



第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊
工信部优秀科技期刊 中国五大文献数据库收录期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

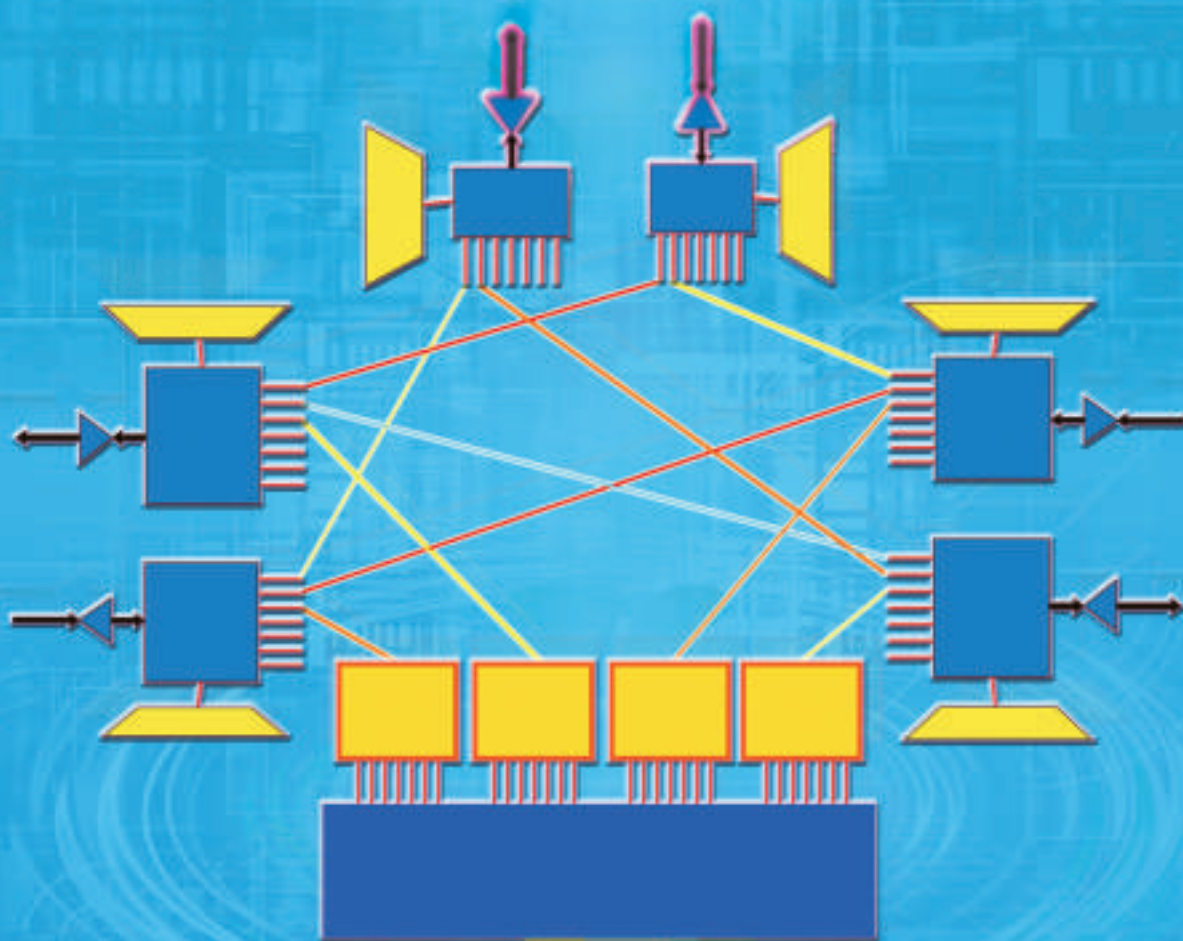
中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

www.zte.com.cn/magazine

2013年6月 • 第3期

专题：单波长太比特以上超高速光通信系统技术与器件



ISSN 1009-6868





目次

中兴通讯技术 总第110期 第19卷 第3期 2013年6月

专题：单波长太比特以上超高速光通信系统技术与器件

- 02 逼近香农极限的新型光调制技术 贾振生
08 半导体激光器在超高速光网络中的应用 赵建宜, 张均, 刘文
12 超高速率超大容量建设用光纤技术 成煜, 杨晨, 罗杰
17 软件定义光网络技术与应用 张杰, 赵永利
21 相干光通信实时信号处理 肖潇, 杨奇, 杨铸
26 ROADM 技术的应用 李俊杰
31 IP 和光网络联合组网技术的策略研究 李芳
35 新型大容量光交换的关键技术和应用 胡卫生, 孙卫强, 肖石林

专家视点

- 40 干扰管理——提升无线通信网络性能的核心技术 李建东, 李钊

运营应用

- 44 两种移动应用开发框架的性能测试比较
——基于 PhoneGap 和 Titanium 罗圣美, 王蔚, 任文慧

研究论文

- 48 实时渲染引擎架构 张忆楠, 严正, 姚莉

开发园地

- 54 一种基于蚁群融合的盲传输格式检测方法 邱宁, 李强, 陈玉

系列讲座

- 57 大数据 (3) 于艳华, 宋美娜

综合信息

- TD-SCDMA 手机迎来爆发式增长 超低端智能手机环比增长 125% (25) TD-SCDMA 步入重载时代 深度覆盖与语音时延优化成关键(34) 全球 OTN 设备市场销售收入 2017 年将增长至 130 亿美元(47) 中国光纤产业 2012 年业绩出色(53)

办刊宗旨

以人为本,荟萃通信技术领域精英;
迎接挑战,把握世界通信技术动态;
立即行动,求解通信发展疑难课题;
励精图治,促进民族信息产业崛起。

Contents

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol.19 No.3 Jun. 2013

Special Topic: Ultrahigh-Speed Optical Communications Greater than Tb/s for a Single Wavelength: Devices and System Technology

- 02 Optical Modulation Technologies for Approaching the Shannon Limit JIA Zhensheng
- 08 Semiconductor Diode Lasers
in High-Speed Optical Networks ZHAO Jianyi, ZHANG Di, LIU Wen
- 12 Optical Fiber Technologies for Ultrahigh-Speed,
Ultralarge-Capacity Telecommunication Networks CHENG Yu, YANG Chen, LUO Jie
- 17 Software-Defined Optical Network Technologies
and Applications ZHANG Jie, ZHAO Yongli
- 21 Real-Time Digital Signal Processing for Coherent
Optical Transmission System XIAO Xiao, YANG Qi, YANG Zhu
- 26 Applications of ROADM Technology LI Junjie
- 31 IP and Optical Network Combined Optimization Technology LI Fang
- 35 High-Optical Switching and Its Applications HUN Weisheng, SUN Weiqiang, XIAO Shilin

Expert View

- 40 Interference Management: The Key to Improving
Wireless Network Performance LI Jiandong, LI Zhao

Operational Application

- 44 Comparison of Two Mobile Application Development Frameworks:
PhoneGap and Titanium LUO Sheng mei, WANG Wei, REN Wenhui

Research Paper

- 48 Architecture of Real-Time Rendering Engine ZHANG Yinan, YAN Zheng, YAO Li

Development Field

- 54 Blind-Transport-Format Detection Method Based
on Ant Colony Merge Algorithm QIU Ning, LI Qiang, CHEN Yu

Lecture Series

- 57 Big Data (3) YU Yanhua, SONG Meina

敬告读者

本刊享有所发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。

未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。

邮购须知

本刊常年办理邮购订阅业务, 欢迎订阅。订阅方法: 从邮局汇款至编辑部, 在汇款单上将订阅者的详细地址、收件人姓名及联系电话填写清楚, 并在汇款单附言栏注明所购杂志期次及数量。

专题:单波长太比特以上超高速光通信系统技术与器件

专 | 题 | 导 | 读

当前光网络正处于高速发展之中,据预测未来10年乃至更长时间,移动互联网等业务的发展将使骨干网业务量继续保持30%以上的增长率,光网络发展速度应该匹配或适当超过业务的发展速度。目前光网络的主要发展趋势体现在:

(1)超高速光传输技术。目前商用单波长WDM系统已经达到100 Gbit/s,下一步的发展将会是单波长400 Gbit/s以及1 Tbit/s的系统,更复杂的调制技术将是最重要的选项。在100G WDM技术中,我们已经采用偏振调制+QPSK四相位调制,而在超100 Gbit/s系统中将需要采用诸如16QAM、32QAM、OFDM、Nyquist-WDM等更复杂的调制技术,从而可以用较低的波特率实现传输的高比特率。

(2)新型光纤技术。光纤发展将沿着两个方向,一个是更低损耗的光纤,一个是新型光纤的发展。目前低损耗(LL)光纤和超低损耗(ULL)光纤的损耗系数大约是0.18 dB/km和0.17 dB/km。新型光纤的发展思路包括少模光纤(FMF)、多芯光纤(MCF)以及两种技术的结合等,以便进一步提升容量。

(3)全光组网技术。新型光纤和新的长距离无电中继传输系统的部署,有望将全光传输距离延长到2 000 km以上,从而带来可重构型分插复用器(ROADM)和光交叉连接(OXC)组网技术的发展。ROADM的主要优点包括消除设备导致的带宽瓶颈、提高电路的指配速度、降低建网费用和运营维护成本、节省网络能耗等。

(4)光网络与IP的协同组网技术。目前光网络和IP网络是分别组网的,各自采用不同的保护策略。将来有可能采用协调的保护策略,以提高效率、提高资源利用率。

业务发展带来的带宽需求越来越大,而光网络也是沿着大颗粒、智能化的方向发展。光网络的发展涉及器件、光纤、系统和组网策略等一系列问题。最近几年,光网络在器件、光纤方面都有最新的发展,这些发展将很大程度上提高光网络的组网能力。而新型低损耗光纤的发展将大大延长全光传输的距离,为端到端全光通信打下良好的基础。

本期专题将试图从器件、光纤、ROADM光子网系统、光通信系统和组网策略等几方面去探讨超高速光网络的发展,以期给读者一个全面的了解。

张成良

2013年3月20日

本期专题策划人



张成良

中国电信股份有限公司北京研究院副总工程师、工业和信息化部通信科技委传送与接入组副主任、中国通信标准化协会传送网与接入网技术工作委员会副主席、中国通信学会光通信委员会委员;曾获国家科技进步二等奖2项,部级科技进步奖一等奖2项、二等奖2项、集团科技进步一等奖1项;2004年经国务院批准获政府特殊津贴,2006年被信息产业部授予“信息产业科技创新先进工作者”荣誉称号,中国科协第八次代表大会代表;著有技术著作2部,译著1部,近年来向ITU和OIF提供了20余篇文稿。

2013年第1—6期专题计划

1 自组织网络技术与应用

陈前斌 重庆邮电大学通信与信息工程学院院长

2 下一代互联网与IPv6技术演进

崔勇 清华大学计算机系网络所副所长

3 单波长太比特以上超高速光通信系统技术与器件

张成良 中国电信北京研究院副总工

4 大数据技术与应用

刘鹏 解放军理工大学教授

5 软件定义网络

王文东 北京邮电大学网络技术研究院副院长

6 移动互联网的发展趋势和技术方向

蒋林涛 工信部电信研究院科技委主任

逼近香农极限的新型光调制技术

Optical Modulation Technologies for Approaching the Shannon Limit

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0002-006

摘要: 光传输技术经历了多代的技术演进发展, 频谱效率得到了显著改善, 业界开始探讨香农通信理论在光纤传输系统上的最基本线性和非线性信号通道容限是多少, 从而使下一代的新技术超越当前 100G 相干系统的传输性能, 进一步提升谱效率和总容量, 以接近香农的理论极限。新技术包括了更复杂的调制码型和信道编解码方式、预滤波和其相结合的多符号同时检测算法、光正交频分复用 (OFDM) 和奈奎斯特波分复用 (Nyquist WDM) 的多载波技术以及抵抗非线性的补偿方案。新技术进一步优化后, 很可能应用在超 100G 的光传输系统中, 从而满足不断增长的带宽需求。

关键词: 频谱效率; 香农极限; 高斯噪声; 光信噪比; 调制; 非线性补偿

Abstract: Optical transmission technologies have gone through several generations of development. Spectral efficiency has significantly improved, and industry has begun to seek the answer to a basic question: What are the fundamental linear and nonlinear signal channel limitations of Shannon theory when there is no compensation in optical fiber transmission systems? Next-generation technologies should exceed the 100G transmission capability of coherent systems in order to approach the Shannon limit. Spectral efficiency first needs to be improved before overall transmission capability can be improved. The means to improve spectral efficiency include more complex modulation formats and channel encoding/decoding algorithms, pre-filtering with multisymbol detection, optical OFDM and Nyquist WDM multicarrier technologies, and nonlinearity compensation. With further optimization, these technologies will most likely be incorporated into beyond-100G optical transport systems to meet bandwidth demand.

Keywords: spectral efficiency; Shannon limit; Gaussian noise; optical signal noise ratio; modulation; nonlinearity compensation

贾振生/JIA Zhensheng
(中兴通讯美国光通信实验室, 美国 新泽西 07960)
(Optics Lab, ZTE USA, NJ 07960, USA)

年代初期, 电时分复用是核心技术, 光上的主要技术难点是激光器和滤波器光器件性能的稳定性; 90 年代的掺铒光纤放大器的发明和 1996 年 8×2.5 Gb/s 商用波分复用 (WDM) 系统的出现, 迎来了光纤容量提升的一个重要里程碑, 这其中光纤的发展已经从最初的损耗降低向一阶二阶色散管理迈进, 出现了色散位移光纤和非零色散位移光纤 (NZDSF), 很大程度上克服了光纤的线性损伤, 使长距离传输成为可能, 光信号的频谱效率也有了显著增加。这一阶段光信号的调制、编码以及探测和 L 波段使用成为主要的技术发展热点。

第三次技术飞跃则发生在 21 世纪第一个 10 年的中后期, 硅基芯片技术的迅猛发展, 信号处理技术的成熟, 使得重新拾起的相干接收焕发了应有的技术魅力, 成为了这一阶段的核心。原有的色散补偿、偏振模复用和色散、载波频率和相位的恢复以及时钟同步等, 都在基于信号处理算法 (DSP) 的相干接收端的芯片里找到了解决答案, 让光信号的频谱效率提升到 2 b/s/Hz, 光传输也进入了四维正交信号 (X 和 Y 偏振的 I 和 Q 路信号) 的数字相干传输阶段。为了进一步提升频谱效率, 从正交移相键控 (QPSK) 的调制向更多层的信号如 16 相正交幅度调制 (16QAM) 迈进, 多载

1 业务和光传输容量需求

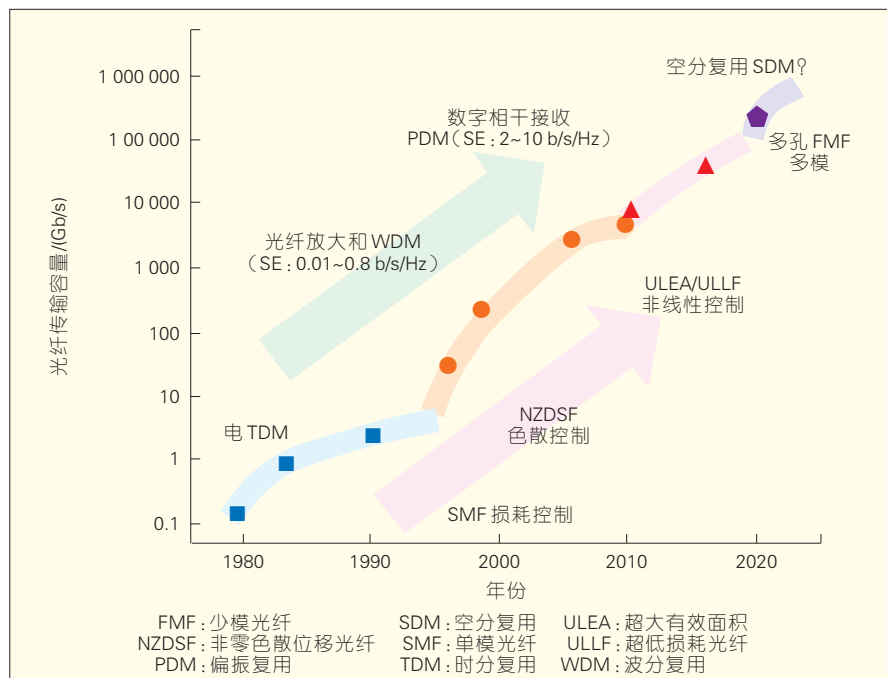
随着海量视频、大规模云计算和移动互联网的迅猛发展, 电信网络的业务量将继续保持高速增长态势。据来自北美的 MINTS 和 Discovery Institute 两家学术机构分析

预测^[1-2], 从 1996 年开始, 互联网业务的年增长率为 50% ~ 60% 之间, 这一预测与当前的业务发展相当吻合。为了支撑业务规模的不断扩展, 底层的光传输技术也经历了多次技术上的变革去满足上层网络业务的需求。经过 20 世纪 70 年代的半导体激光器和低损耗单模光纤技术的突破, 之后几十年间光通信技术得到快速发展。图 1 概括了发展的若干重要阶段。第一个阶段是在 80 年代到 90

收稿日期: 2013-02-25

网络出版时间: 2013-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展 (“863”) 计划 (2013AA010501)



▲图1 光纤通信技术的商用演进

波复用技术如正交频分复用 (OFDM) 和奈奎斯特波分复用 (Nyquist WDM) 以及各种的电域和光域的变体也相继成为研究热点并尝试着商用化的可能。除了调制格式外,信道编码技术也走向了软判决前向纠错码 (FEC) 阶段,因此,在没有牺牲传输距离的条件下,实现了兼容多节点的信号速率的提升,当然,这一过程始终需要平衡光纤容量或效率与传输距离、复杂度和成本等的制约关系。然而,非线性损伤成为了又一个需要攻克的技术堡垒。虽然出现了如数字反向传播算法 (DBP) 等多种非线性的数字域补偿方法,但由于技术复杂度带来的芯片实现难度,使得各种补偿算法还停留在实验室的研究阶段。因而同一时期,新型光纤的发展转向了降低非线性的超大有效面积 (ULEA) 和降低噪声积累的超低损耗 (ULL) 的单模光纤。得益于大色散抑制非线性的相位匹配条件,标准单模光纤比第二发展阶段中的 NZDSF 显现着更好的非线性容忍能力。在未来的下一个阶段,空分复用 (SDM) 或将成为再次提升容量的一个技术

拐点。虽然如多核 (Multicore) 和多模光纤的研制和铺设还需要技术提升和衡量多种因素,但在众多英雄实验 (Hero Experiment) 中显现的良好性能,则预示着其未来应用的一种强大的技术可能^[3-4]。

在转向未来可能的 SDM 前,思考着业务增长的需求无边界,回顾着技术发展的匹配硬要求,一个基本的问题应运而生:最基本的光纤容量限制在哪里? 或者讲在基本的光纤 C 波段 4~5 THz 带宽内,最高能实现的谱效率是多少? 什么样的理想调制和编码技术可以更趋近理想的上限? 本文下面的论述将试图回答部分这样的问题。

2 香农极限

2.1 线性条件

一个信道系统容量的概念最早由 Claude E. Shannon 于 1948 年提出^[5], 主要集中于白噪声或者一般的加性高斯白噪声 (AWGN) 的通道中,能够可靠传送信息的信号速率上限,换句话说讲就是指在信息速率小于香农的

理论极限时,可以通过复杂有效的调制和信道编码实现可靠传输,其适用的前提是有限的输入功率且噪声方差不为零。其基本的关系由下面的公式给出:

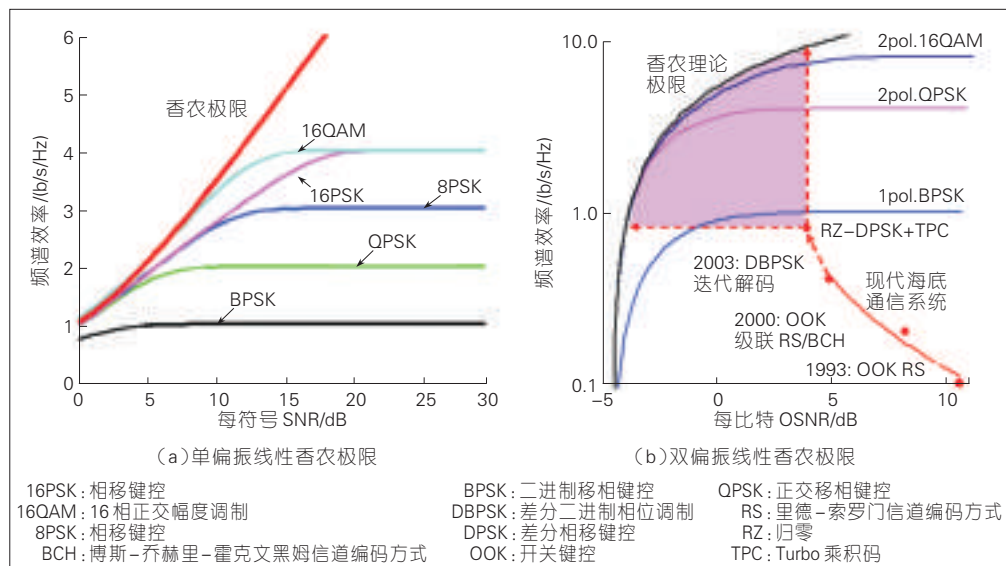
$$SE = C/B = \log_2(1 + SNR_s) \\ \text{或者 } SE = \log_2(1 + SNR_b * SE) \quad (1)$$

这里的 C 代表系统容量, B 代表信道带宽, SE 表示了单位带宽的系统容量,称为频谱效率; $SNR_s = P/N_0R_s = E_s/N_0$, 其中 $P = E_sR_s$, E_s 为每符号的能量, R_s 为信号的符号速率, N_0 为噪声功率谱密度。 SNR_b 则为信噪比,为每符号能量和噪声的比值,因此每比特 $SNR_b = E_b/N_0 = SNR_s / \log_2 M = SNR_b / SE$, $\log_2 M$ 为每符号的比特数量, M 为字母表大小, E_b 为每比特能量。对于无记忆的单偏振信号通道,利用高斯的噪声分布,图 2(a) 给出了几种常用调制格式作为每符号信噪比 (SNR) 函数的线性香农极限,从图中可以看出:所有码型都随着每符号 SNR 的提高而收敛于各自对应的频谱效率;随着星座图点数的增加,高阶调制格式更接近于香农极限,饱和时对每符号 SNR 有更高的要求;同时利用相位 (PSK) 和幅度 (ASK) 的调制格式 (QAM) 相对于只有相位调制的格式,因其不同的欧几里德 (Euclidean) 距离,其收敛的速度更快,如图中的 16PSK 和 16QAM 两种码型的曲线比较。

将此理论应用到光通信领域^[6-7], 因又一维偏振空间的利用,各自的光谱效率 (SE) 翻倍。同时每符号 SNR 或者每比特 SNR 将被光信噪比 (OSNR) 代替。因此:

$$OSNR_{0.1nm} = P/2N_{ase}B_{ref} \\ = SNR_b R_b / 2 * 12.5 \text{ GHz 或者} \\ OSNR_b = P/2N_{ase}R_b = SNR_b / 2 * SE \quad (2)$$

这里的 $OSNR_{0.1nm}$ 代表通常 0.1 nm 下的 OSNR,为了对所有速率信号的归一化,用 $OSNR_b$ 表示每比特下的 $OSNR$,图 2(b) 给出了作为每比特



▲ 图2 几种调制码型的单/双偏振线性香农极限

OSNR 函数的几种码型的双偏振香农极限^[8]。图中还给出了商用系统经历的几代接近香农极限的技术演变过程:从最初的强度调制和里德-索罗门(Reed-Solomon)FEC 编码以及后来的差分二进制相位调制(DBPSK)和 FEC 编解码技术,所需的每比特 OSNR 在降低,同时其 SE 在提高。图中点 RZ-DPSK+TPC 表明了,在非相干接收下,最为接近极限的实验值。图中所包含的区域则代表了当前在相干接收下,利用 QPSK 或者 16QAM 码型和更为复杂的 FEC 技术以及 DSP 算法,SE 所能提升或者 OSNR 所能改善的空间。

2.2 非线性条件

不同于无线信道,在高入射光功率下,光纤还表现有通过克尔(Kerr)的非线性效应,显著地改变着光纤折射率,如相位调制/交叉相位调制/四波混频(SPM/XPM/FWM)等。因而在非线性的光纤通道中存在着两个边界:低功率时受限于放大的自发辐射(ASE)噪声,而在高功率时非线性则统治着所能达到的信道容量。在非非线性条件下,除了信号带宽内的噪声需要考虑,信道间的相互作用也将有严重的影响。图3(a)给出了在没有

非线性补偿的情况^[9],优化的高斯星座分布信号在掺铒光纤放大器(EDFA)链路所能达到的最高频谱效

率。图3(b)给出的是拉曼放大器链路的结果。两个图中还比较了通常使用的单模光纤和非零色散位移光纤,以及两种 1 000 km 和 2 500 km 的传输距离,所使用的主要光纤和器件参数也在图3(a)中显示。从中可以看出两个显著特点:针对同一种光纤,其最大值都出现在同样的输入功率下(EDFA 下,SMF 为 -1.3 dBm, NZDSF 为 -4 dBm; RA 下,SMF 为 -9 dBm, NZDSF 为 -11.7 dBm),与传输距离无关;由于更大的非线性系数以及更小的色散带来的益于非线性相位匹配的条件,同样传输距离下,SMF 性能要明显优于 NZDSF。还需指出的一点是同样传输距离下,众所周知拉曼放大(RA)链路要好于 EDFA,但容易忽

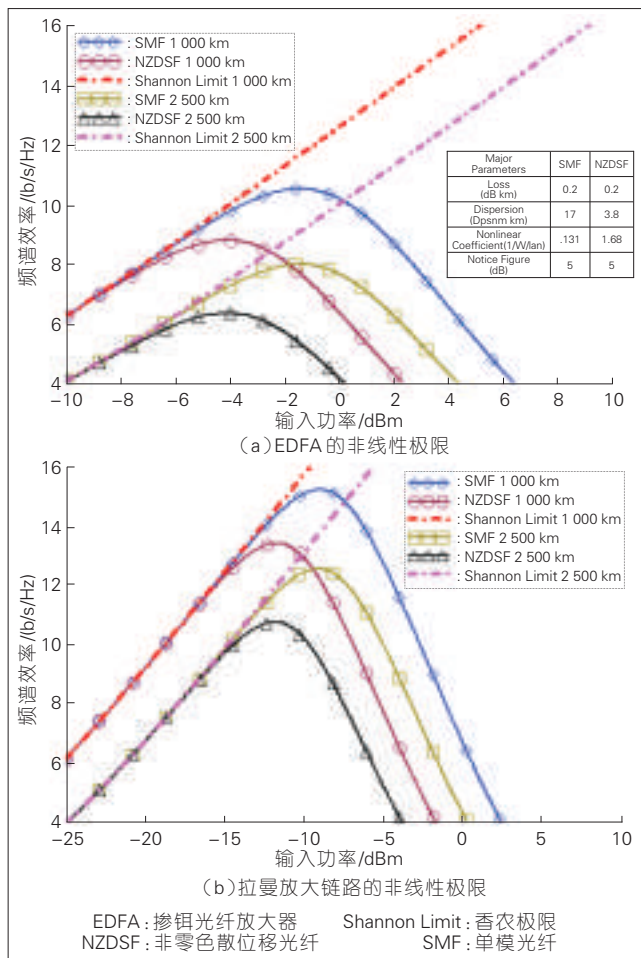


图3 两种光纤在EDFA和拉曼放大链路的非线性极限

视的一点是由于整条链路保持相对平稳的高功率,其抗非线性能力要低,因此其输入功率明显低于EDFA情况,所以在比较拉曼放大带来的好处时,要综合考虑。

基本物理参数没有变化,图4(a)给出了两种不同光纤两种不同放大

经历了3代技术演变^[10]:从最初经典的Reed-Solomon (255, 239)硬判决提供约6 dB的编码增益,到级联编码以及交叉/迭代/卷积解码提高额外的2~3 dB,到目前的软判决的Turbo乘积码(TPC)或者低密度稀疏检验矩阵码(LDPC)提供的大于11 dB的增

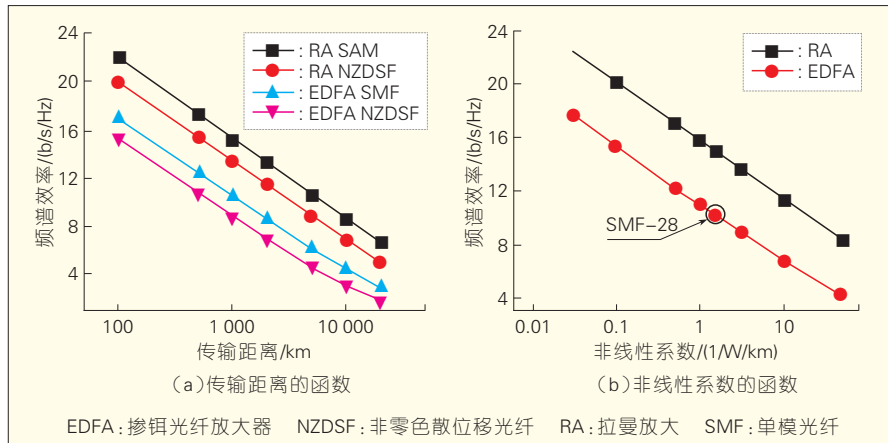
光通信领域。通过缩减误码平台(Error Floor)并且使用更复杂的解码技术,可以继续增强软判决FEC的能力,使其更接近其理论编码增益的极限值。

4 逼近香农极限的关键技术

除了采用低非线性和低损耗的新型光纤,以及复杂软判决FEC带来的传输性能的改善,从前面的分析可以看出,其他逼近香农极限的关键技术还包括更复杂的调制码型和有效的非线性补偿,另外从无记忆到有记忆信号的增强算法也可以突破现有的无记忆信号的香农极限。

4.1 更复杂的调制码型

从香农极限的曲线可以观察到,幅度和相位调制级别越多,如从QPSK到16QAM,其星座图更接近优化的高斯分布,则所能达到的理论极限越接近香农理论。实验室已经展示了从8QAM/16QAM/32QAM一直到256QAM等复杂调制码型的信号,但由于高OSNR的要求以及高的实施代价,其传输的符号速率以及距离都非常有限。图6给出了多种调制码型的OSNR-BER曲线^[11]。比较可以看出QPSK与16QAM和256QAM相比,在BER=1×10⁻³的时候,6.7 dB和18.6 dB的OSNR需求差别。因而,如图4(a)



