



专题：全光网技术与应用

全光网的探索研究与应用实践

唐建军¹, 李俊杰¹, 张成良²

(1. 中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院, 北京 102209;

2. 中国电信集团有限公司, 北京 100031)

摘要: 随着“宽带中国”“提速降费”等国家战略的推进, 通信网络流量迅猛增长, 电信运营商的很多枢纽机房空间、供电压力巨大, 光层直通的全光网技术将有效缓解上述压力。在分析全光网的概念与内涵的基础上, 探讨分析全光网的应用价值与应用实践, 并针对当前全光网面临的问题进行分析和对未来技术发展进行展望。

关键词: 全光网; 可重构光分插复用器; 密集波分复用; 波长交换光网络

中图分类号: TN913

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019073

Research and application practice of China Telecom in all-optical network

TANG Jianjun¹, LI Junjie¹, ZHANG Chengliang²

1. Research Institute of Intelligent Network and Terminal, China Telecom Co., Ltd., Beijing 102209, China

2. China Telecom Group Co., Ltd., Beijing 100031, China

Abstract: With the advancement of national strategies such as “Broadband China” and “Speed-up and Fee-reduction”, network traffic is growing rapidly. The pressures of the space and the power supply in many equipment building of telecommunication operators are huge. All-optical network technology will effectively alleviate these pressures. Based on the analysis of the concept and connotation of all-optical network, the application value and practice of all-optical network were discussed. And the problems faced by the current all-optical network were analyzed and the future development of technology was forecasted.

Key words: all-optical network, ROADM, DWDM, WSON

1 引言

虽然无线网络在带宽和性能等方面持续提升, 无论是从功耗还是成本等方面来说, 光网络仍然是最适合的高带宽传输系统^[1]。从1966年被称为“光通信之父”的高锟博士提出光纤通信概

念开始, 随着光纤与光传输技术的发展, 通信技术也经历了飞速发展的过程。而伴随着万物互联时代的到来, 为了适应爆炸式增长的通信业务需求, 全光网(all-optical network, AON)的概念也应运而生。AON是万物互联的大连接时代的大势所趋。我国AON建设即将进入最终演进阶

收稿日期: 2019-03-10; 修回日期: 2019-04-08

段,国内运营商加速接入网光纤化,将在交换层引入可重构光分插复用器(reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM),从而迈向全光网时代^[2]。

万物互联的大连接时代无疑将会催生对传输网络带宽容量和时延的巨大需求,因此,AON成为大连接时代的大势所趋。随着“宽带中国”“提速降费”等国家战略的推进,4K超高清视频、智慧家庭等大带宽业务的不断涌现,给电信基础网络带来了巨大挑战。全光网技术的应用将有效缓解电信运营商的枢纽机房空间、供电等巨大压力,具有广阔的应用前景。

2 AON 概念与演进

2.1 AON 概念

AON在业界没有统一的定义,狭义的“AON”指信号只在进出网络时才进行电光和光电转换,而在网络中传输和交换时,信号始终以光的形式存在,光信息流在网络中的传输及交换始终以光的形式存在,而不需要经过光/电、电/光转换。

从20世纪90年代开始,基于全光波长变换的AON或光Internet概念开始提出^[3-5],并成为当时的学术研究热点。但由于全光波长变换技术非常不成熟,技术进展相对缓慢。为了适应互联网的发展,全光分组交换(optical packet switching, OPS)^[6-8]和光突发交换(optical burst switching, OBS)^[9-11]等成为研究热点,但由于光逻辑与光存储等器件不成熟,短期内难以应用。

2.2 AON 1.0 与 2.0

受光逻辑与光存储等器件的约束,学术上严格意义的AON包括OPS和OBS等,技术上异常困难,都难以实现。如果传输、交换、接入都在光域实现的端到端光网络,控制允许在电域实现,这就是电信行业应用领域所指的AON。而实现AON需要3个步骤:第一步是骨干网和城域网中传输链路的光纤化;第二步是接入网光纤化,目

