设部署工程，到此 100G 规模商用大幕已然开启。

100G 与传统光通信最本质的区别是线路侧采用了相干检测技术,这也标志着相干通信时代的来临;同时,标准组织 OIF 定义 100G 的调制技术采用统一的 PMD-QPSK 方式。与 40G 相比,统一的调制方式为 100G 线路接口实现标准化提供了契机,但也使得对 PMD-QPSK 信号本身的处理也变得更加复杂。基于这些特点,100G 的测试也面临着许多挑战,主要包括两个方面:一是在部署前如何对 100G 系统信号质量进行评估;二是部署后的 100G 系统如何维护。

关于 100G 系统信号质量评估的问题,理论上对 QPSK 信号的分析是采用所谓星图加眼图的分析方法,而目前在一些 100G 系统评估中,把 100G 线路侧看成一个黑匣子来处理,实际上是没有手段去评估优劣的,这样有许多危害。从横向来看,无法知道不同设备厂家真实信号质量差异,也无法知道在同一系统中,不同波分信号的质量差异;从纵向看,也没有信息知道系统的信号随时间究竟会劣化到什么程度。

而关于 100G 系统部署后的维护问题,从传统上讲,DWDM 系统的维护主要依靠 OSNR 这一指标,主要的维护工具是光谱分析仪。实际上从 40G 甚至是带有 OADM 系统的 10G 系统开始,就存在所谓的带内 OSNR 的测量问题,即不采用带内功能的光谱仪的测试就没有办法知道在用系统的实际光信噪比,这是目前高速率波分复用系统维护遇到的主要难题。

本书以 100G 的关键技术和 100G 的测试为核心内容,以最新的国际标准和研究资料为基础,辅以作者多年来对光电子技术、光传送网、IP 网、同步网、无线回传网络等领域的研究成果和参与国家相关重大项目的经验,系统全面地介绍了 100G 的市场驱动力、核心技术、设备要求、系统实现方案、100G 的测试技术及测试工具。

在本书编写过程中,得到了各电信运营商、仪表厂商、设备制造商、行业科研院所、业界专家学者的悉心指导和大力帮助,很多业界朋友给我们分享了他们大量的最新研究成果。与他们的深入交流和探讨给了我们很多的灵感,在此表示最深切的谢意。

100G 是一项正在飞速发展变化中的技术,涉及光电子、光子集成、相干检测、高速编码调制、数字信号处理、软判决、高级调制信号质量分析、偏振复用信号的带内光谱分析等众多研究方向,很多技术还处于研究之中,有些还有待于标准化的进展和重大技术进步。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请同行和读者批评指正。

徐 荣

2012 年 11 月 26 日

目 录

第 1 章 100G 应用迫在眉睫	1
1.1 发展 100G 的市场驱动力	1
1.1.1 移动互联网流量激增急需拓宽网络带宽	1
1.1.2 成本优势及巨大容量推动 100G 以太网的发展	5
1.1.3 网络中心及骨干互联推动了 100G 的发展	9
1.1.4 国家宽带战略推动 100G 时代提前到来	15
1.2 高速系统的传输损伤	21
1.2.1 光信噪比	21
1.2.2 色散	23
1.2.3 非线性效应	25
1.3 100G 面临的挑战和应对措施	29
1.3.1 提高传输容量的途径方法	29
1.3.2 引入 100G 面临的挑战	32
1.3.3 实现 100G 的核心技术	34
1.3.4 更高速的超 100G 技术	39
1.4 100G 标准化及产业发展状况	45
1.4.1 100G 的标准化情况	45
1.4.2 100G 传输产业发展状况	48
1.4.3 100G 设备技术演进趋势	50
1.5 全球 100G 应用状况及典型案例	51
1.5.1 100G 传输系统的应用场景	51
1.5.2 国内外 100G 的应用状况	53
1.5.3 国际上的 100G 典型案例	54
1.6 100G 市场前景展望	56
第 2 章 100G 关键技术	59
2.1 100G 以太网技术	61
2.1.1 100GE 的接口	61