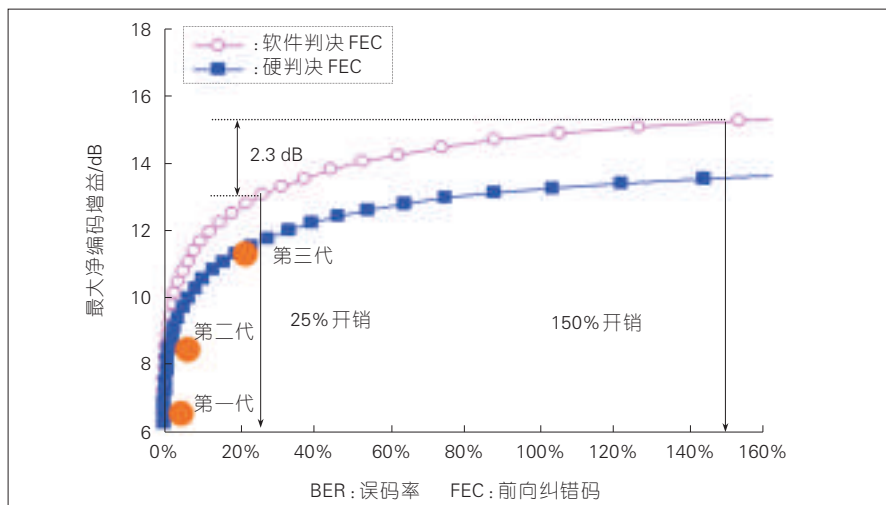
▲图4 传输距离和非线性系数与可实现最高频谱效率的对应关系

机制下的传输距离和频谱效率的对应关系,涵盖了从接入到城域、长途以及跨洋的海底通信网络距离。可以明显看到随着距离的增加,可能达到的频谱效率在线性减小,传输距离从海底通信到接入减小3个数量级,其频谱效率仅增加3倍多,可见光通信网络中增加频谱效率的难度。另外,可以明显地看到拉曼及标准单模光纤的性能要好于NZDSF。图4(b)给出了在传输1 000 km时,两条曲线是变化光纤非线性系数带来的EDFA和RA放大链路的最大可实现频谱效率或者光纤容量。同样可以看出当非线性系数由10降低3个数量级时,频谱效率的增加也只有3倍左右,图中还给出了当前标准单模光纤所在位置,在EDFA放大时,最高可达到SE=10 b/s/Hz,而在拉曼放大时提高到14 b/s/Hz。

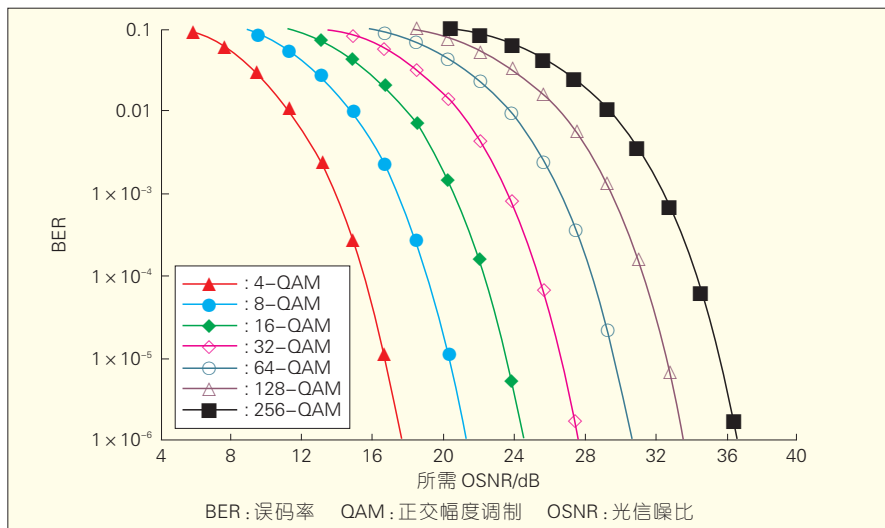
3 信道前向纠错码编解码

除了调制格式和非线性的影响外,FEC技术是另外一个强有力的工具。作为信道的编解码技术,FEC已

益。一个基本的问题是:FEC编码的增益极限是多少?图5给出了在不同开销比例下,最佳软硬判决FEC所能达到的最大理论极限。开销从25%增加到150%时,编码增益理论上可以提高2.3 dB,在不同的开销下,软硬判决FEC的差别约为1~2 dB。软判决的数学算法已经成熟多年,半导体芯片技术的成熟,如处理速度/功耗/集成度等,才使其真正应用到了



▲图5 理论上软硬判决FEC最大可取得的编码增益 (@BER=10⁻¹⁵)



▲图6 多种调制码型的OSNR-BER曲线

所预测,将传输更短的距离。

4.2 无记忆到有记忆信号的多符号同时检测

有记忆信号是指时域符号间有相互关联关系,如色散或者强滤波带来的符号间干扰(ISI),使传输的符号间有相应的能量渗透和交换,此时单符号或者比特的判定已不是最佳的判定准则,多个符号同时判决的序列检测为最优的选择,其实现可以是最大似然序列估计(MLSE)或者最大后验概率(MAP)的数字信号处理算法^[12]。强滤波信号(如从原始具有带宽为 W 的信号利用滤波器削减信号功率和带宽至 $0.8W$ 甚至 $0.5W$)和接收端的多信号同时检测的算法可以突破目前同样调制格式下没有记忆信号的理论极限。预滤波的QPSK和16QAM的比较如图7所示。50%滤波的QPSK信号传输能力已经接近16QAM的信号,只是发送和接收的硬件和算法的复杂度都将显著增加。

4.3 具有Sinc函数形状的信号

强滤波是主动引入符号间关联,在接收端利用多信号检测方式来提高频谱效率。与之接近的技术是通过发射端频谱整形,在频域或者时域中理想情况下引入零代价的子信道

间干扰(ICI)或者ISI,可以更接近香农的极限。如图8所示的频域光谱

和时域脉冲,其实现的两种技术分别称作光OFDM和Nyquist WDM^[13]。光OFDM是指在时域内传输矩形脉冲,其理想ISI为零;而频域内Sinc函数形状的多个子载波虽然重叠,因其正交性,可以无损伤分解各个信号。Nyquist WDM则频域内为矩形,其理想ICI为零;而时域各个载波通道则为Sinc函数信号。这两种技术成为了目前组建超级信道(Superchannel)的首选。

4.4 非线性补偿

由于非线性的作用,从图9可以看到,当输入功率进一步提高,进而增加OSNR时,其性能开始显著下降,工作区域相应地进入了非线性区,非线性补偿可以提升最佳的输入

图7 ▶
预滤波的QPSK和16QAM的比较

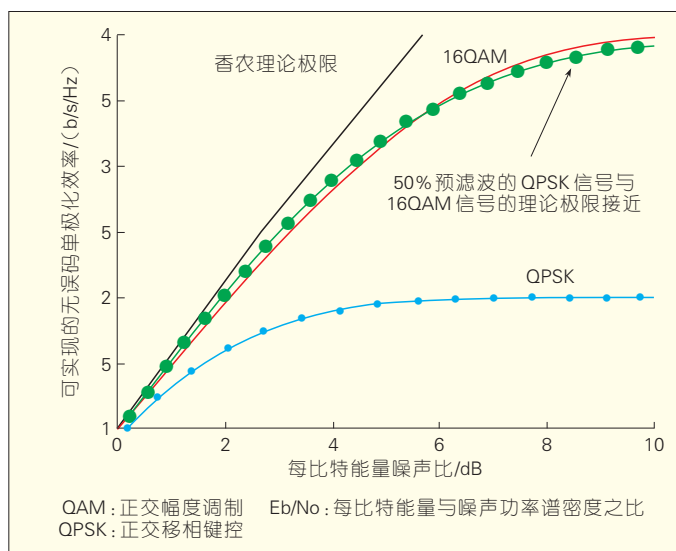
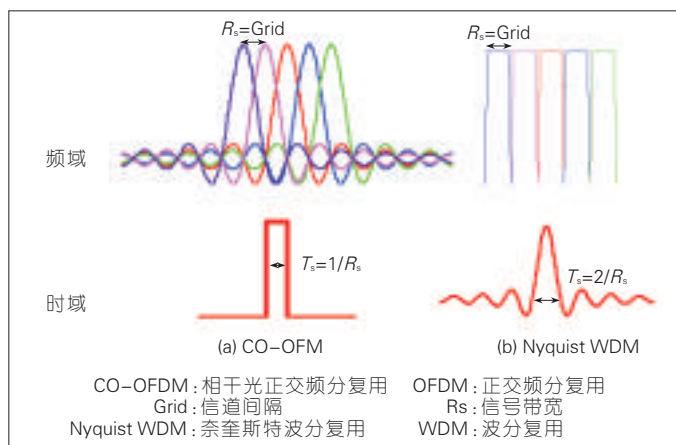


图8 ▶
光OFDM和Nyquist WDM频域和时域的信号



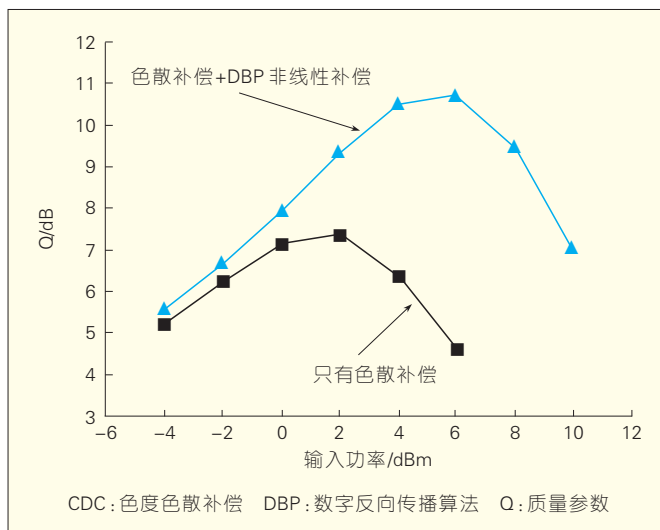


图9
采用DBP非线性
补偿带来的性能改善

功率,在接近香农极限的同时,提高系统传输容量。当前研究中尝试的非线性补偿算法包括了MLSE、沃尔泰拉(Volterra)系列均衡器,数字反向传播算法(DBP)以及射频导频音(RF Pilot tone)等^[14-15]。如果没有算法的简化,MLSE和源于70年代的卫星通信的Volterra方法在100G及以上系统中的非线性补偿应用将因硬件实现的难度而受限;DBP采用分布傅立叶变换方法,可以有效的补偿SPM,对于信道间的XPM补偿则需要整个光纤信道的信息,通过进一步优化步长和算法,DBP有希望在色散补偿通道中首先应用;RF Pilot Tone也在光OFDM系统的研究中验证了一定的补偿SPM和XPM的能力。这几种算法并不是完全独立,可以结合并用,但要想真正投入到商用系统,在平衡性能的同时,其算法的复杂度和实现的难度都要进一步改善。

5 结束语

香农极限是通信领域最为基本的理论指标,随着各种业务对于信号带宽的快速的的增长,底层的光传输技术也经历了多次的技术演变。在相应的传输距离下,对于频谱效率或者光纤传输总容量都提出了更高的要求。在此背景下,除了光纤本身的变革(如SDM的新光纤技术),多种接

近香农极限的技术相继成为研究领域的热点,这包括了更复杂的调制码型和信道编解码方式,预滤波和相结合的符号同时检测算法,光OFDM和Nyquist WDM的多载波技术,以及抵抗非线性的多种补偿方案。这些技术或独立或结合的进一步优化,并伴随着半导体芯片性能的进一步提高,将会使未来超100G系统的性能更加接近香农的极限来满足电信业务的需求。

参考文献

- [1] TKACH R W. Scaling optical communications for the next decade and beyond [J]. Bell Labs Technical Journal, 2010,14(4):3-9.
- [2] University of Minnesota. Minnesota Internet Traffic Studies (MINTS) [EB/OL]. [2012-09-21]. <http://www.dtc.umn.edu/mints/home.php>.
- [3] WINZER P J. Energy-efficient optical transport capacity scaling through spatial multiplexing [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2011,23(13):851-853.
- [4] RYF R, BOLLE C A, VON HOYNINGEN-HUENE J. Optical coupling components for spatial multiplexing in multi-mode [C]//Proceedings of the 37th European Conference on Optical Communication(ECOC'11), Sep 18-22,2011, Geneva, Switzerland. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2011:Th.12.B.1.
- [5] SHANNON C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27:379-423.
- [6] CAI Y, PILIPETSKII A N. Channel capacity of fiberoptic communication systems with amplified spontaneous emission noise [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'05), Mar 6-11, 2005, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2005:OTW1.
- [7] ESSIAMBRE R J, FOSCHINI G J, KRAMER G, et al. Capacity limits of information transmission in optically-routed fiber networks [J]. Bell Labs Technical Journal, 2010,14(4):149-162.
- [8] CAI Y. Coherent detection in long-haul transmission systems [C]// Proceedings of the Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'08), Feb 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008:OTuM1.
- [9] POGGIOLINI P, CARENA A, CURRI V, et al. Analytical modeling of nonlinear propagation in uncompensated optical transmission links [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 2011, 23(11):742-744.
- [10] OUCHI K, KUBO K, MIZUOCHI T, et al. A fully integrated block turbo code FEC for 10 Gb/s optical communication systems [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'06), Mar 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ,USA: IEEE, 2006: OTuK4.
- [11] JIA Z S, YU J J, CHIEN H C, et al. Field transmission of 100 G and beyond: Multiple baud rates and mixed line rates using Nyquist-WDM technology [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012,30(24): 3793-3804.
- [12] CAI Y, CAI J X, PILIPETSKII A, et al. Spectral efficiency limits of pre-filtered modulation formats [J]. Optics Express, 2010,18(19): 20273-20281.
- [13] YU J J, DONG Z, CHIEN H, et al. Transmission of 200 G PDM-CSRZ-QPSK and PDM-16 QAM with a SE of 4 b/s/Hz [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013,31 (4):515-522.
- [14] LI X X, CHEN X, GOLDFARB G, et al. Electronic post-compensation of WDM transmission impairments using coherent detection and digital signal processing [J]. Optics Express, 2008, 16(2):880-888.
- [15] DIAZ A, NAPOLI A, ADHIKARI S, et al. Analysis of back-propagation and RF pilot-tone based nonlinearity compensation for a 9 x 224Gb/s POLMUX-16QAM system [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ,USA: IEEE,2012:OTH3C.5.

作者简介



贾振生,清华大学电子工程系硕士毕业,美国 Georgia Institute of Technology 电气与计算机工程博士毕业;中兴通讯美国光通信实验室助理主任;曾工作于中国电信北京研究院、美国 Telcordia Technologies;已发表论文 100 余篇。

半导体激光器在超高速光网络中的应用

Semiconductor Diode Lasers in High-Speed Optical Networks

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0008-004

摘要: 光通信的快速发展对光电子器件提出了更高的要求。基于超高速光传输网络、以太网及接入网对通信用半导体激光器的性能要求,结合中国光电子器件具体情况,对半导体激光器的性能、研究状态及应用进行了探讨。

关键词: 超高速光网络; 半导体激光器; 线宽; 可调谐; 直接调制

Abstract: For further development of optical networks, more is required of optoelectronic devices. In this paper, we analyze high-speed optical transmission, optical Ethernet, and optical access networks and determine the requirements on diode lasers. We discuss optoelectronic devices in China, in particular, research on and applications of diode lasers.

Keywords: ultrahigh-speed optical network; semiconductor diode lasers; linewidth tunable; direct modulation

赵建宜/ZHAO Jianyi¹张玢/ZHANG Di²刘文/LIU Wen^{1,3}

- (1. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074;
 2. 武汉光迅科技股份有限公司, 湖北 武汉 430205;
 3. 武汉邮电研究院, 湖北 武汉 430074, China;
- (1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Accelink Technologies Company, Ltd., Wuhan 430205, China;
3. Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, Wuhan 430074, China)

1 光网络的发展趋势及对激光器的要求

由于因特网业务的爆炸式增长,全球对网络带宽的需求日益增加。因此,作为信息承载和传输的光纤通信网络发展呈现一个重要趋势:即业界对超高速率、超大容量光纤通信系统的需求愈加急迫。在骨干光传输网方面,在相干检测和先进的多级调制技术的推动下,目前商用密集波分复用(DWDM)系统中每个通道的速率也从10 Gb/s上升到40 Gb/s,并快速越过40 Gb/s技术直接向100 Gb/s甚至更高速率的系统升级^[1-3];在光以

以太网方面,由于大量视频业务导致的带宽需求急剧增加,40G/100G以太网的标准被迅速提上了日程;而在光接入网方面,基于波分复用技术的无源光网络(WDM-PON)系统被大规模应用从而提高用户的接入带宽,部分系统的速率已经能够达到10 Gb/s以上^[4]。而光网络的飞速发展毫无疑问地对相关光电子器件的性能提出了更高的要求。

1.1 基于多级调制格式的相干光通信系统

在骨干光传输网方面,有关组织已经规定了基于相干检测技术的偏振复用正交相移键控(PM-QPSK)调制格式作为100 Gb/s超长距离传输侧的首选。采用PM-QPSK的系统具有灵敏度高、传输距离远的优点;另外,

相干检测对接收端的信号进行线性的变换,因此光纤线路中引入的线性损伤,如色度色散、偏振模色散以及偏振相关损耗等都可以通过数字信号处理的方式进行补偿,也就是说基于相干检测技术的PM-QPSK系统对这些损伤有更大的容忍。

虽然相干检测技术能够带来诸多好处,但它对相关的光电器件要求较高。最为典型的就是在相干光通信系统中,一般用载波的相位来携带传输的比特信息,而系统的发送和接收端都需要一个激光光源,因此,具有低相位噪声的可调谐激光器才是相干光通信系统中的理想光源^[5]。考虑到激光器的线宽与相位噪声成正比关系,为了保证相干光通信系统的性能,窄线宽可调谐激光器变得不可或缺。在40 Gb/s的相干光通信系统中,如果使用经典的M阶相位估计方法,为保证在误码率(BER)为 10^{-4} 时线宽引入的光信噪比(OSNR)代价小于1 dB,使用QPSK调制格式对线宽

收稿日期: 2013-02-26

网络出版时间: 2013-05-02

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)规划(2010CB327603); 国家高技术研究发展(“863”)计划(2011AA010304)

的容限是 4.4 MHz。系统对线宽的容限会随着调制格式复杂度的增加而降低,特别是当相位状态数多于 8 种状态时,比如对于 8-PSK、16-PSK 调制,系统需要激光器的线宽分别小于 330 kHz、50 kHz。在 100 Gb/s 的 PM-QPSK 系统的实际应用中,为了保险起见,一般要求激光器的线宽小于 500 kHz。另外,除了对激光器的线宽有较为严格的要求外,对于 50 GHz 的 DWDM 系统,还需要激光器的输出波长精确度能够在 ± 2.5 GHz 范围内,这就需要在激光器模块中加入波长锁定的装置。

1.2 相干光正交频分复用系统

为了实现更高速率的传输,一个研究重点是在 PM-QPSK 技术上进行扩展,采用编码效率更高的调制格式,如 M 阶正交幅度调制 (M -ary QAM)^[6],这种方式的好处在于能够在现有系统上进行平滑升级;另一个热门研究方向是基于相干检测的光正交频分复用 (CO-OFDM) 技术,通过带宽复用的方式,CO-OFDM 能够支持太比特每秒的速率传输数千公里,它也被认为是超 100 Gb/s 光传输技术中最有前景的方案^[7]。在 CO-OFDM 系统中,由于同样采用相干检测的方式对多个子载波进行解调,因此在需要激光器具有低相位噪声的同时还需具备大范围连续调节的能力。

1.3 高速以太网及接入网

随着宽带业务的密集应用及云服务的快速发展,为满足运营骨干网,企业数据中心对更高带宽的要求,平滑升级的 100 Gb/s 以太网将是最佳提升带宽的方案。100 Gb/s 以太网主要有两种使用 WDM 技术的标准,分别对应 10 km 及 40 km 传输距离的运用。在这里光源为直接调制或者单片集成调制器调制,要求调制动态消光比需要达到 4 dB 或者 8 dB。由于主要运用于局域网络中,工作环境较为恶劣,成本控制严格,通常要

求激光器温度特性好,具备无制冷工作能力,对激光器线宽,波长准确度等的要求相对比较宽松。

在接入网方面,近年来基于波分复用技术的无源光网络收到了重视,在 WDM-PON 网络中,每个用户被分配一对波长,因此用在光网络单元 (ONU) 中的激光器必须工作于无色的模式。虽然有多种无色 ONU 的解决方案,但从性能上来讲,基于可调激光器的 ONU 是 WDM-PON 中最理想的选择^[8]。但与用于相干光通信系统中的激光器不同,它对激光器的线宽、输出功率以及中心波长稳定度方面要求较低,却需要该激光器的成本较低。表 1 所示为不同层面光网络对激光器性能的需求。

2 半导体激光器的性能特点及发展趋势

综合前述对现今超高速光通信网络的发展趋势,可以看出在光网络不同的应用层面对激光器的需求也不尽相同,在高速相干光传输中,要求激光器具有极窄的线宽(千赫兹水平)和大范围的调谐能力,而在高速以太网中,需要激光器具备高速直调的能力;至于在基于 WDM-PON 技术的高速接入网中,对可调激光器的成本控制是一个关键因素。

2.1 窄线宽可调谐半导体激光器

目前成熟的,能够大规模使用的窄线宽可调谐半导体激光器主要有分布反馈 (DFB) 式激光器阵列,取样分布布拉格反射镜 (SGDBR) 激光器 and 外腔半导体激光器。DFB 激光器阵列是在传统 DFB 激光器基础上发展而成的,但单个 DFB 激光器的调节范围有限,根本无法满足 DWDM 系统

的要求。而 DFB 激光器阵列是将多个 DFB 激光器以并联的方式集成起来,每个独立的 DFB 激光器均采用同样的增益介质,但光栅的间距不同,因此它们具有不同的中心波长。这样一来,即使每个单独的 DFB 激光器的调节范围有限,通过级联的方式也能够获得大范围的调谐。由文献[9]可以知道,DFB 半导体激光器线宽与激光器腔长及输出功率成反比。因此增加腔长及激光器工作时的输出功率便成了两种降低线宽的主要方式。普通相移 DFB 半导体激光器受限于强烈的空间烧孔效应,在制作长腔半导体激光器时,往往会在相移处聚集大量光子,导致该处增益降低甚至成为吸收区,使激光器工作在自脉动等非稳定状态。而空间烧孔效应亦随着激光器输出功率的增高变的更加严重。因此窄线宽 DFB 半导体激光器的主要技术难点是如何抑制空间烧孔效应。这个问题从 DFB 半导体激光器诞生之日起就一直是学者们研究的热点。主流的技术手段有多相移 DFB 半导体激光器,分布相移 DFB 半导体激光器。日本学者在 90 年代初便利用分布相移手段制作出了最小线宽达 3.6 kHz 的超窄线宽 DFB 半导体激光器^[10]。但是这类激光器光栅结构复杂,通常需要电子束光刻技术制作光栅,成本昂贵,因此一直都以实验室报道及理论分析为主,少有大规模产业应用。

单片集成取样光栅分布布拉格反射式 (SGDBR) 可调谐激光器由美国 UCSB 大学提出^[11],采用两个取样周期稍有不同光栅,利用游标效应进行波长调节,调谐范围可达 40 nm 以上。SGDBR 激光器一般利用电注入改变折射率,因此调谐速度能够达

▼表 1 不同层面光网络对激光器的性能需求

需求	功率	调谐范围	线宽	调制特性	成本
光传输网	高	宽	窄	外调制	中
光以太网	中	无数据	无数据	外调制/直接调制	低
光接入网	较低	较宽	无数据	直接调制	低

到纳米级,是目前波长调谐速度最快的激光器,而且该类型激光器结构紧凑,输出光谱质量高,便于与半导体光放大器(SOA)、电吸收型(EA)调制器、马赫曾德尔(MZI)调制器集成。但是由于取样光栅具有Sinc型的光谱包络,因此输出功率不均匀,中心通道与边缘通道功率相差5 dB以上^[12]。利用集成的SOA可以明显改善输出功率的不均匀性,但是噪声特性会劣化,通常均为兆赫兹量级,因此不适合运用于超高速光网络中。SGDBR激光器一般最少有4个控制电极,输出波长是这4个电极的函数,导致控制算法相当复杂,测试成本高昂。在调制速度方面,SGDBR受限于较大的腔长,直接调制速率一般在5 Gb/s以下^[13]。为解决传统SGDBR激光器的问题,日本NTT公司、英国Bookham公司及武汉光迅公司相继提出了采用超结构光栅^[14]、数字超模光栅^[15]和数字级联光栅DBR激光器^[16],但是由于这些激光器均沿用了SGDBR激光器的设计理念,性能上还没有取得突破。但是单片集成可调激光器无疑是今后这方面工作的一个重要方向。

目前外腔可调谐激光器是可调谐激光器的一个主要类型,具有线宽窄、调谐范围大、输出功率高、较好的单纵模特性以及稳定性等优点,但是其体积一般较大,因此外腔可调谐激光器的应用主要集中在科研及测试领域,如Littrow型与Littman型外腔可调谐激光器。微光机电系统(MEMS)技术的出现,使得外腔激光器在功耗和体积上有了很大的改善。而Ionon公司便是其中的代表,该公司的可调谐激光器采用Littman-Mecalf结构,其原理如图1所示。该MEMS型外腔可调谐激光器能够封装在一个14针脚的蝶形管壳中,输出功率能够达到10 mW以上,调节范围覆盖整个C波段。得益于低噪声电源的使用,该器件的线宽小于15 kHz^[17]。但是,为了实现连续无跳模调谐,该激光器采用

了基于远端虚轴转动的MEMS反射镜,因此其驱动结构比较复杂,产品价格也相对较高。

Emcore公司的窄线宽可调谐激光器是目前在100 Gb/s相干光通信中应用最为广泛的一款产品,它基于原Intel公司外腔可调谐激光器技术^[18],如图2所示。该器件的模式选择滤波器为两个级联的、由单晶硅制作的法布里-珀罗(F-P)标准具,利用游标效应,使得只有两个标准具透过峰峰值波长重合的纵模可以起振,而其他的纵模被抑制。通过温度精确控制标准具透过峰的峰值波长,从而能够实现波长的可调谐性。该产品调谐范围可覆盖C波段或L波段,在可调谐范围内可对任意波长进行调谐,输出功率为30 mW以上,线宽小于100 kHz以及边模抑制比(SMSR)大于45 dB,在此设计中没有活动部件,稳定性好,但是为了实现波长的精密调谐,需要对这两个硅标准具进行精确的温度控制,具有一定的难度。

NEC公司也提出了一种新型的基于双边外腔的可调谐激光器^[19]。谐振腔内依次集成了增益管芯、准直透镜、熔石英标准具以及液晶反射镜,标准具的透射峰值位于ITU-T定义的通信波长内,和液晶反射镜共同

构成了该器件的模式选择滤波器,调节时仅需改变液晶反射镜的驱动电压便可选择不同波长输出。标准具同时还起到了波长锁定器的作用,避免了在输出端外加一个波长锁定装置。该器件的结构较为简单,输出功率大于20 mW,通过优化标准具的端面反射率,其波长精度为 ± 0.6 GHz,测试线宽小于1 MHz。Cyoptics(收购原Pirelli公司的光学事业部)公司的可调谐激光器也采用了类似的结构,只是用一个硅基液晶(LCoS)反射镜代替了普通液晶反射镜。

2.2 高速调制激光器

高速调制半导体激光器主要运用于100 Gb/s及更高速率以太网,机房数据互连。在城域网络中,由于传输距离近,成本控制严格,因此要求半导体激光器芯片本身具备高速直接调制能力。目前直接调制DFB半导体激光器已经可以做到40 Gb/s以上的调制速率。但是由于增益区载流子的瞬时变化引起折射率的相应改变,导致输出的激光波长振荡,光脉冲所含光谱严重展宽,传输光脉冲色散损耗大,限制信号的传输距离。单片集成的电吸收DFB激光器(EML)具备低成本、低功耗、小尺寸、

图1 ▶
Ionon公司MEMS型
外腔可调谐激光器

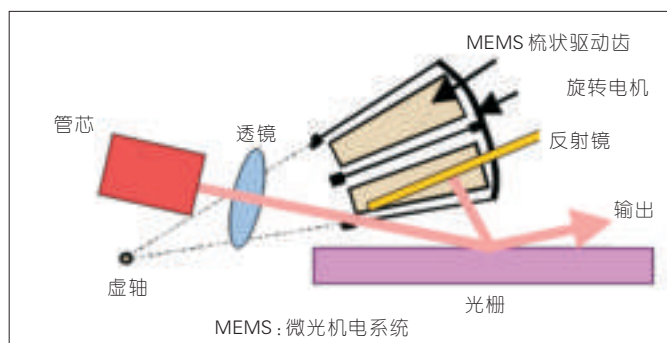
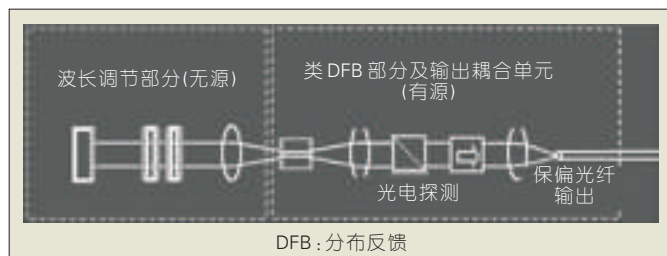


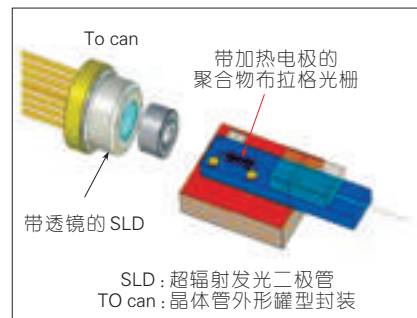
图2 ▶
Emcore公司外腔
可调谐激光器的
原理图



传输距离远特点,可以用传统的DFB激光器管壳封装利于升级换代,大规模生产等优点使其已经成为10 Gb/s光城域网及40 Gb/s干线网的首选器件。100 Gb/s及更高速率短距离通信中EML依然是各个通信器件厂商的首选方案。2005年,美国Infinera公司率先实现了 10×10 Gb/s的光传输模块,单片集成了10个1550 nm波段的DFB激光器,10个EA调制器及AWG合波器。2012年,日本NTT公司则连续报道了两款规格相似的EML集成芯片,分别工作于 4×25 Gb/s及 4×40 Gb/s的模式,传输距离达到了40 km。在该芯片单片内集成了4个1310 nm波段的DFB半导体激光器,4个EA调制器及多模干涉耦合(MMI)合波器。

2.3 低成本可调谐半导体激光器

由于可调谐激光器属于高端光电子器件,因此研制低成本的可调谐激光器一直是学术界和产业界的一个难点。虽然单片集成型可调谐激光器,如SGDBR可调谐激光器,是较为理想的方案,但受限于制作工艺和成品率等问题,其成本一直居高不下。在这方面一些韩国的研究者们进行了较多的工作,并提出了多种用于WDM-PON系统中低成本的激光器解决方案。其中,Yoon等人提出一种基于超辐射激光管和平面布拉格反射器的外腔可调激光器已经能够实现2.5 Gb/s的直接调制实验,其基本结构如图3所示^[20]。



▲图3 一种低成本外腔可调谐激光器原理结构图

为了降低该器件的成本,采用了无制冷的芯片并将其放置于一个晶体管外形罐型封装(TO can)中,因此在整个激光器中就避免了热电制冷器(TEC)的使用,而TEC正是可调激光器中成本较高的一个元件。

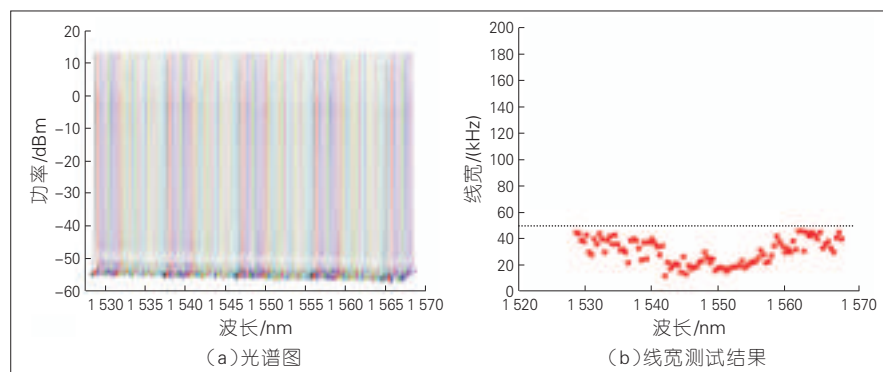
3 研究进展

武汉邮电科学院从20世纪80年代开始即开始了通信用激光器的研制,陆续研制出10 Gb/s无制冷直接调制DFB激光器、宽可调谐SGDBR激光器等器件。在窄线宽可调谐半导体激光器方面,目前已研制成功基于MEMS技术的宽可调谐窄线宽外腔激光器,能够实现C波段50 GHz间隔的波长输出,输出功率大于20 mW,线宽小于100 kHz,其光谱和线宽特性如图4所示^[21]。利用纳米压印技术,在中国率先研制成功多通道DFB阵

复杂光栅亦可低成本高产产地实现量产,有望大幅度降低窄线宽DFB激光器的制作成本,为窄线宽DFB激光器的大规模使用铺平道路。

4 结束语

随着光传输网,光以太网和光接入网都向着高速大容量的方向发展,光网络对激光器的性能要求越来越高。在高速光传输网中,由于采用了相干检测的方式,需要激光器具备大功率、窄线宽和宽范围调谐的能力,目前能够成熟商用的是主要是外腔型可调激光器。在高速以太网中,需要激光器具备高速直调的能力,对激光器的线宽和可调谐特性要求不高,因此EML是较为理想的选择。而在基于WDM-PON的高速接入网中,需要激光器具备较宽范围的调谐能力和极低的成本,而目前如何实现低成



▲图4 窄线宽可调谐激光器C波段ITU-T定义的通信波长通道

列激光器、数字级联SGDBR激光器。传统窄线宽DFB激光器所需的

本的可调谐激光器仍旧是学术界和产业界的一个难点。

参考文献

- [1] WINZER P J, ESSIAMBRE R J. Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12):4711-4728.
- [2] SUN H, GAUDETTE J, PAN Y, et al. Modulation formats for 100 Gb/s coherent optical systems [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '09), Mar 24-26, 2009, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:3p.
- [3] MIYAMOTO Y, SUZUKI S. Advanced optical modulation and multiplexing technologies for high-capacity OTN based on 100Gb/s channel and beyond [J]. IEEE Communications Magazines, 2010, 48(3): 65-72.