前接入网中馈线段基本实现光纤化;第三步是传输节点引入光交换。

AON 1.0和AON 2.0的概念首次在OFC2018^[12]上被提出。AON 1.0的核心内容是传输和接入都实现光纤化,交换在电域实现。AON 2.0是指在AON 1.0的基础上,当传输和接入都实现了光纤化,交换层也引入ROADM和光交叉连接(optical cross-connect, OXC)就构成所谓严格意义上的AON^[1]。

AON 2.0依托ROADM设备、100 Gbit/s/超100 Gbit/s相干技术、波长交换光网络(wavelength switching optical network, WSON)技术和一跳直达全光架构,实现了波长级调度、分钟级业务发放、秒级恢复以及毫秒级时延的目标。

全光网2.0的主要特征如下。

- 传输、接入都实现光纤化:全光网1.0已具备的特征。
- 骨干交换层实现光(波长)交换:基于波长选择交换(wavelength selective switching, WSS)等技术实现波长级交换与控制。
- 波长级调度:实现波长和波长组的智能化调度。
- 分钟级端到端业务发放:实现WSON等智能化控制的分钟级端到端业务开通与调整。
- 端到端秒级恢复:当故障发生时,在具备资源的前提下,在几十秒甚至几秒内实现端到端业务恢复。

2.3 AON 2.0 使能技术

AON 2.0的发展,得益于以下几项关键技术的发展。

- DWDM技术:当前DWDM可支持80波甚至96波的传输,为全光网的传输和交换奠定了基础。
- 超长距传输技术:近几年应用的相干光通信,主要利用了相干调制和外差检测技术。



由于相干光通信系统具有灵敏度高的优势，各国在相干光传输技术上做了大量的研究工作。经过十年的研究，相干光通信进入实用阶段，超 1 000 km 传输技术已经成熟。

- **WSS 器件：**基于硅晶光（liquid crystal on silicon, LCoS）技术的 WSS 实用化，快速推动了 ROADM 技术的发展。过去基于微机电系统（micro-electro-mechanical system, MEMS）的 WSS 需要提前定义好每个通道的间隔（例如 100 GHz 或者 50 GHz），之后无法改变。但是 LCoS 上的百万级别的像素可以任意改变每个通道的间隔，开启了灵活栅格的时代。从 2006 年开始商用以来，基于 LCoS 的 WSS 一直保持着迅速发展的态势。初期的 WSS 可以支持 4 个（1×4）或者 9 个光纤端口（1×9）。现在 20 端口（1×20）甚至 40 端口（1×40）的 WSS 也可以实现，使得多方向的 ROADM 调度可很好地满足应用需要。
- **WSO 控制：**WSO 是基于波分复用（wavelength division multiplexing, WDM）传输网的自动交换光网络（automatically switched optical network, ASON），是目前国际互联网工程任务组（Internet Engineering Task Force, IETF）标准组织倡导的智能波分标准，除了传统 ASON 的功能外，主要解决波分网络中光纤/波长自动发现、在线波长路由选择、基于损伤模型的路由选择等问题。WSO 技术的发展，使得 ROADM 的智能化成为可能。