2.1.2	100GE 的体系结构	63
2.1.3	100GE 的多通道分发 (MLD) 机制	65
2.1.4	100GE 模块技术	68
2.1.5	100G 以太网的应用场景	72
2.2	100G OTN/OADM 技术	76
2.2.1	OTN 技术简介	77
2.2.2	100G OTN 简介	83
2.2.3	OTN 多业务承载与调度技术	86
2.2.4	OTN 多级复用调度技术	95
2.3	100G 的编码与调制技术	97
2.3.1	编码调制技术基础	97
2.3.2	编码调制技术的发展演进	100
2.3.3	PM-QPSK 成为 100G 编码调制的一致选择	102
2.3.4	PM-QPSK 码型调制技术原理	104
2.4	100G 的相干接收和数字信号处理 (DSP) 技术	107
2.4.1	采用相干接收和 DSP 技术的意义	107
2.4.2	相干检测与数字信号处理 (DSP) 技术原理	109
2.4.3	相干接收 PM-QPSK 调制解调技术	113
2.4.4	非相干接收 PM-QPSK 调制解调技术	116
2.4.5	正交偏振频分复用差分正交相移键控 (OPFDM-DQPSK)	118
2.4.6	光正交频分复用技术 (O-OFDM)	118
2.5	超强前向纠错编码 (FEC) 技术	121
2.5.1	前向纠错 FEC 技术简介	121
2.5.2	高速大容量系统 FEC 技术的新发展	125
2.5.3	几种主流 FEC 算法简介	129
2.5.4	软判决与硬判决比较	132
2.5.5	FEC 性能评估标准	136
2.5.6	具有 FEC 功能的 100G 设备的功能架构	136
第 3 章	100G 测试技术	140
3.1	100GE 以太网测试技术	140
3.1.1	物理层光口测试	140
3.1.2	光模块接口性能及物理层传输性能测试	143

3.1.3	PCS 层性能验证测试	144
3.1.4	100GE MAC/QoS 测试	146
3.1.5	100GE IP 流量测试	154
3.1.6	100GE 同步以太网 jitter/wander 测试	155
3.1.7	100GE 业务面向开通与运维基于用户体验的性能测试	157
3.2	100G OTN 客户侧测试技术	170
3.2.1	物理层光口测试	170
3.2.2	光模块接口性能及物理层传输性能测试	170
3.2.3	OTL 层性能验证测试	171
3.2.4	OTN 层功能验证测试	174
3.2.5	TCM 性能测试	177
3.2.6	OTN 多业务承载及 ODU 颗粒调度测试	177
3.2.7	FEC 验证测试	179
3.2.8	OTN 业务中断测试 (SDT)	183
3.2.9	100G OTN 环路延时测试 (RTD)	185
3.2.10	100G OTN 误码长期性能评估测试 (G.8201, M.2401)	185
3.3	100G 线路侧测试技术	186
3.3.1	100G 线路网元级单机指标测试	187
3.3.2	100G 线路系统指标测试	188
3.4	100G 矢量调制信号质量分析	192
3.4.1	EVM 误差矢量幅度	192
3.4.2	100G 线路口星座图误差矢量幅度测试	193
第 4 章	100G 测试工具及测试实例	197
4.1	JDSU 公司介绍	197
4.2	JDSU 面向 100G 的测试工具系列	199
4.2.1	JDSU ONT 平台特点	200
4.2.2	JDSU ONT 100G 特点	201
4.2.3	JDSU MTS-8000 100G 仪表特点	203
4.2.4	JDSU 100G 光学层面系列测试仪表的特点	203
4.3	100G 重点测试案例介绍	204
4.3.1	100G CFP 模块光接口物理指标验证测试	205
4.3.2	100G CFP 模块连通性验证测试	205

4.3.3	100G CFP 模块传输性能压力测试	208
4.3.4	动态的 Skew 变化验证测试	209
4.3.5	静态 Skew 及容限验证测试	210
4.3.6	PCS 层性能验证测试	212
4.3.7	100GE 以太网系统连通性, 业务性能及 QoS 测试	216
4.3.8	100G OTN OTL 层性能验证测试	227
4.3.9	100G OTN 告警与误码测试	229
4.3.10	OTN 多业务承载及 ODU 颗粒交叉调度测试	230
4.3.11	100G OTN 业务中断测试 (SDT)	231
4.3.12	100G OTN 环路延时测试	232
4.3.13	100G OTN 客户侧 GFEC 功能验证测试	233
4.3.14	100G OTN TCM 串联监控误码/告警测试	234
4.3.15	100GE 同步以太网和 OTN jitter/wander 测试	236
4.3.16	100GE 业务面向开通基于用户体验的性能测试 (Y.1564)	238
4.3.17	基于用户层体验的业务开通和运维测试 (RFC 6349)	239
4.4	总结	240
缩 略 词		241
参考文献		246