- [4] CHOI B S, OH S H, KIM K S, et al. 10-Gb/s direct modulation of polymer-based tunable external cavity lasers [J]. Optics Express, 2012, 20(18): 20368-20374.
- [5] SEIMETZ M. High-order modulation for optical fiber transmission [M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2009: Chap 7.
- [6] WINZER P J, GNAUCK A H, DOERR C R, et al. Spectrally efficient long-haul optical networking using 112-Gb/s polarization-multiplexed 16-QAM [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4): 547-556.
- [7] ZHANG S L, HUANG M F, YAMAN F, et al. 40×117.6 Gb/s PDM-16-QAM OFDM transmission over 10181 km with

➡下转第20页

超高速率超大容量建设用光纤技术

Optical Fiber Technologies for Ultrahigh-Speed, Ultralarge-Capacity Telecommunication Networks

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0012-005

摘要: 超高速率、超大容量、超长距离的光纤传输技术是解决通信网未来带宽需求的关键技术之一。在系统单信道速率向 100 Gb/s 甚至 1 Tb/s 演进过程中, 传统的 G.652.D 低水峰光纤仍将发挥重要作用。超高速率超大容量光纤通信在器件、调制格式、接收检测方式等方面的创新, 对通信光纤的性能提出了新的要求。进一步降低光纤损耗可以延长中继距离; 大有效面积光纤可以提高注入信道光功率, 降低非线性效应, 提高链路光信噪比(OSNR)。多芯光纤和少模光纤, 可以增加空分复用维度, 是未来突破光纤香农极限的研究方向之一。

关键词: 光纤通信; 超低损耗光纤; 大有效面积光纤; 少模光纤; 多芯光纤

Abstract: Ultrahigh-speed, ultralarge-capacity, ultralong-haul transmission are key to solving bandwidth shortage problems. As transmission speeds approach 100Gbit/s or even 1Tbit/s per channel, the standard G.652.D low-water peak fiber will still be important in high-speed, long-haul systems. New requirements on the optical fiber have emerged because modulation methods have evolved, and new innovations have been made in coherent detection and devices. The repeater distance can be increased by further decreasing the optical fiber attenuation coefficient. The nonlinear coefficient decreases as the effective area increases in the large effective area fiber (LEAF). The OSNR of the fiber can be improved by increasing the input channel signal power. Multicore fiber and few-mode fiber can be used in space-division multiplex to avoid problems related to the Shannon limit.

Key words: optical fiber telecommunication; ultralow-loss fiber; large effective area fiber; few-mode fiber; multicore fiber

成煜/CHENG Yu

杨晨/YANG Chen

罗杰/LUO Jie

(长飞光纤光缆有限公司 光纤光缆制备技术
国家重点实验室, 湖北 武汉 430073)
(State Key Laboratory of Optical Fiber and
Cable Manufacture Technology, YOFC, Wuhan
430073, China)

大规模应用的 G.652.D 光纤来实现超大容量、超高速率系统传输技术的演进? 如何选用新的光纤技术来实现未来网络扩容和投资回报的平衡? 这些将是本文探讨的问题。

1 超高速率超大容量传输系统

1.1 实际的传输系统

目前的光纤传输网络建设主流设备多是 40G 的波分复用系统, 也存在部分 100G 的波分复用系统在建商用工程。这些工程采用了多种光纤光缆, 如 G.652 光纤、LEAF 光纤、G.655 光纤、超低损耗光纤制作的光纤复合架空地线(OPGW)光缆等。特别是一些实际传输工程是在已经安装的 G.652.D 线路上实现的, 这将在最大程度上保护运营商的资产安全。例如中兴通讯在 2012 年 OFC 会议上报道了采用 8 个信道, 单信道 216.4 Gb/s 的速率, 实现了 1 750 km 普通单模光纤上的传输系统, 频谱效率达到了 4 b/s/Hz^[2]。美国 Verizon 公司在 2012 年 OFC 上会议报道了采用超

随着互联网应用基础上的移动电话用户数和固网接入用户数的持续增加, 以及这些用户的传输需求从语音和文字发展到图片、视频和其他类型的超大数据流, 人们对网络带宽的需求日益迫切。因此造成作为基础的光纤传输网面临巨大的扩容压力。“宽带中国”战略提升了运营商

投资光纤网络的兴趣, 这些投资将在未来几年内给运营商带来直接的回报。但由于投入产出巨大的剪刀差, 电信业的毛利率在逐年下降, 电信运营商越来越关注网络建设成本。光纤通信技术在 21 世纪初依然保持着高速发展的势头, 通信容量预计在未来 10 年左右将达到单根光纤的香农极限^[1]。因此光纤厂商需要根据光纤通信技术的变化研发光纤新技术, 更好地服务于通信光纤网络的建设。而从运营商角度考虑, 如何利用好已

收稿日期: 2013-02-23

网络出版时间: 2013-05-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (“973”) (2012CB724105)

比各种传输方案,我们将部分信息摘录于表2中。表2中的标准单模光纤(SSMF)表示无特殊性能指标优化的G.652光纤。

通过分析全球光纤通信工程和传输实验的技术发展趋势,结合传输技术对光纤的要求,本文认为光纤技术发展的方向为:

(1) G.652.D 光纤在超高速率光纤传输网的建设中仍然将发挥重要作用,并且色散将不再是制约系统传输距离的主要因素。在大多数应用场景,G.652.D 光纤仍然具有良好的性能价格比。

(2) 低损耗的单模光纤和超低损耗的单模光纤,在需要长跨段的应用场景,有助于提高光纤链路的OSNR。

(3) 大有效面积单模光纤,包括低损耗的大有效面积光纤,既降低了光纤的非线性效应,又提高链路的OSNR,应用于海底光缆及超长距离无中继传输等特殊场合具有较好的技术实用性。但是G.654光纤存在与普通单模光纤的熔接兼容性差,截止波长偏大、拉曼增益小等问题。目前国际电信联盟(ITU-T)已经修订了

G.654系列标准。

2 光纤技术的发展历程和中国光纤产业的技术突破方向

2.1 光纤技术的发展历程

从1970年世界上第一根光纤拉制出来,到光纤的衰减降到20 dB/km的实用化水平,光纤技术的进步一直依赖于材料技术的突破和设备技术的进步。而1998年零水峰光纤概念的初次出现,为光纤制造厂商打开了二氧化硅光纤脱羟基的工艺路径,全世界光纤厂商通过对设备和工艺的改造实现了低水峰光纤的规模化生产。21世纪初单模光纤的新技术标准将低水峰光纤列为G.652.C和G.652.D两个子类,并迅速地获得了光传输市场的认可。2002年超低损耗概念光纤的实验室水平已接近石英光纤的极限(0.1484 dB/km)^[12-19],但是由于光纤工艺和设备的局限带来的成本上升,该光纤并没有获得市场的认可。EDFA的普遍使用克服了光纤衰减的问题,超低损耗光纤也没有

列入光纤标准研究。在2.5G和10G建设过程中,由于色散和偏振模色散(PMD)对信号的损伤,光纤链路中必须进行色散补偿和PMD补偿。色散补偿光纤(DCF)的研发成功解决了线路色散的问题,而光纤拉丝过程中搓扭技术的实现使得光纤链路的PMD值大大改善。这些技术的发展使得G.652.D光纤大规模地应用在10G到40G的传输工程建设上。

2.2 超低损耗光纤技术仍有待突破

光纤技术发展的主线之一,是在光纤损耗、色散、偏振模色散、非线性系数等指标的不断改善、以及这些指标与光纤工作窗口、系统传输技术之间的平衡。近年来,新调制格式和相干检测方式极大地克服了光纤链路的色散导致的传输距离限制,这使得进一步降低光纤衰减和非线性系数又成为关注的重点。

光纤的损耗水平是与制造光纤的材料、工艺、设备技术紧密相关的。光纤在通信窗口的损耗主要来自材料的红外和紫外吸收拖尾、水峰吸收、散射损耗、弯曲损耗和缺陷带来的损耗。采用低水峰工艺制备的光纤,其损耗最大来源是散射损耗。通信光纤的散射损耗包括线性散射和非线性散射。非线性散射主要是受激拉曼散射和受激布里渊散射。而光纤中的线性散射主要是瑞利散射。光纤中瑞利散射是由于光纤芯子中掺杂的二氧化锗的密度与浓度起伏所引起。而掺杂二氧化锗的主要目的是增大光纤芯子的折射率,形成单模光纤的波导。要进一步降低光纤的损耗,需要降低部分瑞利散射损耗,最佳的途径是采用单一材料的纯硅芯。而为了形成波导,必须在纯硅芯外沉积掺氟的包层,这对设备、工艺和波导设计等方面提出了很大挑战。在超低损耗光纤的制备上,由于该类光纤的材料结构与普通G.652光纤区别很大,需要通过掺氟工艺实现折射率降低的光学包层来满足光

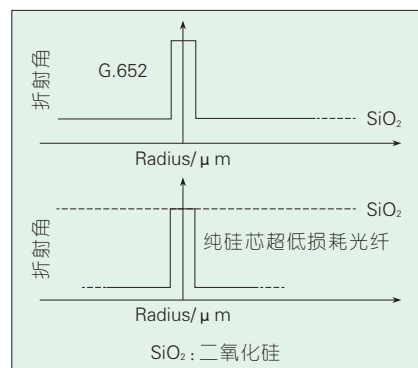
▼表2 文献报道的光纤链路上传输实验

容量	技术方法	光纤链路	完成单位
1 Tb/s	相干光正交频分复用(CO-OFDM)	600 km SSMF	The University of Melbourne
400 Gb/s	光正交频分复用(256QAM-OFDM)	400 km SSMF	Tohoku University
90 × 538 Gb/s	高阶相位正交振幅调制(PDM-64QAM)	240.3 km 低损耗纯硅芯光纤	NTT Corporation
8 × 320 Gb/s	C-band WDM, 320G/信道	5 600 km 大有效面积光纤, Aeff=120 μm ² , 0.185 dB/km	Alcatel-Lucent, Bell Labs
127 Gb/s	双偏振四相相移键控(DP-QPSK)	4 800 km 色散管理链路。 第一段: 45 km, 19 ps/nm/km, 0.2 dB/km, Aeff=90 μm ² ; 第二段: 28 km, 38 ps/nm/km, 0.245 dB/km, Aeff=24.5 μm ²	NEC Laboratories America, Inc
64 × 43 Gb/s	偏振复用归零码二进制相移键控(PDM-RZ BPSK)	468 km 纯硅芯光纤, 0.163 dB/km, Aeff=115 μm ²	Alcatel-Lucent Bell Labs
8 × 80 Gb/s	PDM-OFDM-16QAM	4 200 km 环回实验, 两段光纤的组合链路。第一段: 30.3 km, 0.16 dB/km, Aeff=146 μm ² ; 第二段: 30.3 km, 0.16 dB/km, Aeff=112 μm ²	NEC Laboratories America, Inc
100 Gb/s	PM-QPSK	1 500 km SSMF	AT&T Labs
CO-OFDM: 相干光正交频分复用 DP-QPSK: 双偏振四相相移键控 OFDM: 正交频分复用 OPGW: 光纤复合架空地线 PDM: 偏振复用 PDM-RZ BPSK: 偏振复用归零码二进制相移键控 QAM: 正交幅度调制 QPSK: 正交相移键控 SSMF: 标准单模光纤 WDM: 波分复用			

纤波导结构的需要。从材料的角度看,纯硅芯光纤由于二氧化硅芯层材料全部是玻璃网络形成体,未掺杂网络修饰体,使得玻璃网络的致密性与均匀性提高。因此纯硅芯光纤可以最大程度上克服掺杂引起的密度与浓度起伏,也就降低了瑞利散射损耗。但是,由于玻璃网络的致密性,导致其芯子羟基(-OH)脱除更困难,因此,纯硅芯光纤较难实现去除水峰,达到低水峰标准。纯硅芯光纤的另外一个弊端是工艺过程的复杂性和制备难度导致产能有限,光纤的制造成本会有所上升。图2给出了G.652和超低损耗光纤的折射率示意图。超低衰减光纤能否大规模应用还有待市场的检验。

2.3 提高光纤的有效面积是光纤研发的方向之一

大有效面积(LEAF)光纤在超高速率、超大容量传输系统中受到重视,是因为光纤有效面积的提高,可以使得光纤的非线性系数从常规单模光纤的 $1.26 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ 降到大有效面积光纤的大于等于 $1 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$,甚至减小到一半。非线性系数降低的优点是可以让注入光纤信号光最优功率的提高和光纤链路单跨段长度的增大。这样的配置可以减小网络建设的中继放大的需求,在特殊网络建设场合具有较大优势,例如海缆通信等。国际电信联盟已修订了截止波长位移单模光纤的G.654光纤标准,



▲图2 标准 G.652 光纤和纯硅芯超低损耗光纤的折射率示意图

其主要特征是根据光纤在 1550 nm 处的不同有效面积等指标划分了类别,以便更好地指导光纤制造与使用,详细情况请参见表3。在海缆通信建设方面,为减少海底放大器数

▼表3 ITU-T G.654标准的修订

光纤指标	模场直径 @1550 nm	光缆截止 波长	光纤色散系数 @1550 nm	光纤色散斜率 @1550 nm	光纤衰减系数 @1550 nm	光纤PMD系数
G.654.B	9.5 ~ 13.0 μm	≤ 1530 nm	≤ 22 ps/nm · km	≤ 0.070 ps/nm ² · km	≤ 0.22 dB/km	≤ 0.20 ps/√km
G.654.D新	11.5 ~ 15.0 μm	≤ 1530 nm	≤ 22 ps/nm · km	≤ 0.070 ps/nm ² · km	≤ 0.19 dB/km	≤ 0.20 ps/√km

量,除了要求扩大光纤 1550 nm 的模场外,还要求进一步降低光纤的损耗。该类光纤的波导结构设计要求更为复杂,如果同时要实现更低的光纤损耗,制造难度会增大。超低损耗大有效面积光纤的制造成本会有一定幅度的上升。

大有效面积超低衰减光纤目前主要应用于海底光缆。据住友公司网站介绍,其纯硅芯大有效面积超低衰减光纤从20世纪80年代开始应用,到目前为止销售总量已超过100万公里。与每年上亿公里的G.652.D光纤相比,这仍然是一个细分的应用。与普通超低衰减光纤类似,大有效面积超低衰减光纤能否大规模应用于陆上大容量、超长距离传输,仍然取决于制造技术的突破和成本的降低,取决于整个传输系统的性价比能否得到大幅改善。

2.4 多芯、少模光纤等新概念光纤是中长期研究方向

由于香农极限限制了单根光纤的传输容量(100 Tb/s),为了解决未来通信网扩容的压力,研究人员做了很多探索。这些探索研究包括少模光纤和多芯光纤等新型光纤以及采用这些新光纤做的传输实验。例如:Fatih Yaman等人^[20]在2010年报道成功实现了总容量为 $10 \times 112 \text{ Gb/s}$ 信号在 5032 km 的少模光纤中的传输实验。少模光纤的精确剖面设计,可使同一根光纤支持多个不同的模式复

用传输,进一步扩大了通信复用的维度,提升了传输的带宽。少模光纤的优点是光纤设计理论完善、工艺技术成熟和制备技术可行。Jun Sakaguchi等人在2012年OFC会议上报道了世

界上最大容量的传输实验结果^[21],在一根 10.1 km 的19芯光纤里面传输了 305 Tb/s 的信号,实现的频谱效率高达 30.5 b/s/Hz 。多芯光纤被认为是最有希望在未来突破光纤香农极限的光传输网扩容技术。多芯光纤领域的研究集中在日本。日本光纤厂商和大学在光纤设计、制造、测试和传输实验方面的研究比较深入,同时打破了单根光纤传输容量的世界纪录。他们的研究开创了光纤通信扩容的一种技术路线。但是,多芯光纤的接续存在难度,缺乏媲美单模光纤熔接范式的低成本的自动化解决方案。光放大、耦合等多方面的问题也有待一一解决。因此国际通信业界也有质疑的声音表示多芯光纤不如多根光纤在使用方面的简单、便捷。

这些新概念光纤在探索解决未来传输技术“瓶颈”方面做出了有益探索,但是研究还停留在实验室阶段,还没有研究工程化方面的课题,还需要光纤厂商、器件厂商、系统设备厂商等多方努力。

3 结束语

虽然多种光纤都可以实现超高速率、超大容量、超长距离的传输,但是光纤通信网的建设还是要根据实际需求出发,选择合适的光纤链路方案。从普适性方面看,G.652.D光纤可适应从 40 G 到 100 G 、甚至 1 Tb/s 的建设,且G.652.D具有成本优势。从对传输性能提升方面看,超低损耗和

大有效面积光纤可应用于大跨段、超长距离通信网以及海底光缆的建设。但是目前超低损耗光纤技术突破难,供应少,成本高,应用还很少;对系统传输带来的益处也还有待在实际传输链路中进行更系统性的研究。多芯光纤和少模光纤从空分复用的维度将进一步提高光纤通信的容量,但是这一技术能否从实验室研究走向规模应用,还需等待光纤通信行业从技术、需求和现实出发做大量的研究和探索。中国光纤厂商、器件厂商、系统设备制造商和运营商需要在未来的光纤通信技术研究上加强合作,突破关键技术,拥有自主知识产权,制订国家标准,形成全产业链良性互动与发展。

参考文献

- [1] ELLIS A D, ZHAO J, COTTER D. Approaching the non-linear Shannon limit [J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(4):423-433.
- [2] YU J J, DONG Z, CHIEN H C. Field trial Nyquist-WDM transmission of 8 x 216.4Gb/s PDM-CSRZ-QPSK exceeding 4b/s/Hz spectral efficiency [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5D.3.
- [3] XIA T J, WELLBROCK G A, HUANG Y K, et al. 21.7 Tb/s field trial with 22 DP-8QAM/QPSK optical super channels over 1,503-km of installed SSMF [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5D.6.
- [4] RAHN J, KUMAR S, MITCHELL M, et al. 250 Gb/s real-time PIC - based super channel transmission over a gridless 6000 km terrestrial link [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5D.5.
- [5] 黄俊华, 林光, 周峰, 等. 首条采用超低损耗光纤的超低衰减 OPGW [J]. 电力系统通信, 2010, 31(10):6-11.
- [6] IDLER W, BIGO S. Design of 40 Gb/s-based multi-terab/s ultra-DWDM systems [J]. IEICE Transactions on Communications, 2002, E85-B(2):94-402.
- [7] GROSZ D F, KUNG A, MAYWAD D N, et al. Demonstration of all-Raman ultra-wideband transmission of 1.28 Tb/s (128 x 10 Gb/s) over 4000 km of NZ-DSF with large BER margins [C]//Proceedings of the 27th European Conference on Optical Communication (ECOC '01), Sep 30 - Oct 4, 2001, Amsterdam, Netherlands. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001:72-73.
- [8] GUAN P Y, HANSEN MULVAD H C, TOMIYAMA Y, et al. 1.28 Tb/s/channel single-polarization DQPSK transmission over 525 km using ultrafast time-domain optical Fourier transformation [C]//Proceedings of the 36th European Conference on Optical Communication (ECOC '10), Sep 19-23, 2010, Turin, Italy. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: We.6.c.3.
- [9] DOWNIE J D, HURLEY J, PIKULA D, et al. Ultra-long-haul 112 Gb/s PM-QPSK transmission systems using longer spans and Raman amplification [J]. Optics Express, 2012, 20(9):10353-10358.
- [10] LIU X, CHANDRASEKHAR S, WINZER P J. 3 x 485-Gb/s WDM transmission over 4800 km of ULAF and 12 x 100-GHz WSSs using CO-OFDM and single coherent detection with 80-GS/s ADCs [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '11), Mar 6-11, 2011, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: JThA37.
- [11] MA Y R, YANG Q, TANG Y, et al. 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission over 600-km SSMF fiber with subwavelength bandwidth access [J]. Optics Express, 2009, 17(11):9421-9427.
- [12] OMIYA T, TOYODA K, YOSHIDA M, et al. 400 Gb/s frequency-division-multiplexed and polarization-multiplexed 256 QAM-OFDM transmission over 400 km with a spectral efficiency of 14 b/s/Hz [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OM2A.7.
- [13] KOBAYASHI T, SANO A, MATSUURA A, et al. High-order QAM transmission for spectrally-efficient and high-capacity transport [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OM2A.3.
- [14] RAYBON G, WINZER P J, ADAMIECKI A A, et al. 8 x 320-Gb/s transmission over 5600 km using All-ETDM 80-Gbaud polarization multiplexed QPSK transmitter and coherent receiver [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OTu2A.1.
- [15] ZHANG S L, MATEO E, XU L, et al. 100G upgrade over legacy submarine dispersion-managed fiber link using fiber nonlinearity compensation and maximum likelihood sequence estimation [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OTu2A.4.
- [16] BOUSSELET P, MONGARDIEN D, ETIENNE S, et al. 64 x 43 Gb/s unrepeatable transmission over 468 km using PDM-RZ BPSK with 33 GHz spacing [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OTu2A.5.
- [17] HUANG M F, QIAN D Y, ZHANG S L, et al. Over 4,200km WDM transmission of 80-Gb/s PDM-OFDM-16QAM signals with 12.5-GHz channel spacing employing EDFA only amplification [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: OTu2A.2.
- [18] ZHANG G, NELSON L E, PAN Y, et al. 3760 km, 100G SSMF transmission over commercial terrestrial DWDM ROADM systems using SD-FEC [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5D.4.
- [19] NAGAYAMA K, KAKUI M, MATSUI M, et al. Ultra-low-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance [J]. Electronics Letters, 2002, 38(20):1168-1169.
- [20] YAMAN F, BAI N, HUANG Y K, et al. 10 x 112Gb/s PDM-QPSK transmission over 5032 km in few-mode fibers [J]. Optics Express, 2010, 18(20):21342-21349.
- [21] SAKAGUCHI J, PUTTNAM B J, KLAUS W, et al. 19-core fiber transmission of 19 x 100x172-Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305Tb/s [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5C.1.

作者简介



成煜, 武汉理工大学博士毕业; 现工作于长飞光纤光缆有限公司; 研究领域包括通信光纤, 光纤激光器和特种光纤等; 已参与基金项目3项。



杨晨, 华中科技大学毕业; 长飞光纤光缆有限公司研发中心工程师; 长期从事通信光纤的研发工作; 已主持或参与了科研项目3项。



罗杰, 北京邮电大学博士毕业; 长飞光纤光缆有限公司技术总监; 长期从事光纤的研发工作。

软件定义光网络技术与应用

Software-Defined Optical Network Technologies and Applications

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0017-004

摘要: 采用软件驱动的光路传输调节、软件编程的光路灵活交换、软件扩展的光路自动联网等关键技术, 软件定义光网络可以满足对网元节点传输能力的灵活配置以及对业务带宽按需调度的要求, 能够实现异构网络的统一控制、网络资源的虚拟化提供、面向数据中心的高效互联等应用, 是支撑下一代光网络向高度智能化方向发展的重要方案。

关键词: 光网络; 软件定义; 传输; 交换; 联网

Abstract: With software-adjusted lightpath transmission, software-programmed lightpath switching, and software-scaled lightpath networking, a software-defined optical network can flexibly change transmission for optical network elements and on-demand allocation of service bandwidth. This is especially important for unified control over heterogeneous networks, virtualized resource provisioning, and datacenter networking. Software-defined optical networking is becoming an important way of heightening the intelligence of optical networks.