2.4 AON 2.0 的技术优势与价值

AON 2.0 的技术优势，使其得以在运营商中广泛部署应用，具有巨大的应用价值。

- **业务快速开通：**WSO 具有自动选路功能，支持网状组网，业务开通快。传统

DWDM 采用链状组网，需要逐点配置开通业务，响应慢，很难适应大量突发业务需求。

- **节能减排：**由于 100 Gbit/s 大颗粒（波长级）调度需求日益增加，在光层进行交换，可以省去光电光转换和电交叉，其功耗、占地以及成本均可大幅减少。传统 DWDM+大容量光传送网（optical transport network, OTN）交叉，成本、功耗和散热压力较大。
- **主动割接成为可能：**WSO 支持软重路由，便于主动割接。传统 DWDM 承载的业务量较大，没有足够的网络资源和人力资源去应对非常耗时的大量业务割接，只能被动割接（割接一般安排在半夜，值班人员较少，突发情况又较多）。
- **故障快速恢复：**WSO 支持预置路由和动态重路由，在资源充足的情况下，光缆故障时受影响的业务自动重路由，保障业务正常。而传统的 DWDM 系统需要人工切换路由，有时还涉及线下板卡和光纤跳接，在多个环节需要人工介入，大量业务很难恢复，一般仅对极其重要的业务抢通。
- **缩短时延：**新型业务对时延比较敏感，WSO 可以选择最短路由，保证链路时延最优。同时在每个 ROADM 节点光层穿通，节点时延也有效缩短。而传统的 DWDM 由于分段建设与配置，物理路由往往较长，严重影响了业务的时延。

3 全光网应用探索

3.1 中国电信的全光网 1.0 实践

宽带是国家经济社会发展的重要基础，是国家工业化与信息化融合的重要纽带，也是中国电信的战略性业务。2011 年 2 月 16 日正式启动“宽带中国·光网城市”工程，由此拉开了“全光网

1.0”的序幕。自2011年以来,中国电信持续推进“宽带中国”建设,接入领域的全光网1.0战略已经在2017年实现既定目标,中国电信光纤接入和百兆入户的比例达到90%以上^[12]。未来接入网的发展驱动力主要来自视频和智慧家庭,中国电信也将继续推进全光网1.0+战略,预计2025年全面提供吉比特到户宽带并实现智能化。

3.2 中国电信的全光网2.0实践

过去十年,中国电信骨干网流量达到了年平均47%的惊人速度,这么巨大的流量,带来了设备投资、机房建设、功耗负载、系统运营等一系列的问题。为了解决这些问题,中国电信的全光网1.0建设开始转向2.0的建设,通过光层互联,构建一张符合中国电信CTNet2025目标的全新网络,以“敏捷、简洁、集中、开放”的架构奠定未来5G、云等新兴业务的坚实基础^[12]。

2017年12月,中国电信在长江中下游地区江、浙、沪、鄂、皖、赣6省市的21个节点建成了一张规模空前的WSO骨干网络,如图1所示。“长江中下游ROADM网络”正式投入使用,国内第一个规模商用的ROADM网络的网络规模及技术水平位居世界前列。ROADM网络实现了传输网络在光层面的业务快速发放、自动调度和恢复,具备抗多次“断纤”的恢复能力,使得光网络由传统的不成网的点对点链路演变为光联网。2017年12月21日,中国电信最后一个时分多路复用(time division multiplex, TDM)程控交换端局下电退网,由此拉开了“全光网2.0”的序幕。

“长江中下游ROADM网络”初期规划300多条100 Gbit/s波分链路,可向200 Gbit/s/400 Gbit/s演进,通过full-mesh互联,率先实现了中国干线网络向全光2.0的演变。“长江中下游ROADM网络”就是全光网2.0战略实施过程中的关键一步,也是给全行业提供的一个实践参考。

AON 2.0,对比AON 1.0的网络,其特点及应用成效如下。

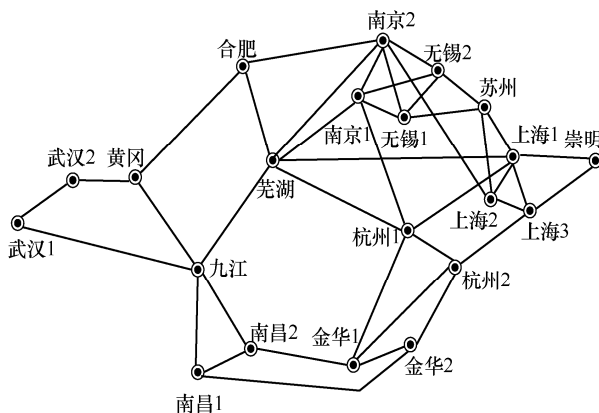


图1 中国电信长江中下游ROADM网络结构示意图

(1) 网络架构从独立的、分离的链状网向网状网演进

通过网状网互联,业务路由、保护路由、恢复路由最短,让业务实现了一跳直达,端到端(end to end, E2E)时延更小,满足了CTNet2025对该地区的时延战略要求;同时,大幅提升网络的安全性以及业务故障的恢复速度。