第 1 章 100G 应用迫在眉睫

随着私有云、公有云技术突飞猛进的发展，宽带提速、三网融合等国家宽带战略的执行，物联网、视频应用、社交网络等移动互联新业务应用的不断兴起，特别是基于 Internet 的视频应用和 P2P（Pear-to-Pear，点对点）应用的迅猛发展，网络流量增长迅猛。激增的流量对作为信息通信网络的“基石”的基础传输系统的传输能力提出了更高要求，传输速率不断提升成为支撑下一代宽带信息网络高速发展的重要基础。对光纤通信而言，超高速、超大容量和超长距离传输，以及更低的每比特传输成本一直是人们追求的目标。

有线和无线接入带宽的不断提升，三网融合的视频业务逐步普及到更多的终端，网络的容量随之面临着巨大挑战，现有网络的 10Gbit/s 链路已经捉襟见肘，从而推动了 40Gbit/s 传输系统进入大规模商用。面对日益增长的数据中心（Internet Data Center）流量和高清流媒体应用的普及，更大容量的 100Gbit/s 的需求逐渐浮出水面。可见 100G 的市场，已不是技术或某个厂商推动的结果，而是业务需求实实在在的推动。一些 ICP（Internet Content Provider）如 Facebook 和 Google，在多个场合表达了对 100G 高速承载的渴望，并且早在标准成熟前就已开始引入该技术。100Gbit/s 的高速传输技术成为继 40Gbit/s 之后业界关注的下一个高速率平台，将主导高速传输和大容量承载的商用市场。

1.1 发展 100G 的市场驱动力

以互联网为代表的业务流量的爆炸式增长，以及宽带业务和带宽饥渴型应用的增加，使得传输带宽面临需不断扩容的压力；此外，以太网业务的 100GE 或者相应的 POS 接口的出现，也对传输承载网的带宽容量提出更高的要求。如何承载移动互联时代和宽带战略背景下的高带宽需求，成为 100G 大跨步地发展和不断完善的最大现实驱动力。

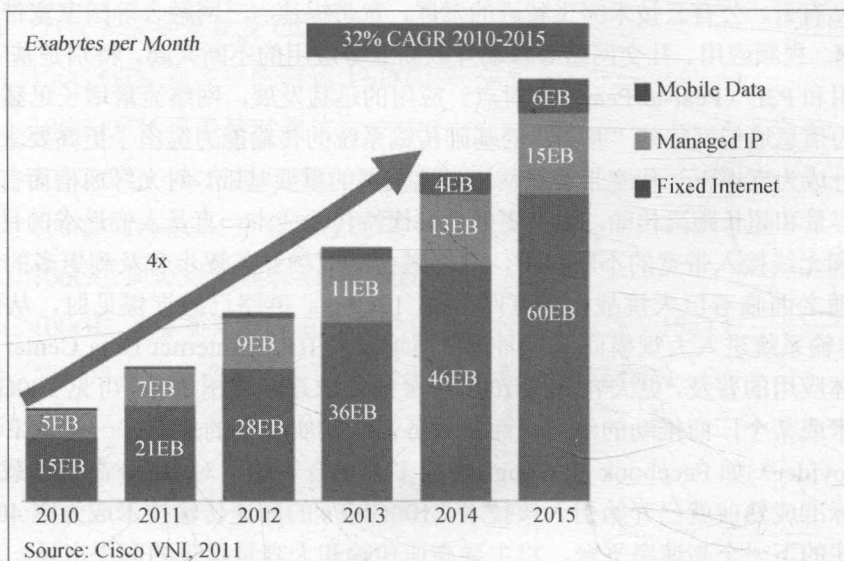
1.1.1 移动互联网流量激增急需拓宽网络带宽

从 10Mbit/s、100Mbit/s、1Gbit/s 到 10Gbit/s，互联网网速虽然不断以加速度方式提升，但却越来越不能满足应用需求。以 P2P 和视频业务为核心的互联网流量正成为最大的带宽驱动力，这个巨大的带宽应用需求给未来网络的发展带来极大压力，需要在技术、成本和环境等方面采用一系列创新技术来应对这一变化。