Key words: optical networks; software defined; transmission; switching; networking

张杰/ZHANG Jie

赵永利/ZHAO Yongli

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)
(State Key Lab of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

灵活和效率低下的缺点, 难以满足未来大带宽、高突发的分组数据传送要求。灵活栅格技术的出现, 使得光网络中频谱资源走出了固定分配模式, 向按需带宽的弹性切片化方向发展。如何实现对频谱资源的利用能够像在时间域上的处理那样灵活, 成为亟待解决的技术挑战。本文将这类需求统称为频谱工程问题。

(2) 业务工程

以ASON/GMPLS为代表的智能光网络解决方案, 其核心是交换自动化, 侧重于针对连接建拆处理过程的控制, 包括路由、信令、发现和链路资源管理等功能^[1]。然而, 连接并不等同于业务, 业务的完成还包含丰富的业务提供逻辑。云计算和数据中心应用的出现, 提出了虚拟化、可编程等新的挑战, 推动光网络由控制平面智能向业务处理智能方向发展。传统光网络存在“重控制、轻业务”的问题, 难以满足这一趋势要求, 如何围绕以业务智能化为核心构建网络控制功能, 迫切需要在机理上实现创新与突破。本文将这类需求统称为业务工程问题。

为了应对上述两项需求, 扩展现有ASON/GMPLS是一种可能的做法。

光纤通信在过去的几十年间飞速发展, 各种节点、系统和组网技术层出不穷, 单信道速率达到太比特每秒, 通信规模与容量获得了空前提升。作为中国最为重要的电信基础设施之一, 光网络在支撑社会信息化、宽带化建设方面起着举足轻重的作用。近年来, 由于人-机-物信息交互量与日俱增, 光网络的动态性和灵活性进一步增强, 传统自动交换光网络/通用多协议标签交换(ASON/GMPLS)架构已不能满足这一要求, 迫切需要探索新的智能光网络发展

途径。

随着光通信技术的革命性进展以及光网络承载业务功能的不断变化, 光网络的发展不再局限于简单的“刚性带宽管道”思维, 而是出现了波长柔性化、业务增值化的趋势与特征。本文借鉴网络中流量工程的概念, 提出了频谱工程和业务工程两类需求挑战。

(1) 频谱工程

流量工程是网络研究的一项重要内容, 可以解决将分组数据流高效率地映射到物理拓扑上的任务, 并且能够改善业务质量, 增强网络运行的效果和性能。流量工程主要描述的是针对时间域分组处理的策略和方法, 不涉及与频谱相关的内容。传统波分复用技术受到固定频谱间隔、固定调制格式等限制, 存在频谱利用不

收稿日期: 2013-03-25

网络出版时间: 2013-04-18

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011301); 国家重点基础研究发展(“973”)规划(2010CB328204); 国家自然科学基金(61271189、61201154)

由于需要引入业务感知、损伤分析、层域协同、资源虚拟等新的策略与规则,ASON/GMPLS控制“胖平面”化的趋势更加明显,由此导致网络控制功能越来越复杂。如果能够把将部分智能性进一步从控制平面中剥离出来,这样将有利于提高光网络的整体资源利用效率,并增强更为灵活的业务提供能力。

软件定义网络(SDN)的出现为解决以上难题提供了一种行之有效的实现方案。美国斯坦福大学于2007年率先提出并开发了SDN/OpenFlow交换结构模型,可通过开放的流表支持用户对网络功能行为进行控制,为支持互联网创新研究建立了实验途径^[1]。在InfoWorld于2011年11月公布的将影响未来10年的10项新技术中,SDN排名第二。SDN技术具有可编程能力的优点,能够很好地适应光网络统一、灵活、集成的控制需求。软件定义光网络的架构实现了由控制功能与传送功能的紧耦合到控制功能与运营功能的紧耦合、以连接过程为核心的闭合控制到以组网过程为核心的开放控制的模式转变,代表了未来光网络技术新的发展方向。

1 软件定义光网络关键技术

如上所述,SDN技术是对光网络智能化的延伸与增强,代表光网络的控制平面由单纯的交换智能向同时考虑传输智能、业务智能的综合方向发展。为了适应这一角色的变革,未来软件定义光网络需要攻克软件驱动的光路传输调节、软件编程的光路灵活交换、软件扩展的光路自动联网等3项关键技术。

1.1 软件驱动的光路传输调节技术

在传统ASON/GMPLS方案中,主要关注的是光路连接属性,即如何控制节点开关单元的状态,实现由源节点到宿节点之间端到端光路的智能建拆过程。其假设前提为“光通道的信号质量都是有保障的,所有链路和

信道都具有标准的传输特性”。该方案只是满足了光路连接性的动态需求,对物理属性的动态调整与控制没有给出具体的解决方式。换句话说,ASON/GMPLS控制平面只是控制了光层开关的动作,而不包括其他可性能调节的光传送系统设备。然而实际光网络中物理损伤决定了信号传输质量,在选路和资源分配过程中都不能忽略,损伤感知(IA)技术成为重要研究内容之一。

IA技术提出以后,人们开始更多关注光路自身的物理属性。在基于IA的选路和资源分配算法中,即使可以找到一条符合连接需要的光路系统,如果其物理损伤的积累已不能满足信号传输性能要求,同样该路由不能被网络所接受使用。可见,IA技术不仅需要解决当前光路选择的可能性问题(指在拓扑上能够找到合适的路径并分配可用资源),还要满足可行性的要求(指光路的物理损伤不影响到信号传输质量)。

随着软件定义光学的发展,光纤通信系统中的模块与器件性能具备了可调谐能力^[2]。光收发机的波长、输入输出功率、调制格式、信号速率、前向纠错码(FEC)类型选择等,以及光放大器的增益调整范围等参数都可以实现在线调节。光路已经发展成为物理性能可感知、可调节的动态系统。例如,我们可以根据需要改变光路的调制格式和编码列类型,以延长光信号的传输距离,或者减少占用的频谱资源。

1.2 软件编程的光路灵活交换技术

从业务需求上看,光网络应具备动态灵活地提供不同传输速率、不同带宽粒度的信号交换能力。波分复用系统中单波长40G、100G等传输接口已经不能满足当前路由器丰富的应用需要,支持子波长级别和超波长级别的交换能力成为实现多业务接入灵活性的迫切要求。传统基于固定波长间隔的可重构光分插复用

(ROADM)技术只能提供波长通道的调度处理,难以满足各类业务不同的通信速率和带宽需求。

波长间隔无关的可编程ROADM技术在全光交换过程中的应用打破了传统波长通道50GHz、100GHz的间隔划分,可支持全光汇聚与疏导,为实现高谱效率、速率灵活的光路配置和带宽管理提供了全新思路。发展软件编程的光路交换技术,满足灵活栅格分配的要求,提出大容量、多维度、多方向的全光分插复用节点方案,设计具备方向无关、波长无关、竞争无关和栅格无关等特征的高度可重构节点交换结构,并通过采用高性能的可编程光路选择滤波集成组件等技术,支持网状网中不同间隔和码型信号的灵活交换处理。

1.3 软件扩展的光路自动联网技术

由于互联网应用迅猛增长,不同带宽粒度和性能要求的业务类型加载到光网络上,通过虚拟化实现业务到网络层面的高效映射、承载与调度变得十分重要。业务的多样性和时变性要求传送网具有更加灵活的带宽接入能力,这就意味着未来传送网需要提供多种粒度的业务接口,并能够为高度动态化的业务需求分配相应资源。同时,网络的分层、分域在很大程度上解决了大规模光网络的可扩展性,但是多层多域光网络本身仍旧面临着一定的体系扩展性问题,即在时间或者空间上扩展后,如何保证端到端的业务性能,具体包括路由可达性、路径计算收敛时间、建路时间、生存性和资源利用率等方面的性能^[3]。当前的多层多域网络架构不能很好地解决网络扩展所带来的问题,亟须在新的体系架构上取得突破。

从基于网管的统一调度系统到基于分布式节点的智能控制平面,再到基于PCE的集中式路径计算服务,光网络的智能化经历了从集中到分布再到集中与分布结合的发展过程,面向软件扩展的光路自动联网技术

成为未来演进的重要方向。为了突破大规模组网过程中所面临的“组网控制复杂与资源利用低效”问题,光网络控制体系势必需要完成“封闭”到“开放”的根本性改变,形成以“开放式灵活控制”为核心特征的软件定义光网络,其主要功能在于依托网络单元的软件可编程特性,即根据用户和网络状态需求,利用可编程控制的器件、算法、策略、协议,定制内核可高度重构化的网络支撑系统,提供开放式的管理与业务适配接口,实现异构网络资源的归一化调度与业务应用的高质量保证。

2 SDN 标准化进程

目前,SDN的标准化工作还处于起步阶段,部分协议相对成熟,总体标准的研究还刚刚开始。从事SDN相关技术和协议研究的标准化组织主要是IETF/IRTF、ONF和ITU-T。

IETF早期有两个与SDN相关的工作组,分别是ForCES和ALTO工作组。2011年11月的第82届台北会议上单独设立了SDN BoF工作组,讨论相关研究成果和发展方向。提出了若干标准草案^[5-9],主要针对软件定义网络的基本架构和异构网络集成控制机制等,包括软件定义网络控制与不同粒度应用以及异构传送平面的接口定义、软件定义组网与相关应用等。2012年IRTF中首次开设SDNP工作组,从不同角度进一步推进SDN标准化进程^[10]。

研究软件定义网络的另一个标准化组织是开放网络基金会(ONF)。ONF主导了网络操作系统和网络设备间的通信协议OpenFlow。OpenFlow是业界公认的主要SDN协议,目前已经发布了1.3版本。2012年11月,ONF研讨会上^[11]从节点单元、光层交换、控制组网等不同角度对软件定义网络展开讨论。在物理层面上,提出了可灵活实现调制格式控制、速率调整以及OSNR等物理损伤补偿的软件定义架构;在光

器件层面上,实现了可调整光路带宽和调制格式、FEC类型以及输出告警的软件定义光收发机,完成了可编程波长范围、输出功率和告警类型的可变增益放大器,讨论了可软件定义端口数量配置、波长范围和插入损耗的波长选择开关和光交叉连接器;在控制组网层面上,包括可编程控制网元配置与自动发现,网元状态检测、虚拓扑设计与重构,以及建拆光路与网络保护与恢复等重要的管控功能。由此看出,SDN技术对光网络中的应用越来越受到重视。在SDN主要协议OpenFlow架构中,为了满足光网络控制的需要,也在最新版本协议匹配域中加入了与光传输相关的参数。

ITU-T在SG13组设立了SDN的研究任务,相关工作在WP5组Q21研究。目前成立了两个项目Y.FNsdn-fm和Y.FNsdn,分别面向SDN的需求和框架。

3 SDN 在光网络中的应用

软件定义光网络技术是满足下一代光网络高度智能化要求的重要解决方案,具有广阔的应用前景。

3.1 异构网络的统一控制

随着融合网络技术的发展,不同类型的业务和网络资源交织叠加在一起,形成了异构化的网络互联环境,加剧了全网业务控制与资源管理的实现难度。软件定义光网络方案能够有效地解决异构网络之间的互联互通问题。通过对OpenFlow等相关协议进行扩展,开发面向对象的交互控制接口,可以实现异构网络信息抽象化和跨层网络控制集成化,从而在接入网与核心网、数据网与光网络、有线网和无线网之间建立起具备统一控制能力的新型异构网络架构体系。

3.2 网络资源的虚拟化提供

网络资源的虚拟化提供技术可以更好地发挥网络基础设施资源的

优势,通过开放的统一资源管理平台,使得对网络资源的利用达到最优化。基于虚拟化的网络体系结构,能够根据不同业务各自的应用需求,在保证服务质量前提下快速有效地接入与控制网络资源。借助SDN技术思想,各个设备厂商通过开发支持OpenFlow协议的通用化接口,为上层网络提供统一开放的控制操作功能,网络控制器将不同类型设备通过抽象算法和策略进行虚拟化处理,支持全网资源信息统筹和策略调度。当用户请求到来后,通过虚拟化的资源调度实现按需分配和实时管理。

3.3 面向数据中心的高效互联

云服务是未来互联网服务的主流模式,而云服务数据中心通过通信网络将数量众多的服务器和存储设备进行互联,并实现它们之间的高效协同工作,从而提供海量信息数据的存储和高性能处理,成为实现云服务的信息基础设施。运营商采用城域网或骨干网组成数据中心间互联架构实现城市内部或城市之间的数据信息高速互联。但这些连接的成本十分高价格昂贵,连接的资源没有得到充分的利用,不同颗粒度的用户带宽需求和时隙分配没有实现灵活调度。这使得数据中心之间光互联成为巨大挑战。如数据中心间的数据定期备份时需要额外的带宽传输,但是在其他时间大量的带宽就会被浪费。因此,需要通过软件定义方式实现数据中心之间带宽的动态调整和灵活调度。在软件定义的数据中心间互联架构中,运营商将数据中心内部资源统一管理(如计算资源、存储资源等),再根据网络中资源状态和业务粒度,将数据中心资源与网络带宽资源统一分配,实现实时调度和可编程化控制。

4 结束语

软件定义光网络需要攻克软件驱动的光路传输调节、软件编程的光

路灵活交换、软件扩展的光路自动联网等3项关键技术,可以实现不同带宽要求业务定制,完成光网络设备配置、调制格式适配和带宽灵活分配,达到光层资源虚拟化与按需提供。随着软定义光网络标准化程度的提升和产业界的持续投入,其势必会给未来光网络的发展注入一剂“强心剂”。

参考文献

- [1] 张杰, 徐云斌, 宋鸿升, 等. 自动交换光网络ASON [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [2] Open Flow News [EB/OL]. [2012-03-25]. <http://www.openflow.org/>.
- [3] FREUDE W, SCHMOGROW R, NEBENDAH B, et al. Software-defined optical transmission [C]//Proceedings of the 13th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON'11), Jun 26-30, 2011, Stockholm, Sweden. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 4p.
- [4] ZHAO Y L, ZHANG J, ZHANG M, et al. Intelligent networking technology and experimental demonstration of large-scale heterogeneous optical networks [J]. China Communications, 2011, 8(7): 12-20.
- [5] NADEAU T, PAN P. Framework for Software Defined Networks [R]. IETF. draft-nadeau-sdn-framework-01. 2011.
- [6] STILIADIS D, BALUS F, HENDERICKX W, et al. Software driven networks: Use cases and framework [R]. IETF. draft-stiliadis-sdn-framework-use-cases-01. 2011.
- [7] STILIADIS D, BALUS F, HENDERICKX W, et al. Software driven networks: Use cases and framework [R]. IETF. draft-stiliadis-sdn-framework-use-cases-01.txt. 2011.
- [8] TOVAR A, CONTRERAS L M, LANDI G, et al. Path computation requirements for cross-stratum-optimization [R]. IETF. draft-tovar-cso-path-computation-requirements-00. 2011.
- [9] CONTRERAS L M, TOVAR A, LANDI G, et al. Architecture for service provisioning with cross stratum optimization [R]. IETF. draft-contreras-cso-functional-architecture-00. 2011.
- [10] Internet Research Task Force (IRTF) [EB/OL]. [2012-07-12]. <http://irtf.org/sdnrg>.
- [11] Open Networking Foundation [EB/OL]. [2012-03-22]. <https://www.opennetworking.org/>.

作者简介



张杰, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院教授、副院长; 主要研究领域为光网络体系结构、控制管理和协议标准; 已主持基金项目6项, 获得2项国家技术发明奖; 已出版著作8部, 发表学术论文300余篇, 其中被SCI/EI检索200余篇。



赵永利, 北京邮电大学信息光子学与光通信研究院讲师; 主要研究领域为智能宽带网和网络资源虚拟化等; 已主持和参加基金项目5项, 获得中国通信学会科学技术一等奖和教育部科技进步二等奖各1次; 已出版著作1部, 发表学术论文140篇, 其中被SCI/EI检索125篇。

←上接第11页

- soft-decision LDPC coding and nonlinearity compensation [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: PDP5C.4
- [8] URATA R, LAM C, LIU H, et al. High performance, low cost, colorless ONU for WDM-PON [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC'12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: NTH3E.
 - [9] HENRY C H. Theory of the linewidth of semiconductor laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(2): 259-264.
 - [10] OKAI M, SUZUKI M, TANIWATARI T. Strained multiquantum-well corrugation-pitch-modulated distributed feedback laser with ultranarrow (3.6 kHz) spectral linewidth [J]. Electronics Letters, 1993, 29(19): 1696-1697.
 - [11] JAYARAMAN V, CHUANG Z M, COLDREN L A. Theory, design, and performance of extended tuning range semiconductor laser with sampled gratings [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1824-1834.
 - [12] LARSON M C, AKULOVA Y A, COLDREN C, et al. High performance widely tunable SGDBR laser [R]. SPIE Photonics West, Paper 4995-13. 2003.
 - [13] MAJEWSKI M L, BARTON J, COLDREN L A, et al. Directly intensity modulation in sampled grating DBR lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(6): 747-749.
 - [14] ISHII H, KANO F, TOHMORI Y, et al. Broad range (34 nm) quasi-continuous wavelength tuning in super structure grating DBR lasers [J]. Electronics Letters, 1994, 30(14): 1134-1135.
 - [15] WARD A J, ROBBINS D J, BUSICO G, et al. Modelling of phase gating-based wide band tunable lasers with simplified quasidigital wavelength selection [J]. IEEE Proceedings: Optoelectronics, 2003, 150(2): 199-204.
 - [16] ZHAO J, ZHOU N, CHAO Y, et al. Design and fabrication of tunable laser with digital concatenated grating [J]. Semiconductor Science and Technology, 2013, 28(3): 035001.
 - [17] IP E, KAHN J M, ANTHON D, et al. Linewidth measurements of MEMS-based tunable lasers for phase-locking applications [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(10): 2029-2031.
 - [18] Intel. Thermally tuned external cavity laser with micromachined silicon etalons: Design, process and reliability [C]//Proceedings of the 54th Electronic Components and Technology Conference (ECTC'04): Vol 1, Jun 1-4, 2004, Las Vegas, NV, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 818-823.
 - [19] SATO K, MIZUTANI K, SUDO S, et al. Wideband external cavity wavelength-tunable laser utilizing a liquid-crystal-based mirror and an intracavity etalon [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(8): 2226-2232.
 - [20] YOON K, OH S H, KIM K S, et al. 2.5-Gb/s hybridly-integrated tunable external cavity laser using a superluminescent diode and a polymer Bragg reflector [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5556-5561.
 - [21] ZHANG D, ZHAO J, YANG O, et al. Compact MEMS external cavity tunable laser with ultra-narrow linewidth for coherent detection [J]. Optics Express,

2012, 20(18): 19670-19682.

作者简介



赵建宜, 华中科技大学在读博士研究生, 主要从事集成光电子器件设计和制造方面的研究。



张玢, 华中科技大学博士毕业, 现工作于武汉光迅科技股份有限公司; 主要从事光集成器件设计和制造方面的研究。



刘文, 中国科技大学博士毕业、加拿大 McMaster 大学博士后; 曾任邮电部固体器件研究所总工程师, 武汉光迅科技股份有限公司总工程师, 现任武汉邮电科学研究院副总工程师, 并兼任华中科技大学博士生导师, 教育部“长江学者”特聘教授; 主要从事光通信器件、光和无线传感器件、微纳制造工艺的研究; 已发表学术论文60余篇, 获专利授权50余项, 包括10项美国专利。

相干光通信实时信号处理

Real-Time Digital Signal Processing for Coherent Optical Transmission System

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0021-004

摘要: 实时单载波相干光通信和实时相干光正交频分复用(OFDM)通信在处理方法 and 处理顺序上有所不同。实时相干光 OFDM 通信,接收端的信号处理首先在时域上进行,在时间同步之后便进行频偏估计,随后通过 FFT 变换之后转换到频域上再进行信道估计、相位噪声估计以及最终的信号检测;实时单载波相干光接收端的信号处理过程在时域上进行,首先进行的是信道估计,随后进行频偏估计。

关键词: 相干光通信系统;实时数字信号处理技术;单载波技术;频域正交复用技术

Abstract: The processing method and digital signal processing (DSP) order are different for coherent OFDM modulated systems and coherent-signal carrier systems. In the former, the received signal is first processed in time domain, time is synchronized, and frequency offset compensation is done. Fast Fourier Transform (FFT) changing is then done, and channel estimation, phase noise compensation, and final signal detection are done in the frequency domain. In contrast, DSP for a signal-carrier modulated system is commonly realized in the time domain, and frequency offset compensation follows channel estimation.

Keywords: coherent optical transmission system; real-time digital signal processing; single carrier; orthogonal frequency division multiplexing

肖潇/XIAO Xiao

杨奇/YANG Qi

杨铸/YANG Zhu

(武汉邮电科学研究院,湖北 武汉,430074)
(Wuhan Research Institute of Post & Telecommunication, Wuhan 430074, China)

相干光通信系统具有支持高阶数字调制解调,支持偏振复用等特点,并在接收端引入了数字信号处理(DSP)的均衡技术,能够实现高谱效率与长距离传输的光传输系统,因此被公认为是 100G 及以上级高速光通信系统的解决方案,并已成功应用于 100G 的商业系统中。目前相干光通信的理论和实验始于 20 世纪 80 年代,随着多年的算法研究与现场可编程门阵列(FPGA 技术)的发展,相干光通信进入实时系统的研究阶段,利用高速率模数变换器(ADC)配合

FPGA 搭建实时光相干系统电域处理部分是一种对其最有效率的研究方式。2006 年, T. Pfau 首次实现了单载波正交相移键控(QPSK)实时光通信的传输,前向纠错编码性能在 63 km 传输后达到 800 Mb/s^[1];同年, A. Leven 实现了单载波 QPSK 4.4 Gb/s 实时光通信的传输实验^[2]。2007 年, T. Pfau 采用偏振复用方式实现单载波 QPSK 2.8 Gb/s 实时光通信传输^[3]; A. Leven 等人于同年通过使用常数模算法(CMA)以及偏振复用等方式首次实现 10 Gb/s 级的单载波实时光通信实验^[4]。2008 年, Sun 等人首次实现了 40 Gb/s 单载波 QPSK 的实时光传输实验^[5]。相对单载波系统,实时正交频分复用(OFDM)系统的研究相对落后, S. Chen 于 2009 年实现首个 OFDM

系统实时光通信^[6],采用 QPSK 调制和 16QAM 调制的传输速率分别达到 1.55 Gb/s 和 3.1 Gb/s;同时, Q. Yang 等人实现了 54 Gb/s 多频段 OFDM 相干光通信实验^[7]。2009 年, F. Buchali 提出了 12.1 Gb/s 实时相干光 OFDM 发送装置^[8],并成功应用于 109 Gb/s 400 km 的传输实验中。2011 年, X. Xiao 等人实现了 10.5 Gb/s 相干光 OFDM 实时发送及接收装置^[9], N. Kaneda 等人实现了 28.6 Gb/s 偏振复用相干光 OFDM 传输的实时接收器^[10]; T. Pfau 等人实现了 40 Gb/s 偏振复用 16QAM 内差相干接收机^[11]。图 1 给出了研究领域相干光实时通信单通道上传输速率的逐年发展情况。

1 实时信号处理面临的挑战

双偏振相干光接收系统如图 2 所示。典型的双偏振相干光接收电域处理芯片由 4 块高速 ADC 及一块数字信号处理单元(DSPU)构成。对于超 100G 的高速光通信系统,ADC 的采样率通常需要达到 64 Gs/s 以上,而当前数字芯片的处理速度仅仅在数百兆赫兹。因此, DSPU 无法以与 ADC 同样的时钟来进行数字信号处理,为了完成如此高数据流量的数字信号处理工作, ADC 之后必须将串行

收稿日期: 2013-02-25

网络出版时间: 2013-04-21

基金项目: 国家重点基础研究发展(“973”)规划(2010CB328300); 国家高新技术研究发展(“863”)计划(2013AA014101)

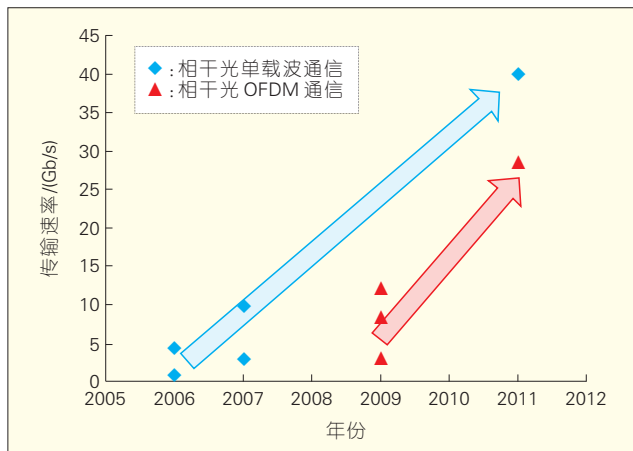


图1 相干光实时通信的发展

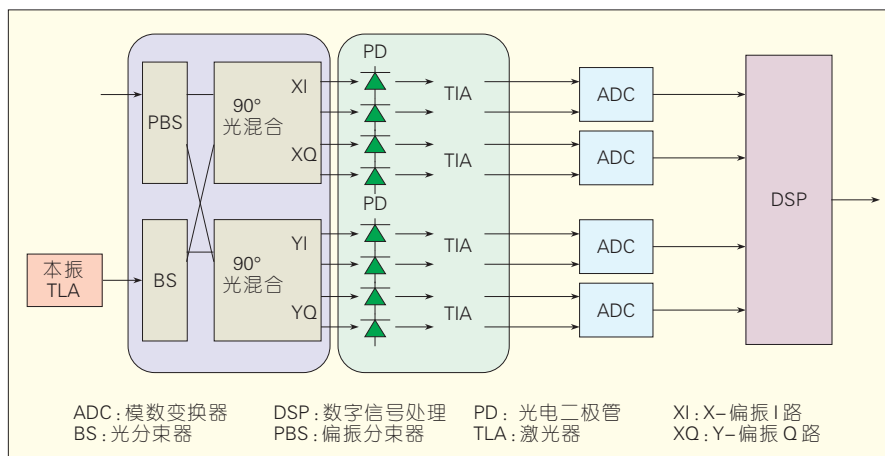


图2 双偏振相干光接收

的高速采样数字信号转换为 N 个并行通道以便DSPU进行后续处理工作。例如对100G信号处理模块来说,ADC的采样速度在64GHz,而数字芯片处理的速度仅为250MHz,换言之,DSPU需要同时处理 256×4 路并行的数字信号。如此多的并行通道会给DSPU的设计带来两个问题:

(1) 算法的并行化设计

在DSPU算法设计中,必须考虑算法是否能够支持并行通道的处理模式,因为并非所有的算法都支持并行化处理。最典型的就是数字处理中经常使用到的无限冲击响应(IIR)滤波器,由于IIR滤波器必须使用到前一个时钟的输出作为其一个输入端口,而并行结构打乱了IIR滤波器所需的串行结构,因此在并行结构中IIR滤波器结构是无法实现的。对于

带反馈结构的算法,如相干光单载波系统(CO-SC)中解偏振复用广泛采用的基于CMA的自适应滤波器结构,在并行结构中其示波器参数的更新速度会由于并行通道数量的增加而变慢,从而影响到对偏振状态追踪的速度^[12]。因此,在高速相干光通信DSPU的设计中,算法并行化设计是一个巨大的挑战。在这里,必须要指出的是:在CO-OFDM系统中,由于其采用的是频域上基于训练序列的迫零均衡(ZF)算法,其本身就是并行性结构算法且不含带反馈的结构,因此,在超高速CO-OFDM系统中,其算法的并行化设计要比相干单载波系统更容易实现^[13]。

(2) 并行系统的硬件资源使用效率优化

在 N 路的并行系统中,同样的数

字处理模块往往需要在 N 路并行系统中同时用到,其资源消耗远远大于单路的串行系统。庞大的硬件资源消耗不仅带来了芯片设计布线的难度,也使得其成本与能耗大大增大,因此在并行系统中必须在保证性能的前提下尽可能的优化DSPU的硬件资源。比如在相移键控(PSK)以调整格式的系统使用坐标旋转数字计算方法(CORDIC)将数字信号转换为角度替代复数,这样虽然增加了一个数字处理模块,然后之后的乘法运算就可以转换为简单的加减法运算而减少资源消耗。

除了上述由并行通道带来的问题外,实时DSPU设计还必须考虑到数字信号处理位宽对系统性能及系统功耗的影响。在相干光系统实时数字信号处理中,均采用整形数制对数字信号进行处理^[14],而整形数制运算的一个重要特点是所需位宽会随着运算过程随之增加。例如对两个5比特的整形数据进行加减法运算,为了避免溢出带来的错误,其结果必须用6比特来表示。相干光系统的数字处理部分是由许多复杂的运算单元组成的,若不在运算过程中进行位宽限制,其位宽的迅速增长会使得硬件资源的消耗迅速增加;同时,过度的限制位宽必然会带来部分运算结果的溢出而导致系统整体性能的下降。因此,实时DSPU必须同时考虑硬件资源消耗与系统性能从而计算出每一部运算过程合适的位宽。

2 实时相干光通信的信号处理

对于实时单载波相干光通信和实时相干光OFDM通信,在接收端的信号处理过程中都需要进行采样、信道估计、频偏估计、相位噪声估计等操作,但两者在处理方法和处理顺序上却有所不同。相比于单载波的信号处理过程,相干光OFDM的信号处理有额外的处理步骤:时间同步、去掉循环前缀、快速傅里叶变换(FFT)

等。对于实时相干光 OFDM 通信,接收端的信号处理首先在时域上进行,在时间同步之后便进行频偏估计,随后通过 FFT 变换之后转换到频域上再进行信道估计、相位噪声估计以及最终的信号检测;而实时单载波相干光接收端的信号处理过程则全是在时域上进行的,首先进行的是信道估计,随后才进行频偏估计。可见,两者的信号处理过程及算法均有所区别,下面就两者的信号处理过程分别进行详细介绍。

2.1 实时 CO-OFDM 信号处理

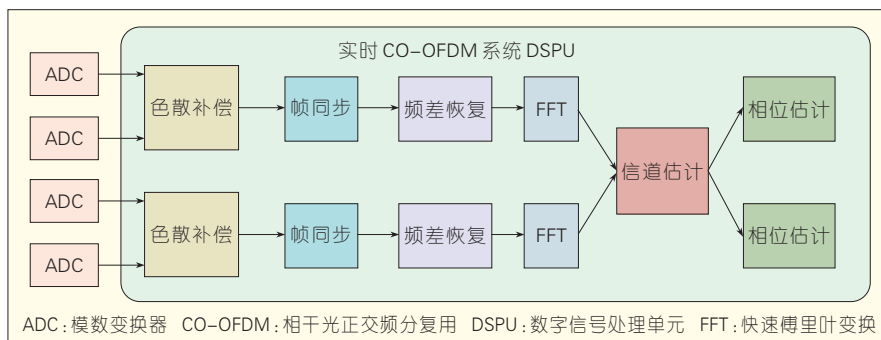
图 3 所示为一个双偏振相干光正交频分复用(CO-OFDM)系统 DSPU 的结构图,其包括以下数字处理模块:帧同步、频差估计与纠正、FFT、信道估计、相位噪声估计。

(1) 帧同步模块

由于 CO-OFDM 系统是以 FFT 符号为单位进行数据处理,因此 CO-OFDM 系统往往会引入帧结构。帧同步有多种方法来实现,比较常见的有 Schmidl 算法,Min 算法以及 Park 算法。这 3 种算法各有其特点,然而究其根本都是使用到了相邻相同符号间自相关运算来确定 OFDM 帧的起始位置。自相关运算在串行系统中可以简单的使用待反馈结构的递归算法来实现,然而在并行系统中,该递归算法不再适用,而若采用直接算法来实现,随着并行通道数量的增加,其硬件资源消耗将会非常的巨大。在文献[9]中使用了一种特殊结构的帧头来简化并行结构下帧同步复杂度;文献[12]提出了一种适用于并行通道自相关运算的递归算法以减少硬件资源消耗。

(2) 频差估计与纠正

在相干光通信中,发送端激光源与接收端激光源会存在频差从而导致接收信号再频域上出现偏移而影响 OFDM 子载波间的正交性。因此,在接收端 DSPU 必须对频差进行估计与补偿。一种广泛使用的频差估计



▲ 图 3 双偏振 CO-OFDM 系统 DSPU 结构图

方式使用了帧同步中的帧头进行估计,然而该方法仅能纠正 1 个 OFDM 子载波频率大小范围内的频差,相对于激光器的频差远远不够。在文献[15]中介绍了一种适用于相干光 OFDM 通信能够估计更大范围频差的方法。由于估计出的频差必须由复数形式转换为角度形式以便构建下变频所需的正余弦信号,在实时 OFDM 的 DSPU 设计中往往使用 CORDIC 算法来完成该步骤以节约硬件资源。频差估计之后必须进行对信号下变频运算以纠正频差。在并行系统中需要构建与并行通道数量相等的正余弦信号与下变频复数乘法器以实现信号的处理,该步骤不仅需要数目庞大的硬件资源,且正余弦信号的位宽与下变频后结果的位宽对系统的性能影响极大。因此,很多实时 OFDM 实验均采用了发送接收同光源的结构来避免频差模块,只有少量的实时 OFDM 实验加入了频差估计的模块。在文献[16]中一种自相关光 OFDM 的结构被提出并实现了 240 Gb/s 的多通道实时 OFDM 传输实验。