(2) 节点从电交换向全光交换演进

通过21个ROADM组网,实现了网络节点向智能光节点的演进,未来再继续向OXC方向演进,让节点的建网成本、功耗和机房占地达到30%~50%的降幅。

(3) 运营从人工向智能化方向演进

网状网提供了智能化运营的互联基础,通过光层动态路由技术以及面向软件定义传送网络(transport software-defined network, TSDN)的网络,可实现资源智能调度、带宽按需发放和时延按需选择。

4 问题与展望

4.1 当前全光网面临的问题

AON 2.0初步实现网络智能化,向全光网迈进了坚实的一步,但在以下方面还面临一些问题。

(1) 波长竞争问题

光波长通道理论上在节点处可按流量流向实现无需人工介入的全自动化灵活调度,最终实现



无色、无方向、无冲突的三无（colorless, directionless, contentionless, CDC）透明光节点。目前虽然有 $N \times M$ 基于多播交换（multi-cast switching, MCS）和 $N \times M$ WSS 等多种实现方案，但产业链仍不成熟，批量生产能力、可靠性等方面仍存在不少的问题。

（2）超长距离传输问题

目前组网范围受限于 1 000 多千米，只能在中国实现局部组网，在全国范围内组网仍需要电中继（光-电-光）延长传输距离，打破了全光网的透明性、低成本、低功耗等特性。

（3）超大规模组网能力问题

由于 WSON 不仅需要考虑路由的通达问题，还需要考虑波长可用性与连续性、光功率均衡、光信噪比（optical signal noise ratio, OSNR）等问题，WSON 的大规模组网能力有限，当前 WSON 的能力仅能覆盖 1 000 多个节点，含 ROADM 和光放（optical amplifier, OA）站。而在全网组一张大网需要 2 000~3 000 个节点，WSON 组网能力仍需进一步提升。

（4）减少站内连纤的问题

当方向数较多时，尾纤维护困难；扩方向时，新增互联的光纤较多，部署时非常困难。急需光背板或光纤连接盒简化尾纤连接，方便运维。

（5）重路由恢复时间问题

当光缆发生故障时，其上承载的大量业务需要恢复，ROADM 可支持动态的重路由，但由于重路由计算时长、WSS 切换时长等原因，导致业务中断时间较长，目前一般为 1~2 min，与秒级恢复的目标相比，仍存在较大差距。

4.2 未来技术展望

为了在全国范围内实现全光网，充分发挥全光网技术的优势，以下几个方面技术还有待发展。

- 超长距离传输技术：国内主要城市间的距离为 2 000~3 000 km，超 3 000 km 的无电再生传输技术有待突破，将实现大部分城

市间无电再生。

- 超大容量的传输技术：120/128 波等 DWDM 系统以及 400 Gbit/s/600 Gbit/s/800 Gbit/s，甚至 1 Tbit/s 超高速率的 DWDM 有待突破，以提高灵活大容量传输能力。
- 超大容量的 WSON 能力：可在国内骨干网实现 1 张 ROADM 网覆盖的能力，便于实现端到端的业务恢复能力。
- 灵活的波长无关、方向无关、竞争无关、栅格无关 ROADM（colorless directionless contentionless gridless ROADM, CDCG-ROADM）技术：实现端到端无波长竞争的波长调度，按业务需求灵活配置板卡，简化网络规划与运维。
- 大维度的 WSS 技术：32 维/40 维甚至更高维度 WSS，实现灵活的多方向业务调度，避免同一 ROADM 域在同机房部署多个 ROADM 节点，降低成本、简化运维。
- 大容量光背板或光连接箱：支持 32 维/40 维甚至更高维度 WSS 的光背板或光连接箱，避免节点内大量光纤互联，简化网络建设与运维。
- 更短的重路由恢复时间技术：实现秒级的端到端业务动态恢复，提升承载的业务时延品质。