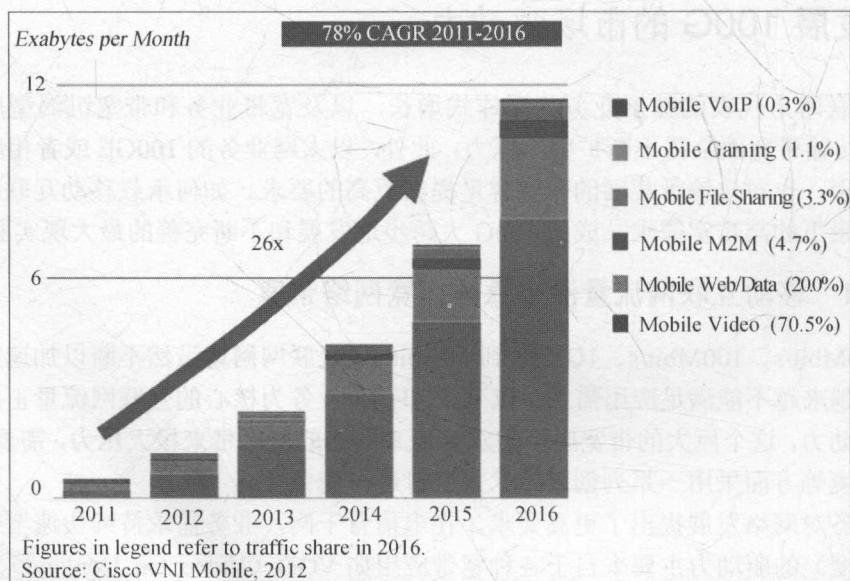
新业务对网络发展提出了更高要求。在电信骨干网，业务需求持续快速增长（每年翻倍的速度）的驱动力主要来自于各种宽带应用如 VOD（Video On Denland）、IPTV、互联网电视会议、互联网游戏、端到端的视频共享、远程存储和移动宽带（LTE）等。为了满足业务需要，单用户带宽将持续增加。在所有的新业务中，视频业务是最消耗带

宽的，因此成为网络发展的最大驱动力。固网宽带和移动宽带并驾齐驱，其多业务提供能力共同驱动了网络带宽的大爆炸式需求。

如图 1-1 所示，根据思科公司 2011 年发布的预测报告，未来几年 IP 流量高速增长，2015 年之前全球 IP 流量年平均增速为 32%，也就是说未来 5 年网络带宽两年翻一番，即 2015 年全球每月 IP 流量是 2010 年全球每月 IP 流量的 4 倍多；2010 年全球每月 IP 流量为 20Exabytes，2015 年全球每月 IP 流量将达到 81Exabytes，其中 90% 为 IP 视频产生的流量。从中近期的角度仍然可以发现，P2P、网络视频和移动互联网三大业务决定了带宽需求，特别是视频已成为第一大流量业务，而且增速最快的前三位业务都是视频类业务。



(全球IP流量预测)



(全球移动数据流量预测)

图 1-1 思科公司对未来几年全球数据流量增长情况的预测

关于全球移动网络数据流量，2012 年思科公司预计通过移动互联产生的全球移动数据流量，从 2011 年到 2016 年将以年均 78% 的增长速度快速发展，即 2011 年到 2016 年全球移动数据流量将增长 26 倍之多，到 2016 年全球每月移动数据流量大约可达 10 Exabytes。各种单位流量等级所对应的数值如表 1-1 所示，供大家对比分析时参考。

表 1-1 各种单位流量等级对应的具体数值

数量级名称	表 示 为	值
Thousand	Kilobyte (kB)	10^3
Million	megabyte (MB)	10^6
Billion	gigabyte (GB)	10^9
Trillion	terabyte (TB)	10^{12}
Quadrillion	petabyte (PB)	10^{15}
Quintillion	exabyte (EB)	10^{18}
Sextillion	zettabyte (ZB)	10^{21}
Septillion	yottabyte (YB)	10^{24}
Googol	GoogolByte	10^{100}

同样，爱立信公司在 2011 年的《流量和市场数据报告》中预测，到 2016 年全球移动宽带用户数将达 50 亿（2011 年这一数字为 9 亿），移动数据流量将增长 10 倍，年增长量近 60%（主要是由视频业务来驱动的）。该份报告基于爱立信过去几年对遍布全球各地现网运行情况的观察记录数据，因此具有一定程度的准确性和参考性。