(3) FFT 模块

在实时 OFDM 实验中,有两种方式实现 FFT 模块,一种是全并行输入输出的 FFT 模块,另一种是串行入串行出的 FFT 模块。第一种方法虽然需要大量的乘法器资源然而其与并行结构的契合度较好且不需要更多的控制单元。第二种方法只需要少量的乘法器,然而其需要一个储存器

来进行串并转换,所需储存器的大小随着并行通道数量的平方线性增加。因此,在 FFT 模块结构的选择上必须结合并行通道数量多少以选择更适合的结构。除此之外,FFT 内旋转因子与输出结果的位宽也必须仔细考量以满足系统性能要求。

(4) 信道估计模块

在 CO-OFDM 系统中,信道估计往往是基于训练序列在频域上对信道响应进行计算。在双偏振 CO-OFDM 系统中,需要使用 2×2 个训练序列同时完成解偏振与信道估计的工作。由于 OFDM 信号是基于 FFT 长度的周期性信号,其信道均衡可以很简单的在频域上用 ZF 算法来实现,并且只需要一个复数乘法器,这种结构使得 CO-OFDM 系统的信道估计模块能够很好的适应高速系统中的多通道并行结构。必须指出的是:与单载波系统所采用的基于 CMA 的多拍自适应滤波器结构相比,CO-OFDM 在高速并行通道信道估计模块上的结构要简单的多。

(5) 相位噪声估计模块

由于激光器的相位噪声以及频偏估计中的残余误差,在信道估计之后,每一个 OFDM 符号的星座图相对原始的位置会产生一个整体的偏转,在 CO-OFDM 系统中,一种典型的做法是在每一个 OFDM 符号内选取一定数量的子载波加载已知的导频信号用于纠正这种相位偏移。同信道估计模块类似,由于相位噪声的纠正也仅需要一个复数乘法器,其 DSPU

的结构也很容易实现。相位噪声估计后的输出结果可以按照信道编码的需要输出软码或硬码至后续的解码模块进行最后的信息解调工作。

2.2 实时单载波信号处理

单载波 PSK/QAM 相干接收机的信号处理基本流程如图 4 所示, 经过模数转换后, 累计的信道色度色散需要被补偿, 接着需要进行偏振跟踪及信道均衡, 最后, 在判决电路前需要进行载波的相位恢复和频率恢复。

图 4 的信号处理流程中各部分的功能和算法具体描述如下:

(1) 色散补偿模块

对接收信号的均衡分两步进行: 首先分别在每个偏振支路上进行静态或者慢速的自适应均衡, 然后在两个偏振支路上进行联合的快速自适应均衡。第一个均衡器一般选择具有较长冲激响应, 以补偿准静态的色散或者光前端的频率响应。第二个均衡器一般选择较短的冲激响应和较快的自适应速率, 用以做偏振跟踪、偏振模色散(PMD)均衡、以及静态均衡器未补偿的剩余色散。

(2) 偏振跟踪及信道均衡模块

偏振跟踪用来补偿两个偏振通道之间的串扰。偏振跟踪通常需要使用两进两出的自适应滤波器来实现。一个自适应滤波器可分为 3 个部分: 滤波部分、误差估计部分和滤波系数的更新部分。滤波部分通常有较短的冲击响应, 由于它需要跟踪任意的偏振旋转, 滤波系数必须能快

速更新。第二步, 进行误差估计。误差估计的方法有很多, 如插入训练序列, 决策反馈; 或者测量已知信号的属性。前一种方法有良好的跟踪性能, 但需要在反馈环路中进行载波同步。后一种方法有更小的环路延迟, 可提供更快的跟踪速度, 如 CMA 算法^[7]。CMA 通过纠正信号的恒定幅值来均衡后信号的振幅的偏差, 可以很好的分开两个偏振通道, 不仅适用于 PSK 信号。也可以用于 QAM 信号, 但会带来噪声和收敛速度变慢的代价。第三步, 从误差估计的结果更新滤波系数。已知的算法如 Wiener-Hopf 方法, 最陡下降法。从实现的角度来说最实用的方法是 LMS 算法^[8]。LMS 算法的基本思想是通过求均方误差同滤波系数的导数来估算误差梯度。滤波系数则通过每次加上一个负误差梯度的比例项来更新。权重因子 μ 再用于控制滤波器的自适应速度以及滤波系数的剩余误差。

(3) 载波同步模块

载波同步即载波的频差校正和相差校正, 是任何基于数字信号处理的相干接收机都需要实现的部分。频差校正和相差校正概念上非常相似, 都包含误差估算, 对估算结果滤波, 数据恢复 3 部分。频率恢复的具体方法在文献[19]中提出。相位恢复通常包含两步: 首先, 去除调制信息得到一个瞬时的相位估计; 然后对相位估计进行滤波以去除噪声的影响。在大多数通信系统中, 调制信息

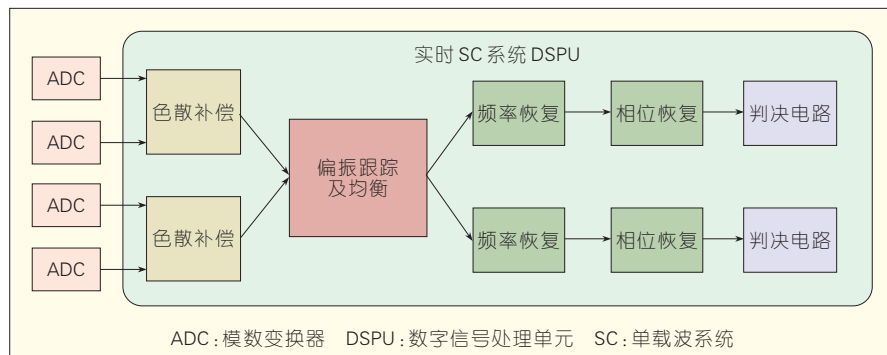
的去除采用直接判决法, 信号判决前后之差作为相位误差的瞬时估计值。但直接判决法通常用到反馈结构, 这对并行流水线和块处理的实现结构来说是一个挑战, 因为反馈时延会并行通道数量增加, 过多的并行通道会导致相位噪声容忍度的降低。而前项反馈技术不仅可用来改善其性能^[20], 也能够较容易的在块处理结构中实现。

3 结束语

相干光通信系统已成为 100G 和更高速率的超高速光通信系统的主要解决方案, 其最重要的核心技术就是接收机数字信号处理技术。本文首先对实时数字信号处理技术的发展现状进行了介绍; 随后就实时数字信号处理技术的难点及挑战进行了分析; 并分别对相干光通信系统中的两种主流调制格式(单载波及 OFDM)所采用的实时数字信号处理技术进行了描述。

参考文献

- [1] PFAU T, HOFFMANN S, PEVELING R, et al. First real-time data recovery for synchronous QPSK transmission with standard DFB lasers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(18):1907-1909.
- [2] LEVEN A, KANEDA N, KLEIN A, et al. Real-time implementation of 4.4 Gbit/s QPSK intradyne receiver using field programmable gate array [J]. Electronic Letters, 2006, 42(24):1421-1422.
- [3] PFAU T, PEVELING R, HAUDEN J, et al. Coherent digital polarization diversity receiver for real-time polarization-multiplexed QPSK transmission at 2.8 Gb/s [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(24):1988-1990.
- [4] LEVEN A, KANEDA N, CHEN Y. A real-time CMA-based 10 Gb/s polarization femultiplexing coherent receiver implemented in an FPGA [C]//Proceedings of the Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '08), Feb 24-28, 2008, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA:IEEE, 2008:OTuO2.
- [5] SUN H, WU K T, ROBERTS K. Real-time measurements of a 40 Gb/s coherent system [J]. Optics Express, 2008, 16(2):873-879.
- [6] CHEN S, YANG Q, MA Y, et al. Multi-gigabit real-time coherent optical OFDM receiver [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '09),



▲ 图 4 实时单载波相干光系统 DSPU 结构图

- Mar 24–26, 2009, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: OTuO4.
- [7] YANG Q, KANEDA N, LIU X, et al. Real-time coherent optical OFDM receiver at 2.5-GS/s for receiving a 54-Gb/s multi-band signal [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '09), Mar 24–26, 2009, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: PDP5.
- [8] BUCHALI F, DISCHLER R, KLEKAMP A, et al. Realisation of a real-time 12.1 Gb/s optical OFDM transmitter and its application in a 109 Gb/s transmission system with coherent reception [C]// Proceedings of the 35th European Conference on Optical Communication (ECOC '09), Sep 21–23, 2009, Vienna, Austria. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 2p.
- [9] XIAO X, BUCHALI F, BERHARD M, et al. Implementation of a 10.5 Gb/s real-time CO-OFDM Receiver [C]// Proceedings of the 16th Opto-electronics and Communications Conference (OECC '11), Jul 4–8, 2011, Kaohsiung, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 41–42.
- [10] KANEDA N, PFAU T, CORTESELLI S, et al. Real-time polarization division multiplexed coherent optical OFDM receiver at 9.83-Gs/s for 28.6-Gb/s single-band intradyne detection [C]// Proceedings of the 37th European Conference on Optical Communication (ECOC '11), Sep 18–22, 2011, Geneva, Switzerland. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 3p.
- [11] PFAU T, KANEDA N, CORTESELLI S, et al. Real-time FPGA-based intradyne coherent receiver for 40 Gbit/s polarization-multiplexed 16-QAM [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '11), Mar 6–11, 2011, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: OTuN4.
- [12] PFAU T, PEVELING R, HERATH V, et al. Towards real-time implementation of coherent optical communication [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '09), Mar 24–26, 2009, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: OthJ4.
- [13] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. Electronics Letters, 2006, 42(10): 587–589.
- [14] BUCHALI F, XIAO X, CHEN S, et al. Towards real-time CO-OFDM transceivers [C]// Proceedings of the Optical Fiber Communication/ National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '11), Mar 6–11, 2011, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: OWE1.
- [15] BUCHALI F, DISCHLER R, MAYROCK M, et al. Improved frequency offset correction in coherent optical OFDM systems [C]// Proceedings of the 34th European Conference on Optical Communication (ECOC '08), Sep 21–25, 2008, Brussels, Belgium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 2p.
- [16] XIAO X, ZENG T, YANG Q, et al. A 240 Gb/s self-coherent CO-OFDM transmission applying real-time reception over 48 KM SSMF [C]// Proceedings of the 2012 Photonics Global Conference (PGC '12), Dec 13–16, 2012, Singapore. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 3p.
- [17] JOHNSON R JR, SCHNITER P, ENDRES T J, et al. A blind equalization using the constant modulus criterion: A review [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(10): 1927–1950.
- [18] WIDROW B. Thinking about thinking: The discovery of the LMS algorithm [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(1): 100–106.
- [19] NOE R. Phase noise tolerant synchronous QPSK receiver concept with digital I&Q baseband processing [C]// Proceedings of the 9th Opto-electronics and Communications Conference (OECC '04), Jul 12–16, 2004, Yokohama, Japan. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 16C2–5.
- [20] PARHI K K, MESSERSCHMITT D G. Pipeline interleaving and parallelism in recursive digital filters I: Pipelining using scattered lookahead and decomposition [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1998, 37(7): 1099–1117.

作者简介



等;已发表论文10余篇。



发表论文40余篇。



肖潇,德国汉堡工业大学硕士毕业,德国纽伦堡—爱兰根大学博士毕业;2009—2012年工作于德国贝尔实验室高速传输部门,现工作于武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室;研究方向为相干光通信传输系统、实时相干光通信、光 OFDM

杨奇,华中科技大学硕士毕业,澳大利亚墨尔本大学博士毕业;2008—2009年工作于美国贝尔实验室,现为武汉邮电科学研究院光纤通信技术和网络国家重点实验室副主任;研究方向为光 OFDM;实时光通信、相干光通信、长距离传输、信号调制和前向纠错编码;已

杨杰,武汉邮电科学研究院副总工程师,光纤通信技术和网络国家重点实验室副主任,电信专业教授级高级工程师,中国通信学会会士;研究方向为光纤通信技术和光纤网络。

综合信息

TD-SCDMA 手机迎来爆发式增长 超低端智能手机环比增长 125%

进入 2013 年,随着 4G 脚步的临近,三大运营商、各终端厂商及移动互联网企业均抓紧布局以应对市场的变化。

2013 年第 1 季度,中国手机整体市场保持稳定增长态势,其中超低端智能手机(价格低于 600 元)零售量激增,价格战愈演愈烈。

2013 年第 1 季度,中国手机市场延续良好增长势头。捷孚凯(GfK 中国)全国零售推算数据显示:中国手机整体市场零售量为 9 089 万部,环比 2012 年第 4 季度增长 13%,同比 2012 年第 1 季度增长 27%,其中智能手

机零售量 7 547 万部,占整体市场 83%。2013 年第 1 季度整体市场零售额达 1 350 亿元,环比 2012 年第 4 季度增长 19%,同比 2012 年第 1 季度增长 44%。

值得关注的一点是:2013 年第 1 季度在整体市场保持稳定增长的同时,销售季节性因素逐步淡化。受春节因素影响,2 月为传统零售淡季,手机零售量会比 1 月有显著下滑,但 2013 年前 3 个月中国手机市场零售量保持平稳,2 月并未出现明显销量下滑,出现了“淡季不淡”的现象。

造成季节性的淡化主要的原因是线上市场的逐步崛起以及运营商市场的影响加大。近年来传统零售渠道受到来自在线市场和运营商市场的挤压。

ROADM 技术的应用

Applications of ROADM Technology

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0026-005

摘要: 对可重构光分插复用器(ROADM)设备在中国运营商网络中的应用提出组网方案:在城域/本地传送网中,ROADM采用层次化组网,提高设备方向数和CDC(波长无关、方向无关、竞争无关)能力,通过汇聚层设备分摊压力的方式减轻对核心层设备的维度要求;在骨干传送网中,ROADM设备组网根据情况,可采用局部ROADM子网与点到点波分复用(WDM)系统相结合、区域ROADM子网、全网ROADM组网等3种组网结构,为客户直接提供灵活的波道出租业务,为IP网波道提供灵活、低成本的动态恢复能力,在故障条件下为维护部门提供灵活的波道调度能力。

关键词: 波分复用;可重构光复用器;光复用器;光交叉连接;波长选择光开关;光传送网

Abstract: In this paper, we suggest some applications of reconfigurable optical add-drop multiplexer (ROADM) in China. In metro/local ROADM networks, hierarchical networking can be used to increase the number of devices and improve CDC capacity. Requirements on core-layer devices can be reduced through pressure allocation by convergence layer. Three application scenarios are proposed for backbone ROADM networks: 1) combining fragmented ROADM sub-networks and point-to-point wavelength division multiplexing (WDM) transmission systems; 2) ROADM sub-networks for each area, and 3) unified ROADM network for the whole network. With ROADM, operators can provide flexible wavelength leasing; dynamic, low-cost restoration capacity for wavelength paths carrying IP circuits; and quick wavelength path reconstruction when there are failures.

Key words: wavelength division multiplexing; reconfigurable optical add-drop multiplexer; optical add-drop multiplexer; optical cross-connect; wavelength selective switch; optical transport networks

李俊杰/Li Junjie

(中国电信股份有限公司 北京研究院, 北京, 100035)
(China Telecom Co. Ltd. Beijing Research Institute, Beijing 100035, China)

的成熟和单波速率的持续提高,单纯网络带宽从技术上已经没有了“瓶颈”,但是带宽的管理成为新的“瓶颈”所在:一方面波长通道数量的急剧增长引发网络运维部门提出针对波长的维护管理和调度等需求;另一方面随着电信业务的宽带化发展,其颗粒度也将不断提升,波长颗粒出租电路已经成为了一种新兴业务模式,凸显了对基于波长的调度、管理、保护恢复等方面的功能和性能要求。

在上述背景下,可重构光分插复用器(ROADM)设备应运而生并取得了长足的进步。据OVUM统计,北美地区销售的WDM设备(不含OA)35%以上采用了ROADM。但是在中国,ROADM尚不够普及。

1 ROADM 设备和技术

ROADM设备的全称翻译是可重构光分插复用器。顾名思义,其定义是光波分复用(WDM)系统中的一种具备在波长层面远程控制光信号分插复用状态能力的设备形态^[1]。早在2000年前后,全球对基于波长的光层上下路和调度设备进行了深入研究,中国“863”计划还专项资助了光交叉连接(OXC)和光分插复用(OADM)设备和关键技术的研究,研制样机并形成了一系列科研成果^[2-4]。

近年来电信业最显著的发展趋势是以语音为代表的传统电信业务的下降和以网络电视(IPTV)、OTT、三重播放、云计算、物联网等为代表的新型电信业务的兴起。这种变化对电信网络的影响可以归纳为如下几点:

(1)宽带化。近年来网络带宽持续以超摩尔定律速度高速增长。

(2)分组化。IP分组技术已经取代时分复用(TDM)技术成为电信网络新的架构和技术核心。

(3)动态化。快速响应业务的高度灵活性和不可预测性。

(4)低成本。业务收入的增长速度与带宽流量增长速度的剪刀差引发降低网络成本的压力。

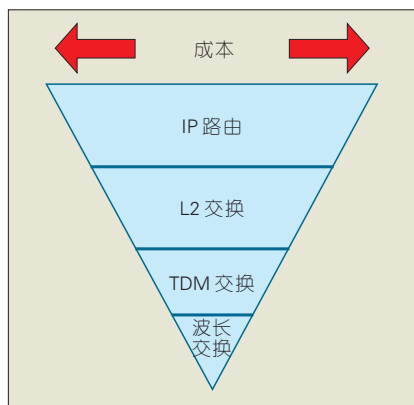
随着光纤波分复用(WDM)技术

收稿日期: 2013-03-06

网络出版时间: 2013-04-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011303)

ROADM 设备从名称上很容易被理解为 OADM 设备增加了可重构特性,但实际上目前 ROADM 设备不仅具 OADM 设备的全部功能,还兼备了 OXC 设备的部分功能。具体来讲,ROADM 设备支持波长通道上下路状态的灵活配置,多维 ROADM 设备还支持波长通道在各个维度(方向)之间灵活调度。相对于电信网络应用的其他交换或交叉连接技术相比,ROADM 提供的波长层面最大的优势是低成本、高效率,图 1 给出了各层网络交换技术的成本对比关系。



▲ 图 1 各层网络交换技术成本比较

ROADM 设备发展过程中出现了多种技术方案,其中比较有代表性的是波长阻隔器(WB)、平面波导(PLC)和波长选择光开关(WSS)等 3 种方案,其中 WSS 凭借其光学性能和可扩展性,已成为主流商用方案。

ROADM 设备的局限性也很明显,主要有如下几点:

(1) 波长连续性限制。由于没有商用的全光再生技术,光通道在 ROADM 网络中必须保持波长一致,除非中间节点采用光电光(OEO)再生方式进行波长转换。

(2) 波长唯一性限制。无论支持多少方向,对于某个特定波长,每个方向只能容纳来自一个方向(含本地)的该波长信号,否则需要进行波长转换。

(3) 传输距离和物理损耗限制。ROADM 的低成本优势来源于在波长

层面的全光调度,光信噪比(OSNR)、色散、偏振模色散(PMD)、非线性等各种物理损耗因素会逐渐累积,影响信号的传输距离。这种距离和物理限制在骨干传送网中尤其突出。波长和物理限制是 ROADM 光网络规划设计、电路调度复杂性的重要因素。

(4) 上下路端口灵活性受限。普通 ROADM 设备上下路波道的波长、端口和方向均不具备灵活性,目前业界已经出现不同程度解决该限制的新型 ROADM 设备,即所谓 CDC(波长无关、方向无关、竞争无关)ROADM。

(5) 调度颗粒的唯一性和粗放性。ROADM 设备调度的基本颗粒是波长,一方面精细度不够,无法实现更低维度的业务调度,一般采用结合 ROADM 技术和光传送网(OTN)电交叉技术的光电混合交叉设备,以弥补精细度的局限;另一方面为了适应未来光通道颗粒的灵活性,ROADM 设备已经开始支持灵活格栅(Flexi-Grid),即光通道的谱宽灵活可变(目前 ITU-T 定义的 Flexi-Grid 粒度为 12.5 GHz)。

与 SDH、OTN 电层组网一样,ROADM 光层组网同样可以增强智能控制平面功能。目前该领域的标准化工作在 IETF 通用控制和管理平面(CCAMP)工作组进行^[5]。CCAMP 将此类网络命名为波长交换光网络(WSON),主要通过对通用多协议标签交换(GMPLS)协议的扩展完成 WSON 的路由、信令等控制平面功能。此外,ITU-T SG15 Q6 在 WSON 物理限制因素方面也推进了一部分标准化工作^[6]。WSON 控制平面标准化工作进展比较缓慢,特别是物理损耗约束条件的一直无法找到合适的解决方案,成为主要“瓶颈”因素。

2 ROADM 设备的发展

2.1 CDC ROADM

ROADM 设备上下路端口在灵活性方面受到限制,这种限制在二维

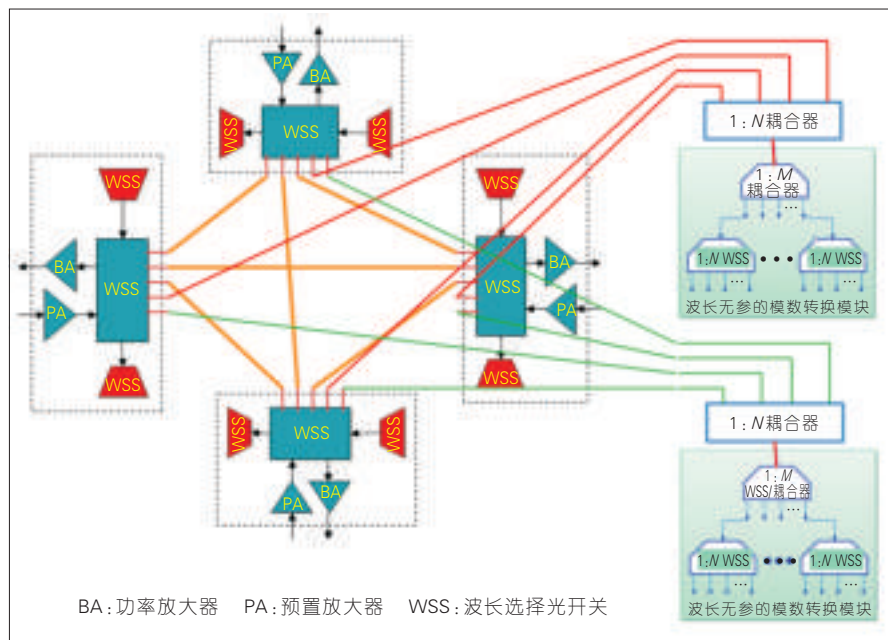
ROADM 设备应用中还不够突出,但是在多维 ROADM 设备组网时将会极大影响光层调度功能的发挥,体现在业务上下路节点和光电光(OEO)再生节点需要大量的人工干预,无法实现真正的端到端配置。

目前业界将增强上下路端口灵活性的 ROADM 设备统称为 CDC ROADM,C、D、C 3 个字母分别是波长无关、方向无关和竞争无关 3 个英文单字的首字母,即 CDC ROADM 能够提供的 3 种灵活性。

波长无关是最容易理解、也是最容易实现的一种灵活性。其实现需配置波长可调谐的上下路波长转换器(OTU)板卡和上下路滤波器,其中最常见的可调谐滤波器就是 WSS。目前常见 WSS,可支持 9 个波长无关上下路端口,同时也很容易通过级联方式进行扩展。但是为了改善性能,倾向于采用一级 WSS 实现上下路功能,目前商用 WSS 器件的最大维度已经扩展到 20~30 维,基本可满足 80 波 WDM 系统的上下路要求。在相干光通信时代,通过接收机本振光源的波长选择,可以选定特定的接收信号,因此在上下路波长数目较少的情况下,可以通过简单的分光器实现波长无关下路,降低设备成本,这是相干光通信带来的意外惊喜。

方向无关是实现光层调度,特别是保护恢复的基本要求。端到端保护恢复的基本前提是上下路波道支持在多维 ROADM 设备不同群路方向之间自动切换,否则还需要人工更换上下路端口,极大限制实用性。方向无关最常用的实现方式是通过分光器/耦合器使得多个方向共享上下路端口,如图 2 所示。

竞争无关是伴随方向无关而出现的一种新特性。目前商用 ROADM 设备通常采用扩展上下路端口的方式在方向无关基础上实现一定程度的竞争无关,图 2 中每个群路方向采用超出方向数的大维度 WSS,多余 WSS 端口用于上下路;其中所有方向



▲图2 ROADM设备方向无关、竞争无关上下路功能实现

各一个WSS上下路端口组成一个方向无关上下路端口组,在组内一个波长只能被一个方向使用;多个方向无关上下路端口组之间的波长可以复用,从而实现一定程度的方向无关。

综上所述,CDC ROADM扩展了ROADM设备上下路端口的灵活性,有利于实现光波道灵活调度能力的开放,极大地提高了业务开放过程中的自动化程度和效率,降低了人工干预的强度,提高了可靠性。但是CDC ROADM的实现需要增加大量新型光学器件,不仅带来ROADM设备成本的提高,而且也会增加光信号经过ROADM节点的性能劣化。因此在现网应用中需要根据实际业务需要,选择合理的设备形态。CDC ROADM设备的各种特性符合模块化设计原则,也为其灵活选择提供了条件。

2.2 灵活格栅 ROADM

灵活格栅(Flexi-Grid)是在高速大容量WDM技术发展过程中出现的一种提高频谱效率的新技术,适用于波长速率、调制方式多样化的WDM系统,而且具备灵活调整能力,是光网络适应软件定义网络(SDN)演进

的生动案例。ITU-T G.694.1定义了基本颗粒为12.5 GHz的灵活格栅^[7],领先元器件厂商也已推出可商用的支持灵活格栅的滤波器、WSS等元器件,标志着灵活格栅在技术上已经具备了实用条件。

灵活格栅技术给ROADM设备和组网应用均带来了新的挑战:首先需要WSS等关键元器件支持灵活格栅技术,这方面进展比较顺利,领先器件厂商已经具备了一定的供货能力;其次需要组网管理、控制平面等方面增加一系列新的属性,包括信号谱宽、速率以及对功率、OSNR、色散、PMD等物理参数的容限范围等等。

灵活格栅技术在100 Gb/s及以下速率的WDM系统中应用需求尚不迫切,目前灵活格栅ROADM设备还公开报道的商用案例。未来随着单波400 Gb/s、1 Tb/s超高速WDM系统的发展,灵活格栅WDM和ROADM技术和设备可能获得长足发展和应用。

3 ROADM设备在城域/本地传送网中的应用

本节主要探讨ROADM设备在城域/本地传送网中的应用场景和相应

的解决方案、设备形态。

近年来,城域/本地传送网WDM系统建设模式从早期的环网逐渐向网格网(Mesh)演进。同时随着业务的快速增长,WDM系统和波道数量持续上升,对自动化的波道配置和业务提供能力的需求也越来越迫切。上述因素为ROADM设备在城域网的应用提供了良好的外部条件。

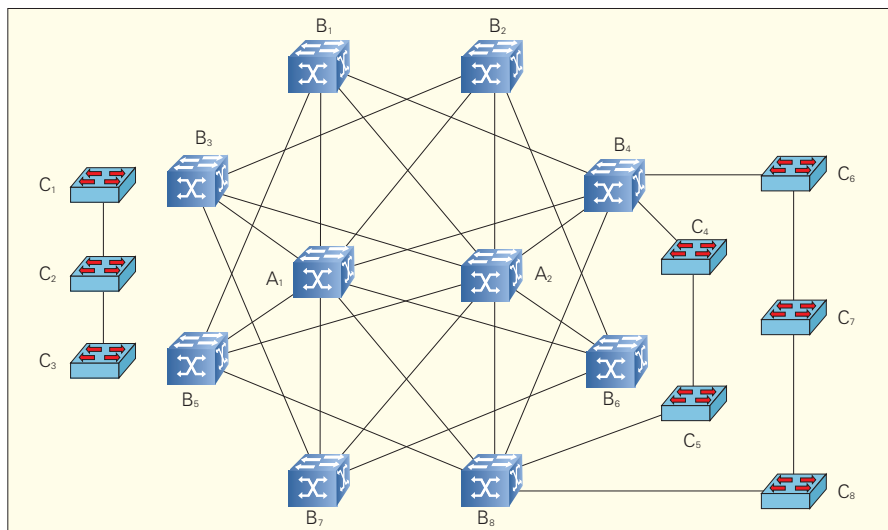
大型城域/本地传送网可以分成核心、汇聚和接入3层,中小型网络可能是两层。总体来讲,城域/本地ROADM网络的层次化结构是相当清晰的,如图3所示,A、B、C分别代表网络的核心层、汇聚层和接入层。

城域/本地ROADM网络的业务模式绝大多数都是汇聚型业务,即从接入/汇聚节点向核心节点集中;只有少数经济发达地区存在少量非核心节点之间的直达业务,主要是一些政企客户本地大带宽组网带来的出租电路。图3中,绝大多数业务都从B、C节点向A节点汇聚。这对核心ROADM设备带来的巨大的压力:

(1)维度的压力。由于早期城域网建设的惯性思维和城域光缆的实际拓扑的限制,汇聚层节点通常倾向于与核心层节点直连,造成对核心ROADM设备维度要求极高。

(2)上下路灵活性的压力。为了发挥Mesh组网带来的多方向调度优势,核心ROADM设备通常需要一定的CDC特性,特别是方向无关特性,同时核心ROADM设备连接的方向数也很大,必须具备一定的竞争无关特性才能提高波道资源的利用率。汇聚层设备要求与核心层设备类似,但是维度要求较低。接入层设备一般采用二维ROADM设备,以环网形式连接汇聚层或核心层设备。

综上所述,城域/本地ROADM组网的设备“瓶颈”在于核心层设备,主要挑战是维度能力和方向无关、竞争无关的上下路灵活性,图2所示的ROADM设备结构是比较适合城域核心层节点应用的设备形态。近年来



▲图3 城域/本地ROADM层次化组网

讲,有两种可行的方式来解决维度“瓶颈”:

(1)在采用大维度WSS期间,同时提高方向数和方向/竞争无关上下路能力。

(2)降低核心层设备与汇聚层设备之间的连接密度,减少核心ROADM设备的方向数,部分汇聚层节点通过其他节点转接到核心层设备,通过汇聚层设备分摊压力的方式减轻对核心层设备的维度要求。