5 结束语

本文在介绍了全光网概念与内涵的基础上，介绍了中国电信在全光网方向的实践探索与案例，提出了当前全光网面临的问题，并对未来主要关键技术的发展进行了展望，为更智能化的全光网应用奠定基础。

参考文献：

- [1] 韦乐平. 详解迈向真正全光网的正确姿势[N]. 中国通信网, 2017-06-22.
WEI L P. Explain the correct posture towards a true all-optical

- network[N]. China Communication Network, 2017-06-22.
- [2] 韦乐平. 迈向全光网: 大连接时代的光通信进阶之路[N]. 通信产业报, 2017-01-09.
- WEI L P. Towards all-optical network: way to achieve the advancement of optical communication in big-connection era[N]. Communication Weekly, 2017-01-09.
- [3] ROBERTO S, BERDUSCO M. Impact of transmission performance on path routing in all-optical transport networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 1998, 16(11): 1965-1971.
- [4] 刘雪原, 张杰, 顾晓仪. 波长变换技术对全光网络设计和性能的影响[J]. 光通信研究, 2000(1): 16-21.
- LIU X Y, ZHANG J, GU W Y. Effect of wavelength conversion technology on design and performance of all-optical networks[J]. Study on Optical Communications, 2000(1): 16-21.
- [5] 赵文玉, 纪越峰, 徐大雄. 全光网络的安全管理研究[J]. 电信科学, 2001, 17(5): 11-14.
- ZHAO W Y, JI Y F, XU D X. Research on security management of all-optical network[J]. Telecommunications Science, 2001, 17(5): 11-14.
- [6] ANDRZEJ J. Photonic fast packet switching[J]. IEEE Communications Magazine, 1993(2): 58-65.
- [7] BLUMENTHAL D J. Photonic packet switches: architectures and experimental implementations[J]. Proceedings of the IEEE, 1994, 82(11): 1650-1667.
- [8] 戴礼森, 洪佩琳, 李津生. 光分组交换技术[J]. 现代电信科技, 1998(10): 38-42.
- DAI L S, HONG P L, LI J S. Optical packet switching technology[J]. Modern Science & Technology of Telecommunication, 1998(10): 38-42.
- [9] 王勇, 殷洪玺, 张振荣, 等. 未来光因特网中的光交换方式及其发展趋势[J]. 电信科学, 2001, 17(9): 17-19.
- WANG Y, YIN H X, ZHANG Z R. et al. Optical switching mode and development trend in the future optical internet[J]. Telecommunications Science, 2001, 17(9): 17-19.
- [10] 唐建军, 纪越峰. 基于下一代光互联网的光突发交换技术研究[J]. 光通信研究, 2003(1): 5-8.

TANG J J, JI Y F. Research on optical burst switching technology based on next generation optical Internet[J]. Study on Optical Communications, 2003(1): 5-8.

- [11] 唐建军, 纪越峰. 光突发交换及其关键技术研究[J]. 光通信研究, 2003(5): 11-14.

TANG J J, JI Y F. Research on optical burst switching and key technologies[J]. Study on Optical Communications, 2003(5): 11-14.

- [12] ZHANG C L. Optical networking in the cloud and 5G era[Z]. 2018.

[作者简介]



唐建军 (1977-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院光传输研究部高级工程师, 主要研究方向为量子保密通信、大容量光传输系统。



李俊杰 (1977-), 男, 博士, 中国电信股份有限公司智能网络与终端研究院光传输研究部主任、教授级高级工程师, 主要研究方向为光通信网络与系统。



张成良 (1970-), 男, 中国电信集团有限公司科技创新部副总经理、教授级高级工程师, 中国通信标准化协会传送与接入网技术委员会副主席, 中国通信学会光通信委员会副主任, 主要研究方向为光通信技术。