从长期来看，云计算和部分物联网业务将是带宽增长潜在的最大驱动力。由于云计算和物联网的发展壮大（如图 1-2 所示），很多研究机构都预测到 2015 年，连接网络的设备将达到 150 多亿台；将有近 30 亿互联网用户，占世界人口的 40%，其中新增互联网用户超过 10 亿；平均固定宽带上网速度从 2010 年的 7Mbit/s 上升为 2015 年的 28Mbit/s，2015 年全年互联网流量将超过 1Zettabyte。

未来，如此众多的设备需要接入，每用户的接入带宽又会上升到几十兆甚至上百兆的水平，说明随着接入业务种类及接入流量的增加，接入服务提供商需要提供更加灵活、更加宽带的接入服务，而接入带宽的提高又带来核心网络设备容量的急剧扩张，而核心交换设备容量的扩张又对中继传输设备提出更高速、更大容量的链路传输的新需求。



图 1-2 各种研究咨询机构对 2015 年宽带发展情况的预测

同样，云计算数据中心及数据中心和数据中心之间的带宽需求，以及高性能计算等行业用户同样的需求，使得对于全球互联网行业和运营商等提供商网络带宽的提速需求迫在眉睫。新兴业务中大部分是云业务，而且未来绝大部分新业务均是云相关业务，如图 1-3 所示。蓬勃发展的视频业务和云计算业务极大地加剧了网络带宽的消耗，而且呈现出不同的流量流向特性。

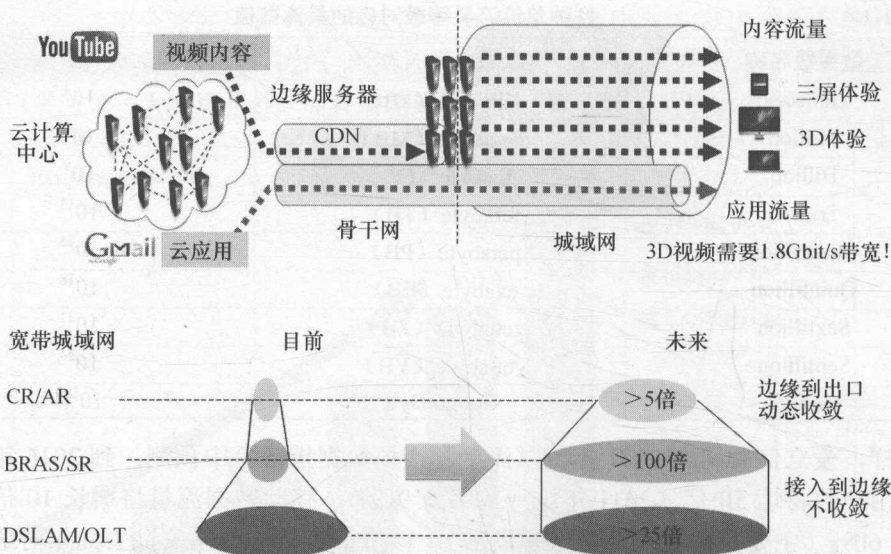


图 1-3 视频业务和云业务的流量流向模式加剧了运营商骨干网和城域网的带宽消耗

从图 1-3 可见，视频类业务在靠近用户侧不得不使用内容分发机制，因此虽然大大降低了对骨干网带宽的占用，但却不得不消耗了大量的城域网络带宽；而云应用由于需要在异地数据中心之间进行虚拟交互，因此一般云应用会消耗大量的骨干网络带宽。在 IT 和数据通信领域，从目前的万兆以太网和万兆 POS 升级到下一代更高的带宽（例如 40G 或 100G）将成为必然的选择。同样在电信传输网络中，从目前的 $N \times 10\text{G}$ WDM 系统升级到 $N \times 40\text{G}$ 甚至 $N \times 100\text{G}$ WDM 系统也将成为运营商传送网络升级演进的必然选择。