此外城域/本地传送网面临的业务类型非常多样化,无论是业务服务质量要求、颗粒度都存在较大差异,通常需要更细的调度颗粒满足业务发展需求。因此通常采用集成OTN电层交叉能力和ROADM光层交叉能力的广电混合调度节点,未来还有可能进一步增强分组调度能力。

4 ROADM设备在骨干传送网中的应用

4.1 骨干ROADM特点

骨干网与城域/本地网存在较大的差异,主要体现在:

(1)传输距离的差异。对中国这样地理跨度大的国家,骨干网全光传输距离限制尤为突出,骨干ROADM组网必须考虑OEO再生问题。

(2)业务模式的差异。城域/本地网的业务以汇聚型为主,层次化结构清晰,而受IP网络结构扁平化的影响,骨干传送网“去层次化”,带来对ROADM设备形态和功能的影响。

(3)组网环境的差异。城域/本地网通常能够实现单厂商组网,至少在一个平面内不需要考虑互联互通问题,而骨干网由于网络规模大,多厂商的互联互通必须要考虑的问题。

由于骨干网的上述特点,骨干ROADM功能、性能要求以及设备形态都与城域ROADM设备存在明显差异,而且多样性更明显。

4.2 骨干ROADM应用模式

ROADM设备在骨干网中的应用可以简单归纳为如下两种模式,下面就这两种模型进行详细介绍,并分析它们对ROADM设备形态的需求:

(1)智能配线架模式

智能配线架模式利用ROADM具备的波长通道在各个方向之间的灵活配置能力,完成枢纽节点的波长通道多方向调度问题,但是波长通道一旦完成配置后基本固定,不需要频繁调整,特别适合目前中国运营商广泛采用的基于提前规划的网络建设和运维模式;相对于传统的背靠背光配线架(ODF)转接方式,ROADM设备

可以减少大量的不必要再生波长转换器(REG),降低成本;相对于固定OADM(FOADM)设备,ROADM可以解决FOADM维度扩展性难题和人工干预内部连纤的风险问题;此外基于ROADM设备的多方向转接可以通过网管系统进行监控和配置,极大降低后期维护工作的难度。

(2)波长灵活调度模式

波长灵活调度模式适用于波长通道具备灵活配置、保护恢复等功能需求的场景,类似于ROADM设备在城域网中的应用模式;由于需要业务波长需要在不同方向之间切换,因此上下路端口必须具备方向无关灵活性,对于多维ROADM设备,为了提高波长利用率,还须具备一定的竞争无关性;在波长重路由的ROADM网络中,由于需要预留波道资源用于重路由和方向无关特性带来的波长浪费,对于80波WDM系统,各段落上可利用的波长数量一般不超过40~50波,具体情况与具体网络拓扑和业务分布有关;由于物理限制,ROADM设备光学倒换速率无法达到50ms的电信级保护要求,因此光层一般只能提供恢复功能;而且特殊的波长连续性限制和全光传输性能限制,基于ROADM的波长重路由需要智能的选路方式,例如WSO控制平面。

4.3 骨干ROADM的再生方式

骨干网由于地理范围大,且节点分布不均匀,ROADM设备必须考虑OEO再生问题,而且对于多维ROADM设备,普遍存在部分方向对之间需要再生,其余方向对不需要再生的情况。一方面在网络规划中需要考虑全光域范围的问题,将全网分成若干个子网,子网内部业务连接尽量不需要OEO再生,发挥ROADM组网的低成本优势;另一方面也需要ROADM设备在必要的情况以低成本和高效率提供OEO再生能力。

ROADM的再生通过下路→OEO再生→上路的方式实现,需要占据上

下路端口:在智能配线架模式下,如果波道数量和走向预先规划并保持稳定,上下路端口可以不需要灵活性;但是在波长灵活调度模式下,须再生的波长和数量都可能发生变化,建议采用上下路端口具备波长无关特性。图4显示了采用再生 OTN 或者 OTN 电交叉方式实现再生的方案,该方案配置了上下路端口的 CDC 特性。随着 OTN 电交叉设备的成熟,骨干 ROADM 设备的 OEO 再生推荐通过 OTN 电交叉模块实现,此时不同方向、不同波长均可共享电交叉资源,而且即使光层不具备方向无关特性,也可以通过统一的 OTN 电交叉实现不同方向之间再生波长的相互连接。此外 OEO 再生还可以同时提供波长变换功能,在某些情况下可以利用波长一致性限制导致的波长碎片,优化资源利用率。

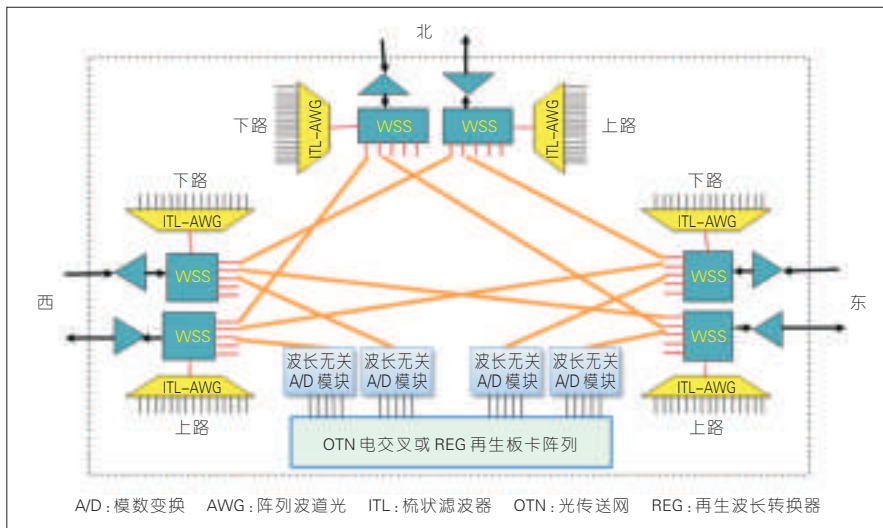
骨干网同样存在子波长级别的业务调度需求,而且由于光层倒换时间的物理限制,业务中断时间要求 50 ms 以内的业务保护只能通过电层交叉来实现;此外前面也提到通过 OTN 电交叉来实现骨干 ROADM 的 OEO 再生。因此骨干传送网中 ROADM 光交叉也需要同 OTN 电交叉技术相结合:ROADM 完成波长调度和恢复,降低必要的光电光再生,发挥光层的高效低成本优势;OTN 完成子波长调度、汇聚和保护恢复,发挥电层的精细化和快速倒换优势。

4.4 骨干 ROADM 的组网结构

骨干 ROADM 组网可采用 3 种组网结构:

(1)局部 ROADM 子网与点到点 WDM 系统相结合,这里 ROADM 子网可以是一个或者邻近几个 ROADM 设备,特别适合于某些转接业务远大于落地业务的节点。

(2)区域 ROADM 子网,子网内部采用单厂商 ROADM 设备,子网之间通过网关设备或者光纤直连采用白光口对接。



▲图4 骨干 ROADM 设备 OEO 再生功能示意图

(3)全网 ROADM 组网,在目前技术发展水平之下,全网需要统一厂商和设备型号,可以通过全网建设多个 ROADM 网络平面的方式引入多厂商的竞争。

其中第一种组网结构可以延续运营商目前基于规划的 WDM 系统建设和资源开放管理模式,只能适用于“智能配线架”模式,可以作为近期的建设模式。第二、三种组网结构可以同时适用于“智能配线架”和“波长灵活调度”两种模式,不仅可以为客户直接提供灵活的波道出租业务,而且可以为 IP 网波道提供灵活的动态恢复能力,以极低的成本应对线路故障,保证上层 IP 网络结构的稳定性,减少 IP 网络重路由带来的网络震荡,代表了未来的发展方向。

5 结束语

随着信息社会的深入发展和电信网络转型的持续进行,未来光承载网络将引来重大的变化,一方面将深入挖掘光纤的带宽潜力,另一方面底层本、高效率的光层组网技术将逐渐得到应用。ROADM 设备作为最成熟的光层组网设备,已经北美和欧洲等发达地区得到了广泛应用。

本文结合中国运营商网络特点,深入分析了城域/本地传送网和骨干

传送网中 ROADM 设备的应用需求、场景和设备形态,对 ROADM 设备在中国运营商网络中的应用提出了建设性建议。可以预见,ROADM 光交叉与 OTN 电交叉技术相结合,将成为光传送网组网技术的主要方式,推进光传送网面向业务发展的成功转型。

参考文献

- [1] YD/T 2003—2009. 可重构的光分插复用 (ROADM) 设备技术要求 [S]. 2009.
- [2] 余建国, 何建明, 易河清. OXC 及 OADM 网络节点的研究 [J]. 光通信研究, 1999(1): 1-4.
- [3] 何建明. OXC/OADM 关键技术及其发展 [J]. 中兴通讯技术, 2002, 8(4): 10-12.
- [4] 秦涛, 郑小平, 张汉一, 等. OXC/OADM 节点中功率均衡技术的研究 [J]. 光电子·激光, 2001, 12(10): 1061-1063.
- [5] Common Control and Measurement Plane (CCAMP) [EB/OL]. [2011-09-27]. <http://datatracker.ietf.org/wg/ccamp/charter/>.
- [6] Question 6/15 - Characteristics of optical systems for terrestrial transport networks [EB/OL]. [2011-06-22]. <http://www.itu.int/en/ITU-T/studygroups/2013-2016/15/Pages/q6.aspx>.
- [7] ITU-T Recommendation G.694.1 (06/2012). Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [S]. 2012.

作者简介



李俊杰, 清华大学博士毕业; 中国电信股份有限公司北京研究院高级工程师, 中国通信学会高级会员、青年工作委员会委员; 研究领域为高速光传输和光网络技术; 已参加基金项目 5 项, 获国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技奖励 2 项。

IP 和光网络联合组网技术策略研究

IP and Optical Network Combined Optimization Technology

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0031-004

摘要: 基于 IP 和光网络的现状和联合组网需求, 针对 IP over WDM 和 IP+OTN/WDM 两种组网模型, 从流量协同规划、告警联动、保护协调 3 个方面提出 IP+OTN/WDM 联合组网技术的优化策略。优化策略将优化 IP+OTN/WDM 的联合组网方案, 提高全网资源利用率, 并最终降低网络建设成本和运维成本。

关键词: 因特网协议/多协议标签交换; 波分复用; 光传送网; 多协议标签交换的传送子集; 通用多协议标签交换

Abstract: In this paper, we analyze the requirements for optimizing a combined IP and optical network. There are different models for such a combined network, including IP over dense wavelength division multiplexing (WDM) and IP+OTN/WDM. We describe optimization strategies for the IP+OTN/WDM model; in particular, we describe traffic synergic planning, alarm linkage, and protection coordination. In optimizing the IP+OTN/WDM combined network, we seek to increase efficiency of all network resources and network capex and opex.

Key words: IP/multi-protocol label switching; wavelength division multiplexing; optical transport network; MPLS-TP; generalized multi-protocol label switching

李芳/LI Fang

(工业和信息化部 电信研究院通信标准研究所, 北京, 100191)
(Research Institute of Telecommunication Standards, China Academy of Telecommunication Research, MIT., Beijing 100191, China)

1 IP 和光网络联合组网需求分析

中国运营商的干线基础承载网络一直分为两层分别进行建设和运维: 上层是由路由器组成的因特网协议 (IP) 或因特网协议/多协议标签交换 (IP/MPLS) 承载网, 下层先后由 SDH 或波分复用 (WDM)、光传送网 (OTN) 等组成的光传送网络 (简称光层)。IP 层向光层提出各节点间的光链路连接需求, 光层负责为 IP 层提供静态配置的光物理链路 (包括 STM-N

链路、WDM 波长等), 解决大容量、长距离传输和不同带宽电路的汇聚调度需求; IP 层不感知光层的物理拓扑和资源信息, 也不知道光层所提供的网络保护信息, 只能根据 IP 层面自身逻辑拓扑进行路由和流量优化; 光网络不了解 IP 层动态连接和流量变化等需求, 因此不能快速为其提供更经济的直达链路。

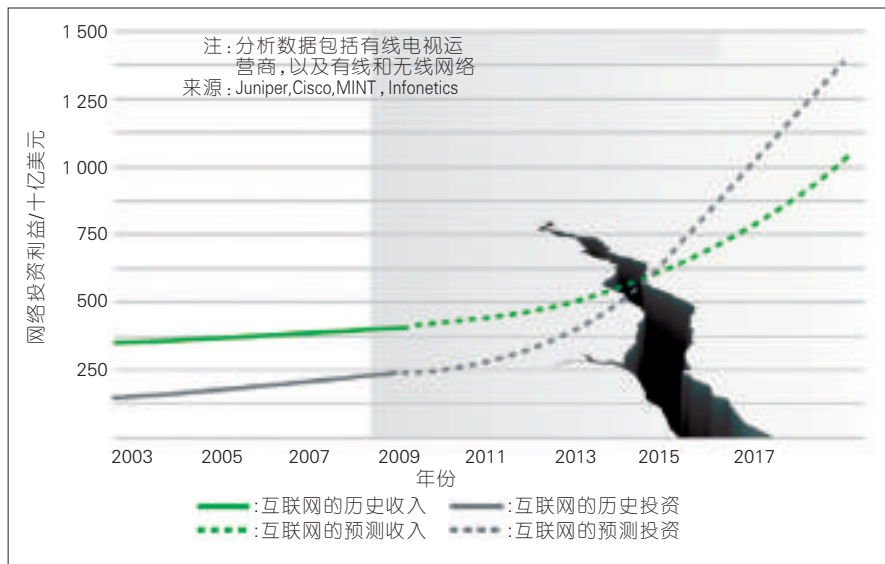
IP/MPLS 已发展为下一代网络 (NGN) 统一承载技术, IP 和光网络的关系日益密切, 共同承担着多业务综合承载和传送的角色, 并且互联网海量视频和数据业务发展驱动着 IP 网核心路由器的扩容周期日益缩短, 出现了几十太比特每秒量级的路由器集群; 互联网业务已成为光网络带宽的主要占用者, 需要光网络大规模建

设 40 波、80 波的 40 Gb/s 和 100 Gb/s WDM 系统来满足爆炸性的带宽增长。据相关研究预测^[1], 运营商的网络投资和收益之间将出现“入不敷出”的剪刀差 (如图 1 所示), 从而兴起“智能管道”应用研究热点。随着业务 IP 化和网络扁平化的发展趋势, 业内越来越关注 IP 承载和光网络的分工融合, 并且路由器 100GE 高速接口的不断应用更向光网络提出一些新需求和严峻挑战。运营商的基础承载网面临着一些问题: 如何规划 100G 子电路的汇聚调度, 怎样根据流量增长来降低过境转发流量对核心路由器的扩容压力, 从而提高网络带宽利用率和降低综合成本? 这些均需研究并应用 IP 和光网络的联合组网来实现。全球一些科研单位和通信设备商已开展了相关研究和应用试点, 本文在中国通信标准化协会 (CCSA) 研究报告^[2]的基础上, 进一步总结提炼相关应用策略, 希望进一步推动 IP+光联合组网的应用实践。

2 IP 和光网络联合组网模型

要实现 IP 和光网络的联合优化组网, 首先需研究运营商的 IP 和光网络现状和业务分工, 从而确定一个优化的组网模型。目前, 全球运营商的

收稿日期: 2013-02-27
网络出版时间: 2013-04-18
基金项目: 国家重点基础研究发展 (“973”) 规划 (2010CB328200、2010CB328201); 国家自然科学基金 (61171076)



▲图1 运营商互联网利润和投资的剪刀差现状和趋势预测

干线网络普遍采用IP over WDM的组网模型(如图2(1)所示)。图中本地和过境流量的转发处理完全由IP路由器负责,密集波分复用(DWDM)系统负责为IP路由器之间提供10 Gb/s、40 Gb/s乃至100 Gb/s的光波长通道,光层(WDM终端和可重构的光分插复用器(ROADM))根据网络预先规划来实现光波长级传输调度,不能随着流量增长而实现对本地和过境流量的智能识别以及子波长级的疏导调度。

近两年来,大容量太比特OTN电交叉调度设备的推出,为有效旁路IP层过境流量、降低路由器扩容压力提供了前提条件。图2(2)和图2(3)给出了两种IP+OTN/WDM组网模型,主要差异在路由器部署和业务承载分工方面,IP+OTN/WDM模型I是由OTN/WDM和边缘路由器组成,OTN负责为IP边缘路由器之间建立直达路由,在模型II中IP核心路由器仅负责本地流量处理,OTN负责为核心路由器的过境流量提供直达路由。运营商可根据自身的干线网络物理拓扑、节点规模和分层情况来选择合适的组网模型。

IP和光网络的联合组网有两种实施路径,一种是传送网路径,通过

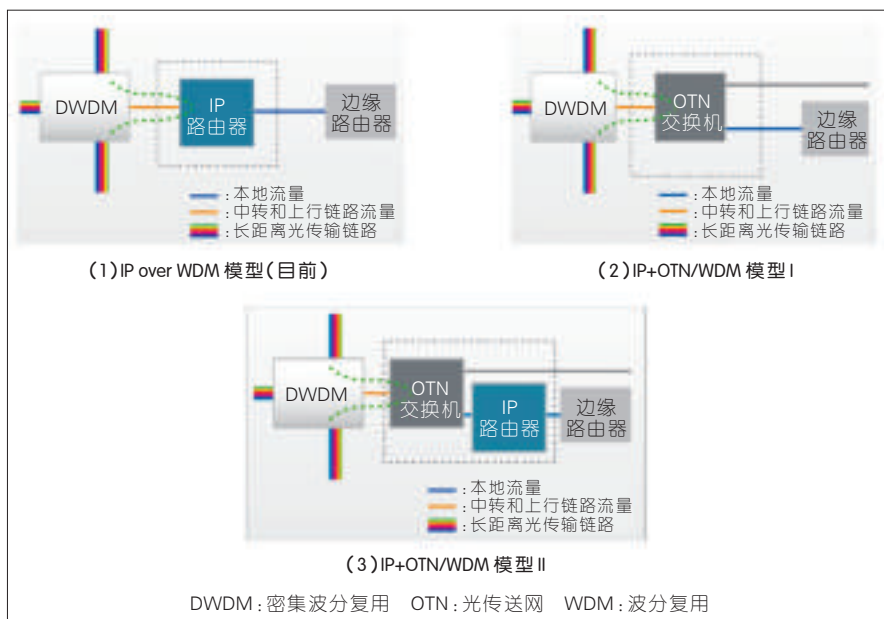
增强OTN的基于传送的多协议标签交换(MPLS-TP)和以太网分组功能,通过标签交换通道/虚拟局域网(LSP/VLAN)作为子波长颗粒进行静态路由规划,或基于通用多协议标签交换(GMPLS)用户网络接口(UNI)实现动态带宽请求和连接建立,实现对核心路由器大量过境流量的光层旁路转发;另一种是数据网路径,将IP核心路由器替换为新一代的多协议标签交换(MPLS)路由器,基于MPLS

的标签交换路径(LSP)进行交换和转发,支持光通路传送单元-k(OTUk)线路接口来增强IP层运行、管理和维护(OAM)和快速保护功能,光层仅配置WDM和可重构光分插复用器(ROADM)系统来实现大容量和长距离传输。目前,这两种方案各有利弊,运营商需结合干线业务模型(如全部是IP数据业务,还是IP+TDM/L2 VPN专线的混合业务?)、网络成本和运维体制进行综合分析选择。

3 IP和光网络协同组网策略研究

3.1 IP和光网络的流量协同策略

IP和光网络联合组网,首先需要进行统一路由规划和流量协同。IP层的路由规划需结合光网络的物理拓扑进行科学设计,光网络需根据IP层的逻辑连接需求完善光层链路连接。流量协同是在流量较大的边缘节点之间增加光层直达路由,即把核心路由器的过境转发流量分流到光层,使整个IP网络达到接近边缘路由器直连的效果,区域间流量以直达为主、转发为辅。由于光传送网设备的每比特成本和功耗约为IP层路由器



▲图2 IP和光网络的组网模型

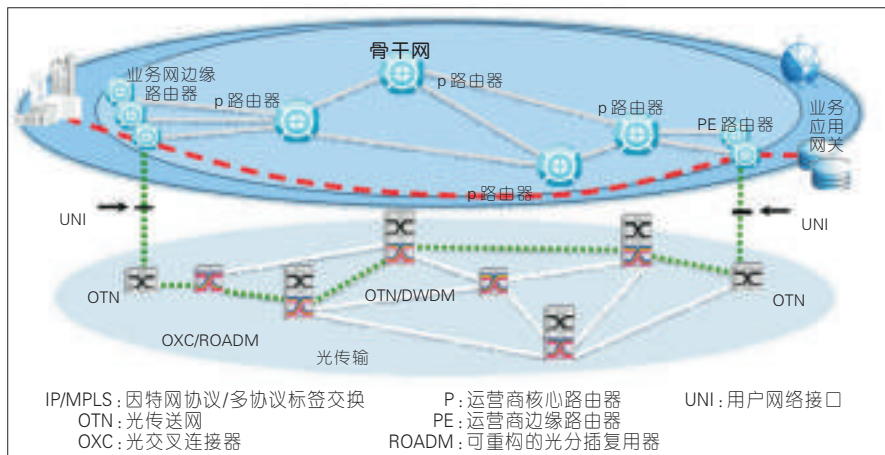
的 $1/5 \sim 1/3$, 因此采用 OTN 旁路 IP 层核心路由器的过境流量后, 可有效降低对路由器的扩容压力, 解决 IP 网络容量“瓶颈”, 从而提升整个基础承载网络的资源使用率。据国际某知名运营商的现网模型研究, 流量协同可降低对核心路由器容量需求的 $25\% \sim 50\%$ 。

鉴于 IP 承载网普遍采用 MPLS 静态流量工程来解决服务质量 (QoS) 和网络保护问题, 新一代分组增强型 OTN 设备已集成融合了 MPLS-TP 分组交换和转发功能, 因此建议采用 MPLS 标签作为路由器和 OTN 均能识别处理的子波长调度颗粒, 从而使基于 LSP 标签实现过境流量的识别和转发。

随着干线 IP 层流量的快速增长, 对光层支持动态连接建立的需求也将日益迫切, 在 GMPLS UNI、多层多域控制、实现集中路由计算的路径计算单元 (PCE) 等一系列智能控制平面技术发展成熟和性能满足要求的前提下, 建议流量协同逐渐从网管静态配置方式向智能控制平面协同方式演进。GMPLS UNI 在 IP+光网络应用如图 3 所示。图 3 中路由器实现通用多协议标签交换用户网络接口-客户侧 (GMPLS-UNI-C) 功能, 光网络实现通用多协议标签交换用户网络接口-网络侧 (GMPLS-UNI-N) 功能, 全网传送和管理效率可进一步提升, 网络综合成本也可大幅降低。路由器通过 GMPLS-UNI 接口向光网络层发起链路连接建立请求, 并携带链路带宽、QoS、链路节点和链路节点风险组等信息, 光网络通过 UNI-N 响应后能快速建立满足其要求的直通链路。

3.2 IP 和光网络的告警联动策略

IP 和光网络联合组网应实现光层故障到 IP 层故障的快速传递, 消除 IP 层故障感知的盲区。在路由器和 WDM/OTN 设备对接采用的各种类型物理接口以及逻辑子接口上, 实现光层故障告警到路由器接口的联动, 把



▲ 图3 GMPLS UNI在IP+光网络应用

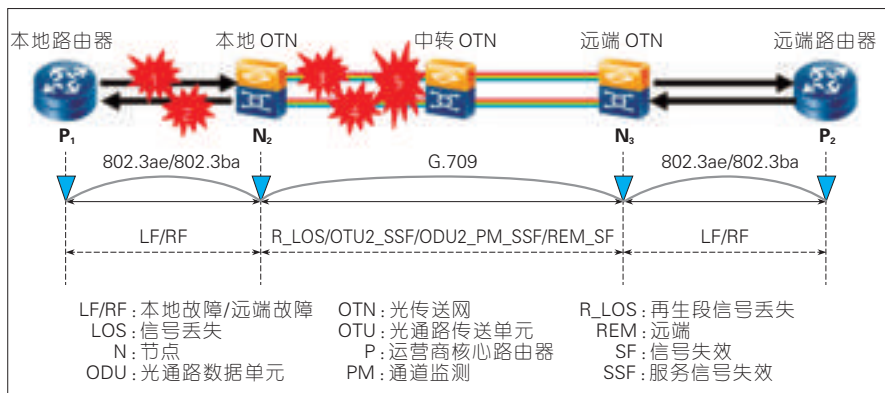
光层快速故障传递的能力延伸到路由器, 实现 IP 层保护恢复机制对底层故障的快速检测和响应。完善路由器对故障告警的定位机制, 配合光层告警联合实现快速的跨层故障定位。

10GE 以太网接口遵循 IEEE 802.3-2008^[3] 标准, 40GE/100GE 以太网接口遵循 IEEE 802.3ba-2010^[4] 标准。这两个标准中均新增了以太网 PCS 层的本地故障 (LF) 和远端故障 (RF) 码流, 能够实现以太网接口的故障状态通告。在 ITU-T G.709V3^[5] 标准中, 也增加了 OTN 告警到以太网接口 LF 的转换定义。因此, 利用本地故障/远端故障 (LF/RF) 和 OTN 告警的联动, 能够快速实现以太网接口跨光层连接时的端到端故障快速通告, 对网络运维有了重大提升。OTN 和路由器的 OAM 故障联动如图 4 所示。图 4 中在路由器和 OTN/WDM 设备联合组

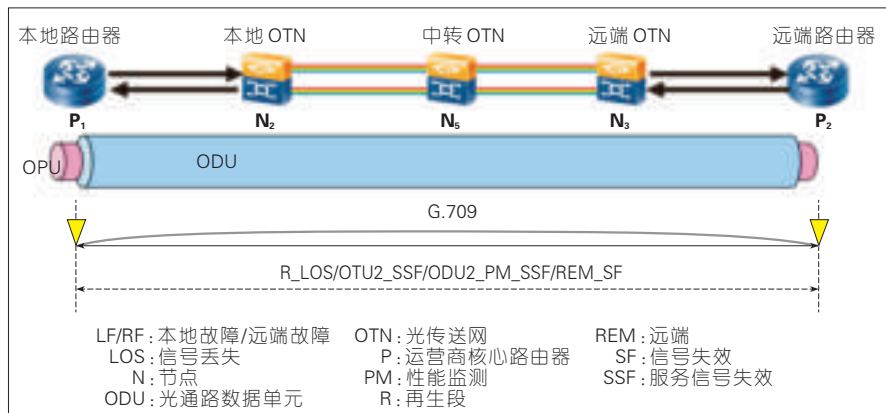
网时, 采用支持 LF/RF 的 10GE/40GE/100GE 接口, 两端路由器在任何故障点发生单向中断时, 都会立即收到 LF 或 RF 故障通告。经测试, 该故障联动方式的端到端故障传递时间小于 10 ms。

在性能管理方面, 传输线路误码一直是网络运维中较难定位的问题, IEEE 802.3ba 标准在 40GE 和 100GE 以太网接口中引入了同步头误码检测和 BIP8 误码检测, 能够检测最大 10^{-6} 的误码率。对于路由器支持 40GE 和 100GE 接口的应用场景, 以太网接口在线路误码检测能力上已有所提升。

随着 OTN 技术和产业的成熟, OTN 已被公认为替代 SDH 的高速信号封装标准, 并且由于 100GE 接口的传输距离有限 (目前小于 10 km), 因此有些路由器已开始支持 100G 的 OTU4 客户接口, 如图 5 所示。图 5 中



▲ 图4 OTN和路由器的OAM故障联动



▲图5 端到端 OTN 的 OAM 告警联动

路由器使用 OTN 接口与 OTN 设备对接,将实现端到端的 OTN OAM。

3.3 IP 和光网络的保护协调策略

目前 IP over WDM 网络有两种保护应用策略,一是 WDM 层不配置保护,完全由 IP 层配置 MPLS-TE 快速重路由 (FRR) 实现 100 ms 量级快速保护,或通过协议快速收敛技术实现秒级恢复;二是 WDM 层为重要的 IP 链路配置 1+1 波长保护或光链路保护 (OLP) 来实现小于 50 ms 的光层快速保护,IP 层配置 MPLS-TE FRR 或协议收敛技术实现本层故障时的保护恢复。在没有对两层网络保护进行联合规划时,通常会出现保护过度 (保护资源耗费过多) 或保护不足 (部分故障的保护失效) 问题,影响网络成本或整体可靠性。

在 IP+OTN/WDM 的联合组网模型下,适宜自下而上考虑联合生存性,并充分发挥 IP 层和光层保护恢复技术的各自优势,协同提高网络可靠

性,达到资源使用和可靠性要求之间的平衡。光层保护技术快速和可靠,建议在网络中应优先部署。通过在路由器端口设置拖延时间 (Hold off time) 以及双向快速检测 (BFD) 检测周期,可以使 OTN 保护倒换产生的瞬断不传递和影响 IP 层业务。运营商可根据所承载业务在可靠性方面需求的不同,进行 IP 层的网络保护和恢复技术的选择,IP 层保护恢复负责光层网络以外的 IP 层及其他故障。

IP 层因涉及业务规模大,网络拓扑复杂,应尽量避免在底层链路发生故障时对 IP 层网络造成冲击。因此,IP 层工作路径和保护路径的部署要考虑光层物理拓扑以及实际的共享风险链路组 (SRLG) 信息,避免光层一处光缆故障而造成 IP 层保护失效问题。

4 结束语

受互联网流量爆炸性增长的驱动,运营商的基础承载网络面临着网

络扩容和运维提升的发展要求,并需重点考虑整体网络的建设成本 (CAPEX) 和维护成本 (OPEX),因此 IP 和光网络协同组网技术已是网络优化和演进的重要方向。目前数据/传送平面的协同组网技术已具备初步可行性,特别是在网络流量协同、OAM 告警联动和保护协调 3 方面已有一些技术解决方案和应用策略,并已有国际运营商进行了试点应用。今后,基础承载网络向着统一管理和运维的方向发展,智能控制平面技术进一步成熟应用,相信 IP 和光网络将实现更动态高效的联合优化组网。

参考文献

- [1] Evolving backbone networks with an MPLS super core [R]. White Paper. Sunnyvale, CA, USA: Juniper Networks Inc, 2011.
- [2] IP 和光网络协同技术研究 [R]. 2011B30. 北京: 中国通信标准化协会 (CCSA), 2011.
- [3] IEEE 802.3—2008. 局域网和城域网标准 第三部分: CSMA/CD 接入方式和物理层规范 [S]. 2008.
- [4] IEEE 802.3ba—2010. 局域网和城域网标准协议 第三部分: 基于冲突检测的载波侦听多路接入 (CSMA/CD) 方案和物理层指标 增补 4: 40 Gb/s 和 100 Gb/s 操作的媒介接入控制参数、物理层和管理参数 [S]. 2010.
- [5] ITU-T G.709—2012. 光传送网络接口 [S]. 2012.

作者简介



李芳, 北京邮电大学硕士毕业; 工业和信息化部电信研究院通信标准研究所传送与接入研究部主任工程师、高工; 长期从事光网络前沿技术研究、标准制订、技术咨询和网络测试工作, 主持编写了 10 余项通信行业标准, 目前从事分组传送网、分组增强型 OTN、LTE 移动回传、IP 和光网络融合等方面的研究; 已发表论文 30 余篇。

综合信息

TD-SCDMA 步入重载时代 深度覆盖与语音时延优化成关键

【本刊讯】中国移动公布官方数据称: 截至 2013 年 2 月 28 日, TD-SCDMA 用户总数突破 1 亿大关, 在全国整体 3G 用户中, 中国移动 TD 用户占比已达 40.1%。

可以预见, 大量新增的 TD 智能终端将会对网络承

载提出巨大挑战。如果说从前的 TD-SCDMA 网络是一张轻载网, 那么随着终端用户的不断增加, TD-SCDMA 将逐渐转变为一张重载网络。如何去分担迅猛增长的数据及语音业务需求, 踏实做好 TD-SCDMA, 提升网络承载能力便将成为中国移动在 TD-SCDMA 进入 6 期建设阶段的重中之重。

新型大容量光交换的关键技术和应用

High-Optical Switching and Its Applications

中图分类号: TN929.11 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0035-005

摘要: 为了实现更大容量的光交换,需要突破矩阵光开关的规模化“瓶颈”。微机电光开关(MEMS)、循环阵列波导光栅(CAWG)、波长选择开关(WSS)等具有多端口规模化特征,能够实现良好的模块化扩展,具有使交换容量倍增的潜力。MEMS、CAWG、WSS在大型数据中心、大容量光交叉连接、灵活栅格光分插复用等系统的应用中具有独特优势和良好前景。

关键词: 光交换;微机电光开关;循环阵列波导光栅;波长选择开关

Abstract: To achieve high-capacity optical switching, the optical switch matrix needs to be investigated. The micro-electromechanical system (MEMS) switch, cyclic array waveguide grating (CAWG), and wavelength selective switch (WSS) have the advantages of multiport dimensions and expansibility to a larger modular scale. They have potential applications in data center network, optical cross-connect, and flexible gridless optical add-drop multiplexer.

Key words: optical switching; micro-electromechanical system switch; cyclic array waveguide grating; wavelength selective switch

胡卫生/HUN Weisheng

孙卫强/SUN Weiqiang

肖石林/XIAO Shilin

(上海交通大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室,上海 200240)
(State Key Lab of Advanced Optical Communications Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

大容量光交换的需求来自于网络流量的迅猛增长,尤其是互联网流量的指数式增长。自从1993年提出“信息高速公路”以来,引发了全球建设“信息高速公路”的浪潮,发展到今天,数据业务已经完全取代语音业务,成为网络的主导业务,网络视频、云计算、物联网等进一步加速了这一进程,至此,互联网流量以40%复合年均增长率增长。

随着2012年又提出了“大数据时代”的来临,数据的价值更加丰富,数据的种类更加多样,进一步加剧了数据流量的“暴涨”^[1]。

网络节点的处理能力一直是“信

息高速公路”的“瓶颈”,此问题已愈加突出,迫切需要研究和发展新型大容量的节点处理技术。学术界主要从两个方面进行了探索。其一,以分组交换为核心的集群式大容量路由器技术,不断地提高路由器的吞吐量,十余年来从吉比特每秒发展到太比特每秒量级,即将迈入帕比特每秒量级^[2-3]。其二,以电路交换为核心的大容量电交叉和光交叉系统,亦从吉比特每秒量级发展到太比特每秒量级,但从公布的数据来看,其最大容量仍落后于路由器。本文将对此两方面做简单回顾,然后,重点探讨后者的关键技术、大容量扩展方法与典型应用示例。

1 交换容量增长之路

为了应对互联网流量的指数式

增长,业界一直没有停止追求大容量节点交换的努力,细分为3条技术路径:路由器(IP)、光传送网(OTN)、光交叉连接(OXC),形成了你追我赶之势,如同“龟兔赛跑”,强有力地推动了“信息高速公路”的发展进程,时至今日,仍未停歇。

(1) 路由器

路由器是一种基于IP分组的存储转发技术,是互联网的基石,自20世纪90年代中后期发展以来,可谓进步神速。

2004年,思科公司推出了电信级路由系统(CRS-1),因其创纪录的超大吞吐量而被收入《吉尼斯世界记录大全》。它基于集群方式,采用三级自路由Benes架构,最多可以支持1152个40 Gb/s的线卡插槽,是当时业界唯一可以扩展到92 Tb/s的电信级路由系统。时隔6年之后,2010年,思科又宣布推出CRS-1的升级产品——新型运营商级路由系统(CRS-3),流量处理能力是其前身CRS-1的3倍多,最高可达322 Tb/s。

此时,中国的路由器研发生产能力也有了重大突破。2009年,中国设备供应商宣布推出采用自主芯片的超大容量集群路由器ZXR10 T8000,

收稿日期: 2013-03-18

网络出版时间: 2013-04-21

基金项目: 国家高技术研究发展(“863”)计划(2012AA011301); 高等学校博士学科点专项科研基金(20110073130006)

可提供 1 024 个 100G 接口,最高交换容量可达 200 Tb/s。2012 年,中国设备供应商推出的高性能核心交换机具备无阻塞三级 CLOS 交换架构,业务板卡与交换网板正交设计,实现多级多平面交换,单槽位支持 2T 带宽(可平滑演进至 4T),整机容量提升至 64 Tb/s 交换容量。

(2) 光传送网

光传送网对各种高速传输的时分复用信号进行封装、交叉、分插、疏导和传输,是“信息高速公路”的基础性承载平台^[4]。

2007 年,中国设备供应商宣布推出 OTN 产品,高端系统集成可重构光分插复用(ROADM)、太比特统一交换、自动交换光网络/通用多协议标记交换(ASON/GMPLS)智能控制、100 Mb/s~100 Gb/s 全颗粒调度、10~400 Gb/s 高速传送等功能,单子架 12.8 Tb/s 交叉的超大容量调度,未来可扩展至 20 Tb/s+交叉。但是,总体上 OTN 容量都不及路由器的容量 322 Tb/s,相差一个量级。

(3) 光交叉连接

光交叉连接直接在光层提供波长颗粒的透明交换,其发展历程可谓起伏曲折,在发明了三维微机电光开关(MEMS)之时发展到顶峰,最后演变成今天的多维度 ROADM。

早在 1999 年 11 月,原朗讯公司以贝尔实验室技术——微机械光开关(MEMS)为基础,推出了 256×256 全光交叉连接——WaveStar Lambda Router,是当时世界上第一个可商用化的全光交叉连接系统,作为当时光通信会展的一颗明星而轰动一时^[5]。

更轰动的事情是,2000 年,原北电网络公司收购了美国 Xros 公司,利用两个相对放置的各有 1 152 个微镜的阵列,推出了 1 152×1 152 的大型三维 MEMS 矩阵,以此为基础,推出了 OPTera Connect PX 系统,以世界第一可商用系统展示了对光信号的全光交叉控制^[6]。

回顾当初, WaveStar 和 OPTera

Connect PX 在试用阶段都颇受好评,但是,由于市场变化太快,随着互联网泡沫的破裂,整个通信行业都步入了低谷,设备厂商不得不停止了大规模 OXC 生产,把力量集中在电交叉核心的大容量交叉设备(如 OTN)。直到 2008 年起,光通信市场明显复苏,产生了一种新型的小型化多功能光开关器件——波长选择开关(WSS),由此所构建的多维度 ROADM 完全取代了 OXC。目前,单个 WSS 可支持 96 波长、23 个交换端口,相当于 2 208×2 208 规模 OXC^[7]。

以上分析表明,由于技术进步和市场驱使,第一条路径(路由器)明显顺畅和快捷,处理容量上居于领先地位。光通信领域的二条路径——OTN 和 ROADM,都处于相对落后位置,发展之路波动曲折,迫切需要奋力追赶。

需要说明的是,现在 OTN 和 ROADM 合并为一条路径——广义 OTN,它能够更好地将多粒度的灵活性和大容量的规模化两者相结合,在曲折之路上找到正确的发展方向,剩下的就是努力进步了。

2 大容量光交换的基石

可用于光交换的器件多种多样,工艺上有机械型、微机械型、波导型等,原理上有空间光学型、衍射光学型、导波光学型,物理效应上有电光型、磁光型、热光型、成像型等^[8]。因此,与电交换技术相比,光交换展示出技术的多样性,带来了学术研究的繁荣,但也增添了市场定型的困境。既然节点容量是网络“瓶颈”,多端口的光交换器件——矩阵光开关就是大容量光交换之基石。在此,本文选取 3 种代表性多端口光交换器件予以介绍。

2.1 微机电光开关

MEMS 是矩阵光开关的一座高峰。如前所述,1999 和 2000 年,人们将硅基微电机系统工艺技术用于矩

阵光开关,它由一系列可转动的微反射镜组成,通过静电力或其他控制力使微反射镜发生机械转动,改变每一路输入光束的传播方向,从而实现矩阵光开关功能。

二维 MEMS 微反射镜呈平面方阵排列,因高斯光束光程的限制,微反射镜的平面方阵数量受到限制,端口数也受到限制(如 32×32),扩展性也受到限制(反射镜是端口数的平方)。

于是,人们转而发明了三维光路。三维 MEMS 光开关包含两个由二维微反射镜组成的方阵,每个微反射镜都具有两个自由度,能沿着两个维度的轴多角度地精确旋转,微反射镜和光纤不需要束缚在一个平面位置内,因此只需要在 N 个输入光纤和 N 个输出光纤之间使用 $2N$ 个微反射镜,就能实现 $N \times N$ 矩阵化光开关功能^[9]。在保证低的插入损耗(缩短了光程)的前提下,可以达到几千个端口,目前已知所报道的端口数量达到 1 152×1 152 甚至更高。

2.2 循环阵列波导光栅

与空分光开关(如 MEMS)不同,循环阵列波导光栅(CAWG)是基于波长的交换器件。1988 年荷兰 Delft 大学 M. K. Smit 教授将相位波导光栅(AWG)用于波分复用和解复用。1991 年贝尔实验室 C. Dragone 将 AWG 的概念从 $1 \times N$ 推广到 $N \times N$,称之为 AWGR 路由器或循环阵列波导光栅(CAWG),目前有 32×32 CAWG 商用产品,以自由谱宽度为周期,每端口可以支持 32 个波长(或 32 倍数),端口数可进一步增加(如 80×80)^[10]。

但是,CAWG 基于角色散原理,需要与可调谐波长变换器(TWC)配合,才能实现基于频域的空分光交换功能。CAWG 是无源光器件,不消耗能量,其交换态是由波长变换器所决定的。

2.3 波长选择开关

与单纯的空分光开关(如 MEMS)

或频域光开关(如CAWG)不同,波长选择开关(WSS)能够同时支持基于空间端口的任意波长的动态配置,即具有波长选择的空间交换能力。可以说,WSS的发明是光交换技术的一次伟大创举,为光联网带来了更多的灵活性。

WSS的实现技术主要有3种。2005年,CoAdna公司在美国光纤通信会议上推出基于液晶(LC)的WSS;2008年,Finisar公司推出基于硅基液晶(LCOS)的WSS,支持可编程的通道组合;2010年,JDSU公司推出基于MEMS的小型化波长选择开关。此3公司分别采用不同的技术方案推出波长选择开关,成为波长选择开关的3个代表性技术^[7,11]。

(1) 基于MEMS技术的WSS

WSS的工作原理与光学成像原理相当。结构上由两个成像子系统组成:其一,位置和角度之间的转换子系统,它将输入和输出的光束位置阵列转换为成像于共聚点的倾斜角光束。其二,空间色散分波子系统,它通过分光器件(如衍射光栅)实现波长的分离。

基于MEMS技术的WSS是建立在MEMS光开关的基础之上的,分开后的各种波长的光束经透镜聚焦后入射到透镜焦平面上的MEMS微反射镜上,每一个微反射镜对应一个波长,转动微反射镜即可控制 N 束信号和 M 个波长之间的任意交换。

(2) 基于液晶技术的WSS

液晶具有双折射特性,与外加电场成正比,光轴随外加电场改变。来自于输入光纤的光束,其偏振态为混合偏振态,经过起偏器分离成两束相互垂直的线偏振光,让其中一束线偏振光通过半波片,使其偏振态旋转 $\pi/2$,与另一束线偏振光的偏振态相同,再经过准直后入射到反射式光栅上。分波后的多光束通过聚焦透镜和反射镜聚焦到液晶上,液晶盒与每一波长的光斑位置一一对应,利用液晶控制其偏振态是否改变 $\pi/2$,再配

合偏振分束棱镜(如渥拉斯顿棱镜),使这两种情况下的偏振光线在传播方向上有一定的位移或者角度,从而实现两个出射通道的选择,即实现 1×2 WSS。增加液晶盒和棱镜的组合(N 组堆叠),可以实现 $1 \times 2N$ 多端口WSS。

(3) 基于硅基液晶技术的WSS

虽然都用到了液晶技术,但LCOS的原理与上述LC完全不同。LCOS是LC和半导体相结合的显示技术,它在硅片上制作许多极度密集的液晶单元(不同于分立的液晶盒),从每个液晶单元反射的光,其相位可通过所施加的电压进行控制(原理上相当于相位阵列波束调向),从而控制反射光的反射方向,使反射光输出到指定的通道,一次性实现 $1 \times N$ 多端口WSS。

由于不同波长的光束在LCOS芯片上的不同区域发生反射并被单独控制,因此,可以将任意波长和任意光谱组合切换到任意输出端口中,它具有通道均衡功能和可变带宽的光谱选择能力。

3 大容量扩展方法

矩阵光开关的端口数虽然很大,但仍然是有限的,不能满足节点处理能力增长的要求,可以将若干矩阵光开关进行组合,即进行扩展,等效地实现更大容量的光交换结构。

交换结构的扩展必然要遵循一定的规则和约束条件,其中,最根本的约束条件是无阻塞性,最根本的规则是多级网络互连理论,如典型的三级Clos网络和多级Benes网络等。需要注意的是光交换与电交换的差异所在。

首先,光开关的种类更多,如空分和频分等;其次,光开关的损耗不均匀性;第三,光开关是相对透明的;第四,光开关的切换时间有快有慢,常有拖尾或抖动现象存在;最后,光组播的处理方式是无源的,但有附加损耗等。上述差异也带来了扩展方

法的一些变化。

3.1 MEMS光开关的扩展

MEMS光开关是典型的矩阵光开关,其单播扩展方法与电交换结构的多级网络扩展方法(如3级Clos)完全相同,无阻塞条件也完全相同。

然而,组播扩展上出现了差异。由于组播需要用到分光器件,而分光的扇出比常难以灵活控制,分光也会带来额外耗损。如果将交换结构抽象成数学上的排列,显然,单播只是组播的一个子集,组播的扩展更加复杂。3级网络的组播扩展成本高,4级网络的组播扩展成本降低,其中,第2级和第4级具有组播能力(组播光开关),而第1级和第3级不需要支持组播(如MEMS),简称为“4(2m)”级组播网络,如图1所示。

可以证明广义无阻塞和可重构无阻塞“4(2m)”级组播网络的复杂度都是 $O(N^{3/2})$,比2级组播的3级Clos网络低,后者为 $O(N^2)$ 。因此“4(2m)”级网络通常具有更好的可扩展性^[12]。

3.2 CAWG扩展方法

CAWG交换结构的扩展也是从Clos交换网络理论出发,建立CAWG交换结构和传统Clos网络之间的等价关系,在引入波长变换器的情况下,3级的CAWG交换结构如图2所示^[13]。但是,CAWG的端口受限于平面波导回路,有必要进行模块化的分解,实现CAWG交换网络的模块化构造^[14]。

3.3 WSS扩展方法

WSS同时具有空分和波分的交换功能,其扩展方法可以直接采用级联串接的方式,本文从略。

4 大容量光交换的应用

大容量光交换技术仍在发展之中,目前并无成熟大规模商用。令人欣喜的是,大容量光交换在一些应用

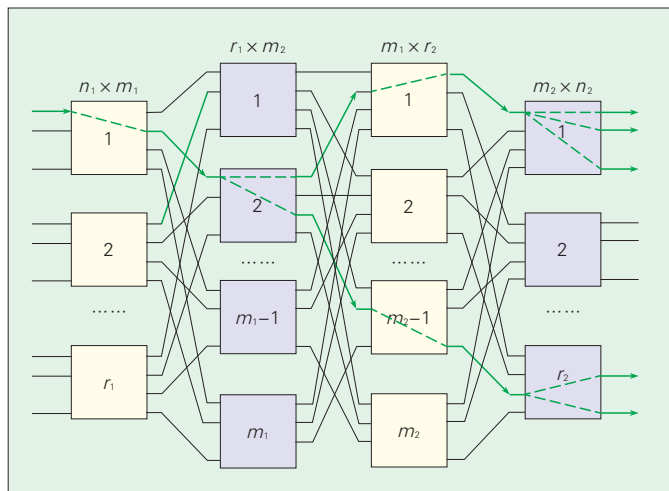


图1
4级组播网络
(其中只有第2级和
第4级有组播能力)

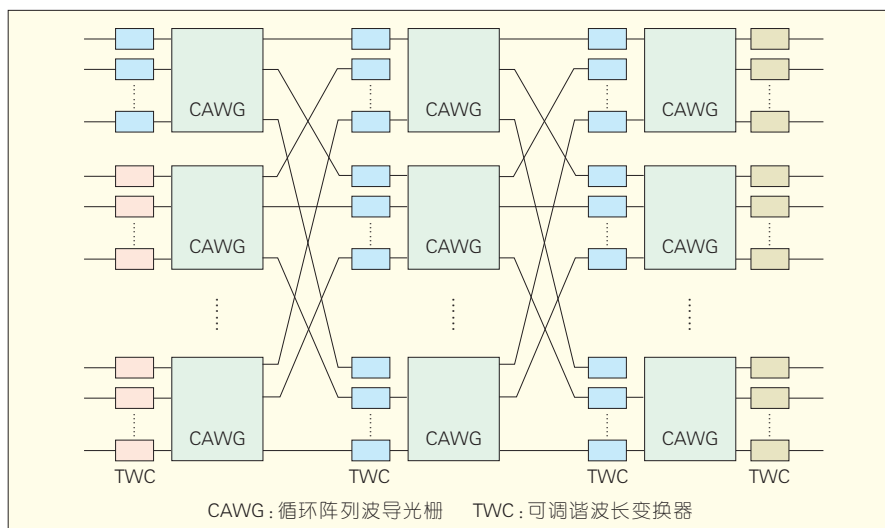


图2 阵列波导光栅的多级网络扩展

场合中展现出了独特的优势。

4.1 MEMS的应用

数据中心是云计算时代的代表性技术,数据中心的数量越来越多、规模越来越大,服务器数量会达到上万台之巨,全球数据中心普遍面临着高能耗的问题。

数据中心网络普遍采用胖树或类似的拓扑结构。研究表明,在交换机胖树拓扑中,同时增加基于MEMS的动态光交换,将电的分组交换和光的电路交换混合使用,可显著减少交换机的数量、布线、成本和电力的消耗。同时可以满足交换机之间的高带宽。

图3是其中的一种结构。由于光交换具有传输时延小、传输信道独占等优点,在数据中心网络将具有重要

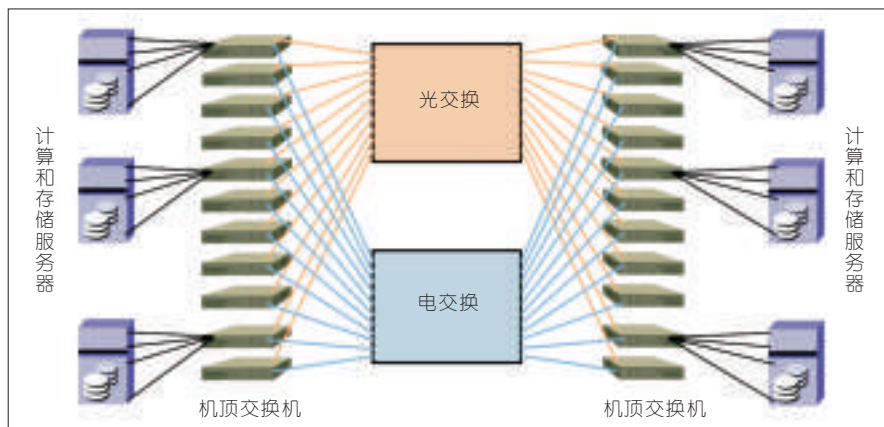


图3 混合光交叉和电交换的数据中心树型网络

的利用价值^[15]。

4.2 CAWG的应用

2012年3月,OFC会议上演示了一种光子交叉连接系统原型机(PPXC),它结合了突发模式的快速调谐和80×80 CAWG矩阵,该矩阵将两侧电交换机连接在一起,形成一个Clos矩阵,可以证明,这是一个多级、无阻塞交换矩阵,最大可扩展至帕比特每秒量级。基于CAWG与可调谐激光器快速光交换的大型结构如图4所示^[16]。2012年9月,光子交换(PS)会议上报道了一种分组和电路集成的光交换,它采用一个CAWG和若干快速可调谐激光器线卡,可以在分组交换和电路交换之间无缝演化。基于CAWG与可调谐激光器模块的光分组与电路融合光交换结构如图5所示^[17]。

4.3 灵活波长栅格的应用

业界正在研究波分复用的灵活波长栅格,在ITU-T G.694.1中定义为12.5 GHz的整数倍,研究表明,与现有固定波长隔系统相比,灵活波长栅格系统的容量或总带宽利用效率可以提高20%~50%左右。

为了应对从固定波长间隔到灵活波长栅格的发展,Finisar公司采用了硅基液晶LCOS技术,推出可实现通道中心频率和通道带宽动态控制的Flexgrid技术——WaveShaper,支持

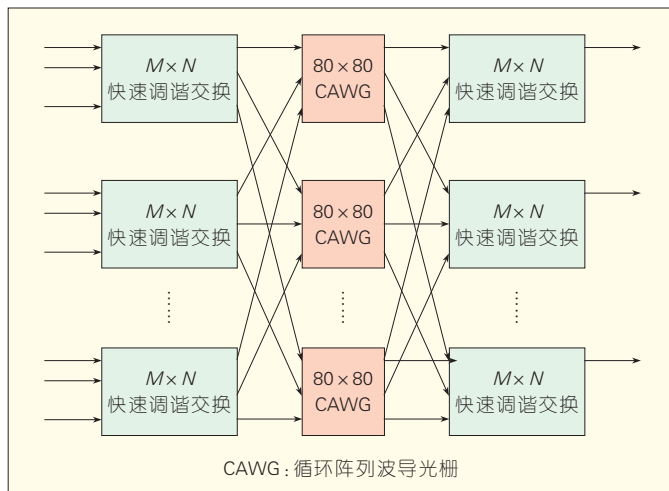


图4
基于循环阵列波导光栅与可调谐光调制器快速光交换的大型结构

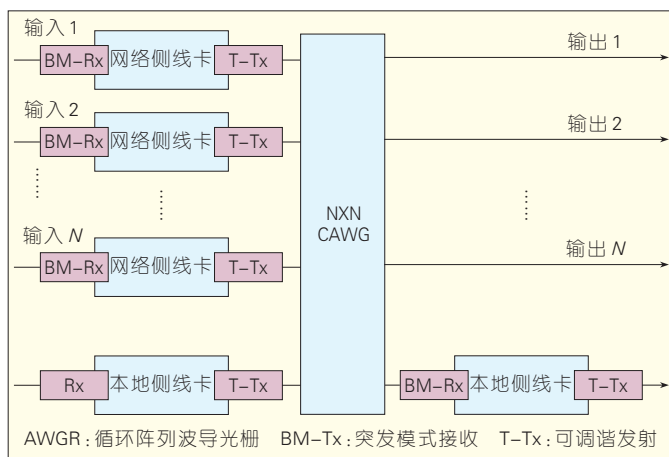


图5
基于循环阵列波导光栅与可调谐光调制器模块的光分组与电路融合光交换结构

可编程的通道谱形,起始调节量为10 GHz,步进量为1 GHz,可以满足运营商对于下一代网络中带宽灵活的ROADM的需求。

5 结束语

本文主要介绍了3种多端口光交换器件,分析了其工作原理、基本结构、扩展方法、典型应用等。同时,光交换仍面临技术路线的选择与需求上的挑战,也许大容量光交换的问题需要同时利用光和技术,才能找到一条正确的发展之路。

参考文献

- [1] 李国杰, 程学旗. 大数据研究: 未来科技及经济社会发展的重大战略领域——大数据的研究现状与科学思考 [J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(6):647-657.
- [2] 思科电信级路由系统多种服务 [EB/OL]. [2012-03-27]. <http://www.cisco.com/>.
- [3] 中兴路由器与光传送网技术及产品 [EB/OL].

- [2012-03-27]. <http://www.zte.com/>.
- [4] 韦乐平, 张成良. 光网络——系统、器件与联网技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [5] 朗讯推出 WaveStar Lambda 全光路由器 [J]. 世界电信, 2000(2):50.
- [6] 叶胤, 陈雄. 传送网交叉连接技术的发展和运用 [J]. 电信工程技术与标准化, 2003(7):32-35.
- [7] BAXTER G, FRISKEN S, ABAKOUMOV D, et al. Highly programmable wavelength selective switch based on liquid crystal on silicon switching elements [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '06), Mar 5-10, 2006, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006:3p.
- [8] 张以谟. 光互连网络技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [9] WU M C, SOLGAARD O, FORD J E. Optical MEMS for lightwave communication [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12):4433-4454.
- [10] DRAGONE C. An N*N optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers [J]. IEEE Photonic Technology Letters, 1991, 3(9):812-815.
- [11] KELLY J. Applications of liquid crystal technology to telecommunication devices [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic

Engineers Conference (OFC/NFOEC '07), Mar 25-29, 2007, Anaheim, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007:NThE1.

- [12] YAN F F, HU W S, SUN W Q, et al. Nonblocking four-stage multicast network for multicast-capable optical cross connects [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(17):3923-2932.
- [13] ZHONG W D, LACEY J P, TUCKER R. Multiwavelength crossconnects for optical transport networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 1996, 14(7):1613-1620.
- [14] YE T, LEE T T, HU W S. A study of modular AWGs for large-scale optical switching systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(13):2125-2133.
- [15] GLICK M, ANDERSEN D G, KAMINSKY M, et al. Dynamically reconfigurable optical links for high-bandwidth data center networks [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '09), Mar 24-26, 2009, San Diego, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:3p.
- [16] CAO S Y, QIU S F, WEI L, et al. An optical burst switching fabric of multi-granularity for petabits/s multi-chassis switches and routers [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC '12), Mar 4-8, 2012, Los Angeles, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012:OW4A.2.
- [17] HU W S. Design of a hybrid packet and circuit switching network node [C]//Proceedings of the 2012 International Conference on Photonics in Switching (PS '12), Sep 11-14, 2012, Corsica, France. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: Fr-S26-I10.

作者简介



胡卫生, 上海交通大学特聘教授、博士生导师; 主要研究领域为新型光交换与宽带光接入; 已主持和参与基金项目20余项; 已发表论文200余篇, 其中被SCI检索100余篇。



孙卫强, 上海交通大学副教授、博士生导师; 主要研究领域为光网络协议和性能测量; 已主持和参与基金项目10余项; 已发表论文60余篇。



肖石林, 上海交通大学教授、博士生导师; 主要研究领域为光交换和光电传感; 已主持和参与基金项目20余项; 已发表论文100余篇, 申报国家发明专利20余项。

干扰管理——提升无线通信网络性能的核心技术

Interference Management: The Key to Improving Wireless Network Performance

中图分类号: TP393.03 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0040-04

摘要: 文章阐述了无线通信网络干扰管理的实现方法,该方法通过对干扰进行多维建模,利用多种干扰管理技术,并结合资源管理手段,最终实现干扰的智能动态联合管理。干扰管理作为提升无线网络性能的核心技术,将成为缓解资源供需矛盾、有效规避或利用干扰、实现通信系统和网络性能持续改进的重要手段。

关键词: 干扰建模; 干扰管理; 资源管理; 干扰协调

Abstract: In this paper, we discuss interference management in wireless networks. We propose a method for intelligent and dynamic interference management. This method involves modeling multidimensional interference and exploiting interference management techniques, when combine with resource management, interference management is necessary to improve wireless network performance and is important for alleviating resource shortages. It avoids or uses interference and continuously improves network performance.