由此可见，带宽压力一直都是网络演进发展的核心问题之一。随着网络用户数量的迅速增加，网络的规模也在迅速扩大；数据中心、多媒体、互联网以及 Wi-Fi、3G、LTE 等有线、无线宽带业务的兴盛，业务日趋复杂，数据量不断增加，需要网络提供海量的存储和快速的数据交换以及高速大容量的信息传递能力。像视频等多媒体业务、云计算、互联网搜索、无线宽带等，尤其是 P2P、视频内容大吞吐量数据已成为网络中的主体业务流，都对网络的高带宽提出了要求。无论是局域网、园区网、城域网的内部带宽需求，还是出口带宽需求，都是成几何级增长。图 1-4 给出了著名的咨询机构 RHK 对未来几年各种业务流量增长趋势以及这些业务最终对运营商干线网络容量的需求预测，按照 RHK 的预测，每年业务量增长 40%，10 年总流量增长 30 倍，30 年总流量将增长 1000 倍。

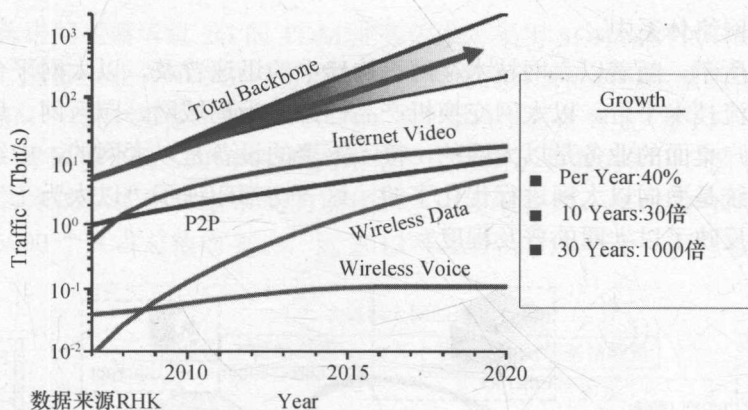


图 1-4 RHK 对未来几年各种业务流量增长趋势及其造成干线容量激增情况的预测

由于网络速度越快，用户体验就越好，因此即使只是为了实现提供更好的用户体验这一简单目的，就足以消耗掉运营商增加的所有带宽。当带宽提高以后，自然就会有各式各样的应用。现在带宽是落后的，应用是超前的，带宽问题已经成为应用发展的制约因素了。

国内有关研究机构预测在未来 5 年，我国干线网流量的年增长率依然会高达 60%~70%，这意味着 5 年后的干线网络带宽要求将是当前的 10~15 倍，骨干传输网总带宽将从 64Tbit/s 增加到至少 120~155Tbit/s，甚至达到 200Tbit/s 以上。宽带的看点就是提速！从接入网到城域网再到骨干网，5 年 10 倍的流量增长，运营商唯有不断宽带扩容以满足业务增长的需求。

根据中国电信科技委主任韦乐平对中国电信网络流量容量发展趋势的预测：未来 5 年中国电信骨干 IP 带宽年增长率处于 40%~50% 之间；骨干传输网总带宽将从 64Tbit/s 增加到至少 (120~155) Tbit/s，甚至 200Tbit/s 以上。主要流量驱动是 P2P 和网络视频，其中确知 P2P 占骨干网的 55%，考虑未知 P2P 后可能达到 70%。确知 P2P 中 UDP (User Datagram Protocol, 用户数据报协议) 占 65%，TCP 占 35%，与两年前相反。P2P 增速逐渐减慢，视频将是主要驱动力，其中 PC 网络视频流量占主导，占比将从目前的 23% 攀升到 2015 年的 45%，而 IPTV 和网络电视的影响较小。移动互联网流量增速是固网的一倍，但进入骨干网流量很小，城域局部热点可能超过固网甚至拥塞。

同样的情况也发生在中国移动。移动互联网业务高速发展，移动数据流量迅猛增长，中国移动 2010 年移动数据业务总流量是 2009 年的 3 倍多；中国移动骨干网总带宽年增长率超过 40%，给网络带宽带来极大的压力；3G、LTE、云计算及物联网的建设和商用将导致数据流量进一步迅速增加，相应的城域和核心骨干带宽压力持续增加，因此引入更高速率的传输网络迫在眉睫。

所有这些驱动因素都证明今天的网络速度已经远远不能够满足用户的基本宽带接入和高速传送需求了。基于各种数据的分析，业内人士普遍认为，100G 时代已经向我们走来！

1.1.2 成本优势及巨大容量推动 100G 以太网的发展

传统上，以太网在数据中心和企业局域网占主导地位。然而，以太网的成本优势、简单性和灵活性，为用户提供了具有吸引力的价格选择，在过去的一些年里，以太网逐

渐渗透到整个网络体系中。

如图 1-5 所示, 随着以太网技术在网络构建中的迅速普及, 以太网平台已经成为网络组建中的主流技术平台, 以太网交换机产品已经成为局域网、园区网、城域网的主要网络设备。用户桌面的业务是以太网的, 接入汇聚的设备是以太网的, 中继传输的高速接口和高速系统是面向以太网进行优化了的, 这一切都印证了“以太为王”这样一个事实, 也客观地反映了以太网的普及程度。

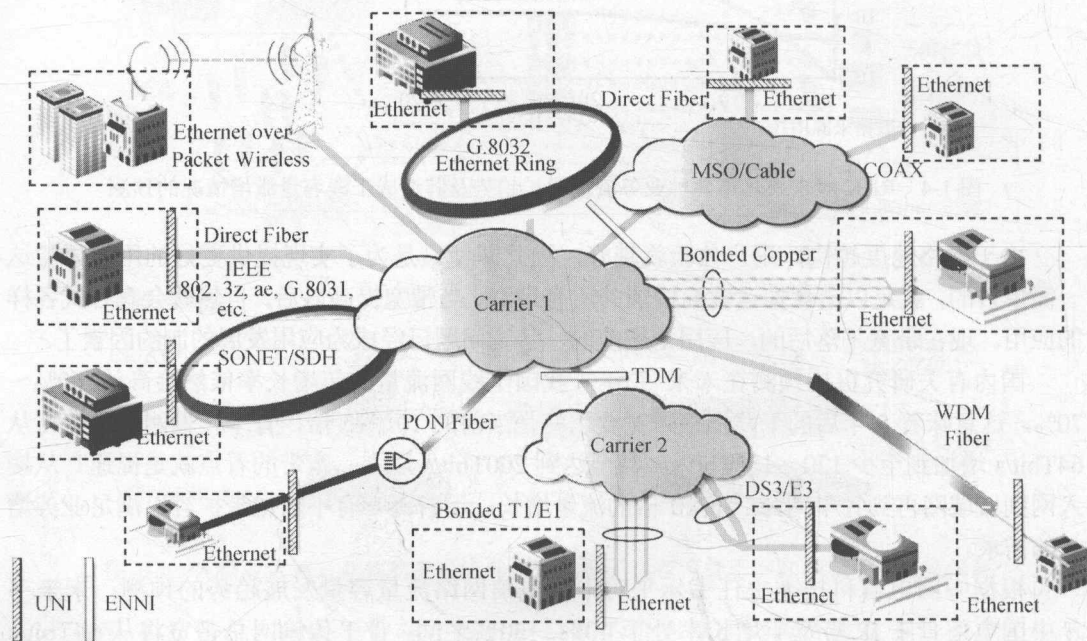


图 1-5 巨大的成本优势使得以太网成为最广泛的业务平台

今天, 宽带接入网络、城域网中采用以太网的技术也很广泛, 这些市场的发展推动了以太网市场的快速发展, 并且推动了以太网技术的不断进步。

一方面, 宽带接入每用户 20Mbit/s、50Mbit/s 甚至 100Mbit/s 的带宽, 已经成为许多国家未来几年的网络发展目标。接入层带宽的增加必然导致城域网汇聚层和核心层的带宽需求增加。这些巨大的接入带宽需求将推动未来城域网数据网汇聚层及大型数据中心向以 40GE/100GE 接口为主演进, 同时导致骨干层将会升级到 100GE。

另一方面, 建设使得承载和传送层面面临业务类型由 TDM 为主向以以太网化为主转变, 业务接口由 E1 向 FE 变化, 业务粒度由 2M 向 10M/100M 发展等挑战。有电信专家预计在未来 5~10 年内, 移动通信系统每基站的带宽需求也将达到 30M~100M。受到消费者和商业领域快速增长的流量需求, 特别是视频流量的飞涨以及移动回传 (Backhaul) 网络的大量需求等多重因素的驱动, 以太分组化传送设备市场将在未来几年迅猛发展。

移动运营商的业务将逐渐由传统话音业务为主转向数据业务为主。3G 网络大大拓展了用户通信方式, 为用户提供了更丰富的业务选择。移动运营商 2G/3G 网络的 IP 化趋势驱动着无线回传网络向分组化的方向发展演进, 所提供的主导业务也从 TDM 电路业务向运营级以太网业务方向演进。