Key words: interference modeling; interference management; resource management; interference alignment

李建东/LI Jiandong
李钊/LI Zhao

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)
(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

- 干扰的有效管理是改善现行无线通信网络的关键
- 网络性能的优化可以通过联合使用多种干扰管理方式实现
- 智能动态的干扰管理机制设计或将成为未来研究的重点

随着无线通信技术的快速发展,人们正在通过多种类型的无线接入手段(2G, 3G, LTE, WiFi, WiMax)等,享受着丰富多彩的信息服务。用户拥有的无线终端数量以及用户周围可选择的网络种类也在大幅度的提升,新的接入手段(如4G、IEEE 802.11ac/ad、中国新一代无线局域网标准)正在不断涌现,用户对数据速率和服务质量的需求也越来越高。人们在探索更高速率传输

体制的同时,也更加注重无线通信网络性能的提高,比如:网络容量提升、蜂窝小区边缘用户的性能改善、宏小区/femtocell之间的干扰规避,无线局域网中干扰协调。由于实际的用户通信受到可支配资源的制约,并且不同用户资源使用中的冲突将导致各种各样的干扰,因此无线网络的干扰管理、干扰对网络容量的影响以及如何通过干扰管理改善网络容量在未来无线通信技术发展中具有重要的研究意义。

未来无线网络的基本架构如图1所示。未来无线内容将是分层的蜂窝结构+ad hoc+认知。分层的蜂窝

结构(宏蜂窝/微蜂窝/微微蜂窝/femtocell)可以适应不同的用户密度,并且采用ad hoc方式能够为用户提供灵活的接入。认知技术则是提高资源利用效率的有效手段。

宏蜂窝之间、宏蜂窝与Femtocell之间、中继传输之间、宏蜂窝与ad hoc网络之间的干扰已成为限制无线通信系统性能的重要因素。早期的干扰管理手段非常有限,造成这一结果的原因一方面网络环境相对简单,干扰问题还不是影响系统性能的瓶颈;另一方面是干扰并未得到全面准确的认知。传统的干扰管理方法包括功率控制、频率复用、信号处理

收稿日期: 2013-03-18

网络出版时间: 2013-04-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61231008); 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB320404)

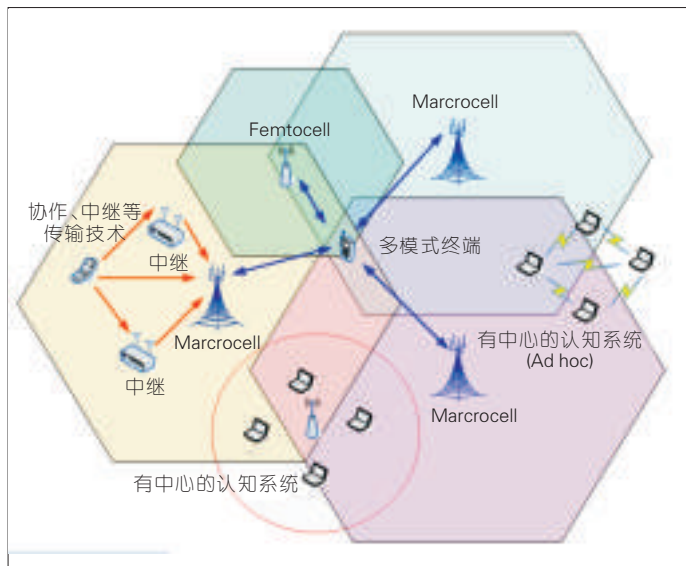


图1
未来无线网络的基本架构

等。随着无线通信系统的多样化和网络结构的复杂化,以及多种新型通信技术的应用,干扰问题也变得越来越复杂,与多输入多输出(MIMO)、正交频分复用技术(OFDM)、协作、认知等技术相结合的干扰管理方面的研究近年来得到了广泛重视,如何通过干扰管理改善无线网络通信性能已经成为学术界与产业界共同关心的问题。

1 干扰的建模与评估

为了进行干扰管理,首先应准确地刻画干扰。在实际的通信系统中,干扰有信息并有特定的结构,同时具有功率、频率和时间这些基本特征,随着OFDM、MIMO、协作、认知等技术的引入,干扰的频谱特征复杂化的同时,还增加了空间、波束、极化方向等新的特征,因此干扰具有多维度的特点。例如:采用OFDM技术,需要刻画干扰在多个子载波上的分布;MIMO技术的使用,增加了干扰波束的空间方向信息;协作场景中的干扰依赖于用户之间的关系;认知技术的引入将产生由于用户优先级不同而导致的非对称干扰问题。此外,在无线网络性能的分析、优化以及接入、调度和路由机制设计中,常常需要通过抽象对无线信道干扰进行建模^[1],

而准确地认识干扰是进行合理抽象的基础。

对于无线传输链路,可以通过构造干扰图或干扰矩阵实现对干扰的建模。特定的通信技术和信号传输方式也会给干扰带来新的特征,如MIMO,由于多天线及联合处理导致的信号空间特征,需要根据不同的数据传输之间的空间相关度对共道干扰进行定量评估。此外,在分层次的无线网络环境中,干扰的刻画与建模也需要根据具体的干扰管理需求在不同的层面上进行。

采用上述干扰建模的思想,结合未来无线网络的特点,从多个维度(时间、频率、功率、用户行为、业务流特性、网络特性等)描述无线干扰的特征,并以不同的干扰参数作为不同的坐标方向,研究人员建立了完善的网络干扰表征与评价机制,并总结形成了具体的干扰空间描述以及干扰的运算规则,为设计具体的干扰管理方法与管理结构,改善网络性能提供依据。

2 干扰与资源的联合管理

资源的有效管理是现行无线通信网络的基础技术。干扰管理与资源管理存在密不可分的联系。干扰的产生源于资源分配的非理想性,并

且干扰就是对资源的冲突使用。当多组通信链路共享相同域(频率、时间、空间)的资源时,它们之间的相互干扰将导致网络资源的浪费和网络性能的恶化。传统的干扰管理将干扰视为不利因素,通过设计各种资源规划、分配及调度机制实现干扰的消除或抑制。虽然这些方式能够在一定程度上实现干扰的管理,但同时也降低了资源的使用效率。

随着研究的深入,人们考虑通过有效利用干扰,将其作为可用资源的一部分加以对待。例如,网络编码正是在重新认识干扰的基础上发展起来的一种重要技术,通过巧妙地利用无线干扰,可以提高传输速率,改善网络性能。文献[2]利用干扰信息设计调度、路由机制,获得通信性能的提升。

图2描述了干扰管理与资源管理的关系。对于无线通信网络,其资源分配策略存在非理想性,主要表现在会出现各种各样的干扰问题,以及以牺牲资源利用率为代价的干扰规避技术可能导致网络容量的降低。因此,需要综合研究资源的全局动态利用和干扰的管理,在二者之间进行合理折衷。一方面,从资源分配的角度,提升资源利用的合理性,抑制非合理因素,为网络容量提供增量;另一方面,通过对干扰状态信息的利用,对资源分配策略进行新的设计,助益于网络容量。

为了进行联合管理,可以采用效用函数作为衡量指标。通过合理的设计,将多种干扰管理机制带来的效用纳入到效用函数中,从而包含与传统的传输容量相比更多的因素,这可以作为实现干扰与资源联合管理的一种思路。

3 智能动态的干扰管理机制

目前可用于4G标准的干扰管理技术包括频率复用、功率控制以及智能天线等。欧盟启动了FP7项目ARTIST4G,深入研究未来无线网络

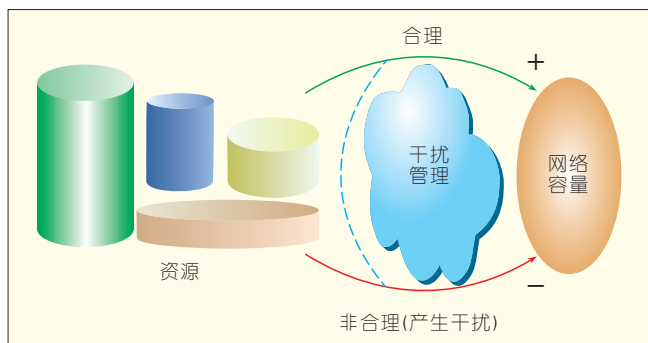


图2
干扰管理与资源管理

的干扰问题^[3]。对于复杂的网络,单一的干扰管理模式无法获得最优的网络性能,因此联合使用多种干扰管理方式才能最大化网络性能。美国弗吉尼亚理工大学的 Thomas Hou 教授研究了通过联合使用串行干扰消除和干扰避免的方式提升多跳无线网络的性能^[4]。美国麻省理工学院的 Dina Katabi 教授通过联合使用干扰协调和干扰消除技术提高了 802.11n 网络的性能^[5]。欧盟 FP7 项目 ARTIST4G 的研究人员也提出了将干扰避免与干扰利用相结合的理论。

3GPP 对小区间干扰协调 (ICIC) 进行了长期的研究,在 Release 8-11 中均提出了不同的增强技术,从 ICIC 到 eICIC 再到 FeICIC 等,如表 1 所示。此外,从 Release 12 的发展动态中可以看出,在干扰管理方面一个很有潜力的研究领域就是收发端的联合优化问题。

无线网络的干扰环境具有动态特征,一方面源于网络本身,另一方面可能来自干扰管理行为。干扰环境的改变作用于干扰模型,而后者对接入、调度、路由等算法的性能有重要影响;反过来干扰管理机制的执行又会导致干扰的动态性和不确定性。因此,干扰管理与网络环境的关系不是静态、单向的,而是存在着反馈与互动。干扰环境作为网络环境的组成部分影响了可获得的干扰信息,干扰模型是通过对干扰信息的加工处理得到的,不同层次的干扰模型决定了相应的管理策略,而干扰管理行为又会导致干扰环境的变化,进而

重新作用于干扰管理策略的设计。因此,从这一相互关系出发,结合协作、认知、资源管理等技术手段,设计智能动态的干扰管理机制或将成为未来研究的重点。

图 3 给出了智能的动态无线网络干扰管理体系。干扰感知模块负责对无线网络干扰环境进行感知,从而获得干扰的分布特征,并利用干扰的

结构特点,形成描述干扰状态的具体信息。干扰管理决策在干扰管理方法库和干扰管理融合策略的支持下实现,前者包含了若干可采用的干扰管理方式,如干扰避免、干扰拒绝、干扰消除、干扰协调等,后者通过智能算法,产生融合的干扰管理策略,并对采用该策略后的网络性能进行预测。执行模块根据决策在网络和/或终端侧进行资源配置和信号处理等。干扰管理行为作用于无线网络环境,影响干扰感知模块开展新一轮的状态感知,并对网络性能进行评估。我们需要进一步利用学习机制,获得当前网络性能与预测网络性能的差异,以此作为干扰管理融合策略等的更新与修正依据,从而使干扰管理具有动态环境适变的特点。

在各种干扰管理机制中,干扰协

表 1 3GPP 中小区间干扰协调的对比

技术名称	ICIC	eICIC	FeICIC
3GPP 版本号	Release 8	Release 10	Release 11
研究对象	宏小区之间的干扰	异构网络中不同类型小区间的干扰	非载波聚合的 eICIC
协调区域	● 频率和功率角度 ● 只针对数据信道	● 增加时域维度 ● 增加控制信道	--
技术特点	● 静态/半静态/动态 ● FFR/SFR/FFR	● Macro-pico 情景 ● Macro-femto 情景 (通过协调 CRS 无冲突)	● CRS 有/无冲突均可处理 ● 不需要小区规划
主要技术	半静态的软频率复用	ABS(X2/OAM)	干扰消除

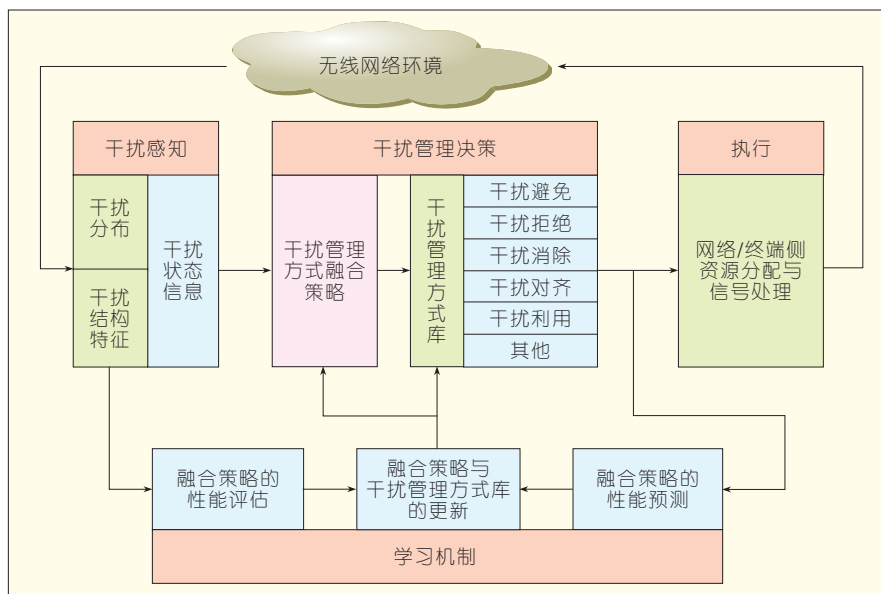


图3 智能动态的无线网络干扰管理体系

调(IA)是一种比较新颖并受到广泛关注的方法,它借助信号处理手段,在发射端构造发射向量,将接收机收到的干扰信号协调到特定的子空间中,从而使更多的自由度用于传输期望信号。IA最初是由Maddah-Ali等^[6]在研究MIMO X信道的自由度时给出,随后Cadambe和Jafar^[7]在由K对用户组成的干扰信道中应用了IA技术,并得到了相应的自由度结论。目前对于IA的研究已经扩展到“X”网络、蜂窝网等。IA本质上是利用特定发射方式导致的干扰的结构化特征,并通过适当的信息交互实现多个数据流的传输,相关设计可以尝试在多个域(如时间、空间、码字等)中独立或联合进行。通过将IA与其他干扰管理方法相结合,如干扰消除(IC),网络通信性能可以得到进一步的提升^[9]。此外,在协作多点传输(CoMP)方面,基于IA(IC)的设计也能够为解决小区间干扰,改善小区边缘用户的性能提供新颖的设计思路。对于认知通信,IA(IC)技术同样可以为干扰的有效管理,资源使用效率的提升提供帮助。

4 干扰管理与无线网络容量

干扰管理作为改善网络性能的重要手段,其与网络容量的关系具有十分重要的研究意义,相关工作可以对具体的干扰管理方法设计与评估起到指导作用。

在未来无线通信网络中,频谱利用和用户决策行为的动态性,通信业务种类及其性能需求的多样性,以及多用户之间存在竞争、协作、信息交互等行为都将使网络容量的分析变得复杂并具有挑战性。经典的信息理论在通信发展过程中起到了巨大的推进作用,但随着通信技术的不断进步和新型无线通信系统的出现,无法使用经典信息理论去分析这些新型网络的容量。为了进行基于干扰管理的容量域分析,一方面需要准确的网络容量定义,可以参考近年来出

现的注水容量、安全/行为容量、后香农容量以及认知干扰信道容量等;另一方面需要借助有效的分析方法^[7]。以无线Ad Hoc网络为例,文献[8]建立了经典的自组网网络模型,给出了用于分析无线Ad Hoc网络容量的理论基础,提出了无线Ad Hoc网络的两种容量定义,其中传送容量的定义首次将无线网络容量与传输距离联系起来,在自组网网络容量研究领域具有里程碑意义。在容量域分析方面,多用户信息论中的干扰信道容量域问题已经提出了近50年,目前为止已知的最佳速率域由Han和Kobayashi在1981年提出^[9],Tse等人^[10-11]对于干扰信道信息传输限以及协作体制下的干扰管理和容量域也进行了深入探索。此外,博弈理论以其在处理多用户的资源竞争与分配方面的独特优势,受到了广泛关注。

5 结束语

综上所述,随着无线通信网络技术的发展,干扰问题已成为制约网络性能的重要因素。利用干扰的结构化特征,实现干扰的多维度建模,探索干扰管理与资源管理的有机融合,设计与无线环境相适配的智慧的动态管理机制,获得干扰管理与网络容量关系,将成为缓解资源供需矛盾、有效规避或利用干扰、实现通信系统和网络性能持续改进的重要思路,能够为无线通信网络的发展提供支持。

参考文献

- [1] IYER A, ROSENBERG C, KARNIK A. What is the Right Model for Wireless Channel Interference [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2662-2671.
- [2] WEISS E, KLEIN O, HIERTZ G, et al. Capacity and Interference Aware ad hoc Routing in Multi-Hop Networks [C]//Proceedings of the 12th European Wireless Conference: Enabling Technologies for Wireless Multimedia Communications (EW'06), Apr 2-5, 2006, Athens, Greece. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 7p.
- [3] D'AMICO V, DEKORSY A, GOURAUD A, et al. ARTIST4G a Way Forward to the Interference Problem in Future Mobile Networks [C]//Proceedings of the 19th Future Network & Mobile Summit(FutureNetw'10), Jun 16-18,

2010, Florence, Italy. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 8p.

- [4] JIANG C, SHI Y, HOU Y T, et al. Squeezing the Most out of Interference: An Optimization Framework for Joint Interference Exploitation and Avoidance [C]//Proceedings of the 31st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications (INFOCOM'12), Mar 25-30, 2012, Orlando, FL, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 424-432.
- [5] LIN K C J, GOLLAKOTA S, KATABI D. Random Access Heterogeneous MIMO Networks [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2011 Conference (SIGCOMM'11), Aug 15-19, 2011, Toronto, Canada. New York, NY, USA: ACM, 2011: 146-157.
- [6] MADDH-AALI M A, MOTAHARI A S, KHANDANI A K. Signaling over MIMO Multi-Base Systems: Combination of Multi-Access and Broadcast Schemes [C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'06), Jul 9-14, 2006, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 2104-2108.
- [7] CADAMBE V R, JAFAR S A. Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(8): 3425-3441.
- [8] GUPTA P, KUMAR P R. The Capacity of Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(2): 388-404.
- [9] HAN T S, KOBAYASHI K. A New Achievable Rate Region for the Interference Channel [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1981, 27(1): 49-60.
- [10] ETKIN R H, TSE D N C, WANG H. Gaussian Interference Channel Capacity to within One Bit [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(12): 5534-5562.
- [11] WANG I H. Cooperative Interference Management in Wireless Networks [R]. UCB/EECS-2011-103. Berkeley, CA, USA: University of California, Berkeley, 2011.

作者简介



李建东,西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室主任、教授、博士生导师,国家杰出青年科学基金获得者,长江学者特聘教授,国家新一代宽带无线移动通信网重大专项总体组专家;从事宽带无线移动通信、认知无线网络、软件无线电、ad hoc自



李钊,西安电子科技大学副教授、硕士生导师;主要研究方向为MIMO无线通信系统、认知无线电、无线资源分配与干扰管理等;发表论文20余篇。

两种移动应用开发框架的性能测试比较——基于 PhoneGap 和 Titanium

Comparison of Two Mobile Application Development Frameworks: PhoneGap and Titanium

摘要:文章基于 PhoneGap 和 Titanium 两种框架的不同功能,通过共有的 API 进行设备访问、性能等一系列的测试。由测试可知 PhoneGap 和 Titanium 在不同环境背景下各有优缺点,但 Titanium 具有更加优秀的性能和效率,而 PhoneGap 相对具有优势的跨平台性。

关键词:移动应用;跨平台框架;性能测试;PhoneGap;Titanium

Abstract: In this paper, we describe the different functions of PhoneGap and Titanium and introduce device access tests and performance tests through the common API of these applications. The tests show that PhoneGap and Titanium have advantages and disadvantages in different environments; however, Titanium generally performs more efficiently, but PhoneGap is better in across platforms.

Key words: mobile App; cross platform framework; performance test; PhoneGap; Titanium

中图分类号: TP393.03 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0044-04

2004 年以来,移动终端由于其便携性和多样性,越来越多地受到人们的关注。对于移动开发者来说,要在不同平台上进行移动终端开发,需要学习 Python、Ruby、Java、Object-C 等各种不同的开发语言,这使得他们耗费很多时间并难以投入更多的精力到更深层次的技术研究中。

混合应用则可以解决这个问题,它结合了 Web 应用和本地应用的优点,在本地客户端中嵌入基于 Web 前端技术构造的页面视图。混合应用本地的部分相当于一个框架(或容器),并且以 HTML、CSS 及 JavaScript

为核心完成编程语言的统一。从用户的角度来说,混合应用看起来像一个本地应用;而从开发者的角度来说,开发中除了要用 HTML、CSS 及 JavaScript 技术来编写大部分应用程序之外,其余工作流程与本地应用是相似的。相对于 Web 应用,混合应用的优势在于:本地化的框架只是作为页面视图的容器,在需要的时候,仍可提供硬件设备访问控制及相关功能。技术细节方面,可以通过 JavaScript 经由本地应用框架,与硬件和操作系统进行通讯,例如控制摄像头、重力感应等。

在最近几年混合跨平台移动应用发展中,Titanium 和 PhoneGap 是使用率较高、比较有代表性的开发框

罗圣美¹/LUO Sheng mei
王蔚¹/WANG Wei
任文慧²/REN Wenhui

(1.中兴通讯股份有限公司 业务研究院,江苏南京 210012;
2.北京邮电大学,北京 100876)
(1.Communication Service R&D Institute, ZTE Corporation, Nanjing 210012, China;
2. Beijing University of Post and Communication, Beijing 100876, China)

架。文章将主要通过 Titanium 和 PhoneGap 在主流移动平台上的性能测试,详细地对比介绍 Titanium 和 PhoneGap 之间的性能差异。

(1) Titanium

Titanium 为 Appcelerator 推出的跨平台应用程序开发解决方案, Titanium 的开发语言为 JavaScript 以及 HTML 等网页标准技术。Titanium 使开发者利用 JavaScript 编写移动应用程序,并编译成本地代码再部署,相当于用纯 JavaScript 应用程序编程接口(API)来创建本地代码。

(2) PhoneGap

PhoneGap 利用 HTML 5 标准编写移动应用,同时提供 JavaScript 软件开发工具包(SDK)用来访问移动设备的硬件功能。它是运行在本地 Web 浏览器视图的 Web 应用程序,能够利用 HTML 5/CSS、JavaScript 以及 jQuery Mobile、Sencha 等框架。PhoneGap 支持更多平台,因为它并不需要创建本

收稿日期: 2013-03-22
网络出版时间: 2013-04-19

地代码,并且能够在不同平台上部署时并不改变代码,具有更好的代码可重用性。同时它的本地 API 集非常小,因而在不同环境中移植性较好。

1 测试方案

PhoneGap 和 Titanium 的测试性能对比,主要通过两种主流的平台进行测试,即 Android 和 iOS 平台。用 PhoneGap 和 Titanium 分别写出相同的应用(要求实现的两种代码在语义上是完全等价的),这样近似地比较 PhoneGap 和 Titanium 两种框架在 Android 平台和 iOS 平台上的性能,测试出它们的跨平台性、程序执行效率及性能差异。

(1) 测试方法及指标

PhoneGap 和 Titanium 调用它们各自的 API 来实现功能,主要表现在对移动设备的硬件访问控制。本次测试通过两个框架共有的功能,即对相同硬件设备的访问速度、开启时间以及读写文件时间等指标来测试它们之间的性能差异。具体指标包括:

- 访问硬件设备的功能所需时间;
- 该功能运行时的 CPU 占用率(或 CPU 时间);
- 该功能运行时的电源消耗率。

由于 iOS 平台的特殊性,并没有合适的测试工具与 Android 上的测试指标相对应。故在 iOS 平台上只测试 CPU 时间,在 Android 平台上综合测试 CPU 占用率和电源消耗率。

(2) 测试机配置

- 测试类型:真机测试;
- 测试平台:Android 平台或者 iOS 平台;
- 测试设备:客户机 1(小米 1S (Android 4.0))、客户机 2(iTouch 4G (iOS 6.0))。

(3) 测试工具

由于 Android 平台和 iOS 平台的差异性,在测试时需要使用不同的测试工具。除了两者在硬件设备访问时通过编写测试用例直接在系统后台得出数据之外,Android 平台使用

SSHDroid 软件通过远程登录移动设备,并通过 top 命令获得测试中的 CPU 利用率,测试数据如图 1 所示。

同时我们使用“电池优化卫士”软件和“GSam Battery Monitor Pro”软件作为后台监测电源消耗率的测试工具。而 iOS 平台使用 Xcode 里的“工具选项”测试得到 CPU 时间。

2 测试结果

在上文提出的几种测试指标中,硬件设备的访问时间比较直观、准确。相比而言 CPU 利用率和电源消耗率常受应用开启时占用 CPU 和电源的影响,因而我们将访问时间作为

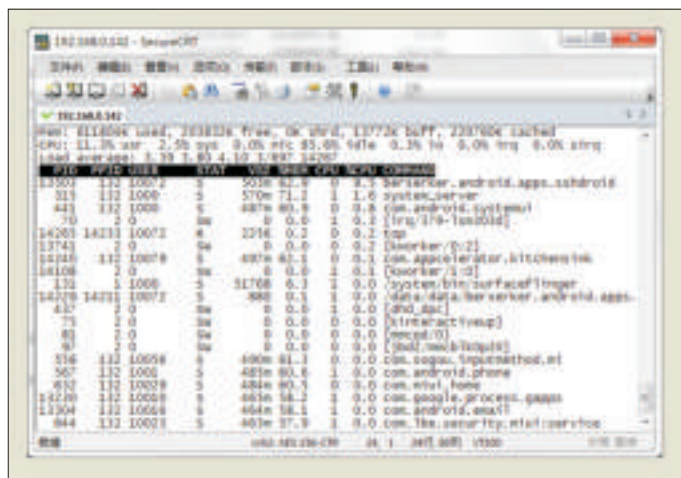
Titanium 普遍比 PhoneGap 的访问时间短,显示出较好的本地化性能。推测该情况的出现是因为 Titanium 拥有自己的预编译过程,编译成的本地代码对于调用本地 API 更迅捷。

(2) CPU 占用率和电源消耗率测试

Android 中使用 SSHDroid 软件获得 CPU 占用率。打开设备的安全外壳协议 (SSH) 功能之后,设备就可以连接到 PC 的局域网,并在 PC 上使用 SecureCRT 连接到设备,连接成功后在 SecureCRT 的命令行中运行 top 命令,动态查看进程的 CPU 占用率。测试得到的结果柱形图如图 5 所示。

利用“GSam Battery Monitor Pro”软

图 1
SSHDroid 示意图



第一测试结果进行分析。

(1) 访问功能测试

编写 PhoneGap 和 Titanium 各个测试用例,能够具体地说明 API 调用之间的性能差异。对于相同的功能来说,在调用 API 的 JS 语句前后分别加上时间戳,并计算出时间戳的差值,可得出访问时间。该过程的伪代码如图 2 所示。

通过对各个功能点连续测试 10 次并求取平均值可以得出结果柱形图,如图 3 所示。

通过图 4 可以看出,在不同功能点的访问中,Titanium 有几个硬件设备的访问时间非常高,起伏较大,性能稳定性不足。但是两者在大部分测试中显示出正常的趋势,并且

```
functionMethod() {
    var date1 = new Date();
    //第一个时间戳

    navigator.API.method(onSuccess onError);
    //调用 Native API 过程

    var date2 = new Date();
    //第二个时间戳

    var tmp = date2.getTime()-date1.getTime();
    alert('cost =' + tmp);
    //计算访问时间
}
function onError(){
    //do some things

    function onSuccess(acceleration) {
        //do some things
    }
}
```

图 2 访问测试伪代码

件和“电池优化卫士”软件作为后台监测电源消耗率的测试工具,可以得到运行时进程当前的电源消耗率。测试中对每个功能点进行连续、等次、等间隔的测试,整理测试结果如图6所示。

通过对 Android 平台上 CPU 占用率和电源消耗率的对比可以看出: PhoneGap 和 Titanium 在相同的功能中所占用的 CPU 差距不大,两者以基本相同的趋势变动,但总的来说 Titanium 在 CPU 利用率方面可以略胜一筹。

PhoneGap 在电源消耗率的不同测试用例中起伏较大,并且普遍比 Titanium 所消耗电量大,在两组用例中高出两倍以上。这说明在 Android 平台上, Titanium 显示出比 PhoneGap 更稳定的性能。

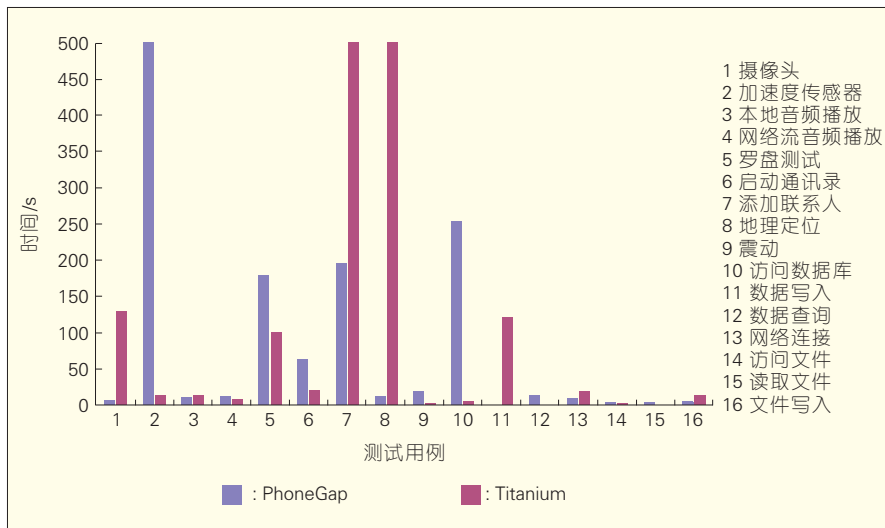
(3) CPU 时间

iOS 的 CPU 测试是使用 Xcode 里的 instruments 工具完成的,在此过程中会把每一个待测功能运行 10 次,以获得平均 CPU 时间,然后进行比较分析。测试得到的结果如图7所示。

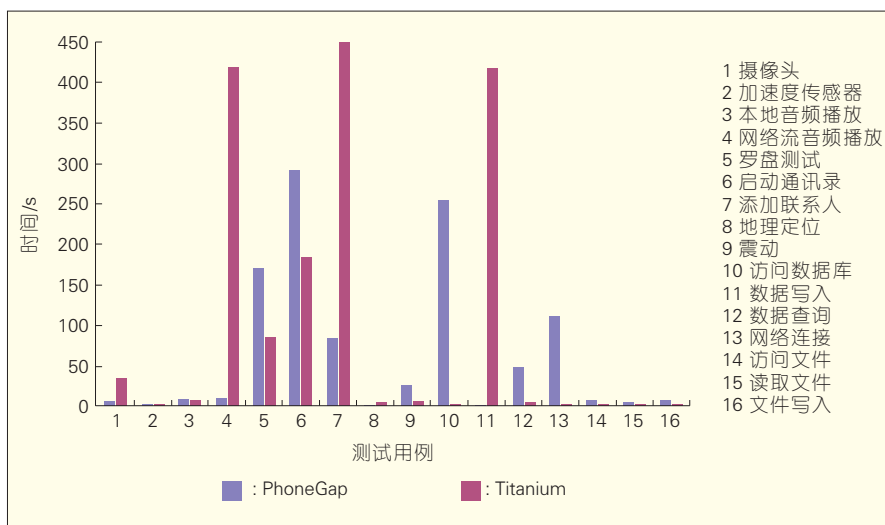
由图7可看出,在 iOS 上 Titanium 所使用的 CPU Time 仍然比 PhoneGap 要少 40%~60%,但也不乏例外出现,比如在第一次测试中, Titanium 打开摄像头所占用的 CPU 时间就比 PhoneGap 明显要多。但是在大部分测试用例中, Titanium 还是表现出非常优秀的性能。

3 结束语

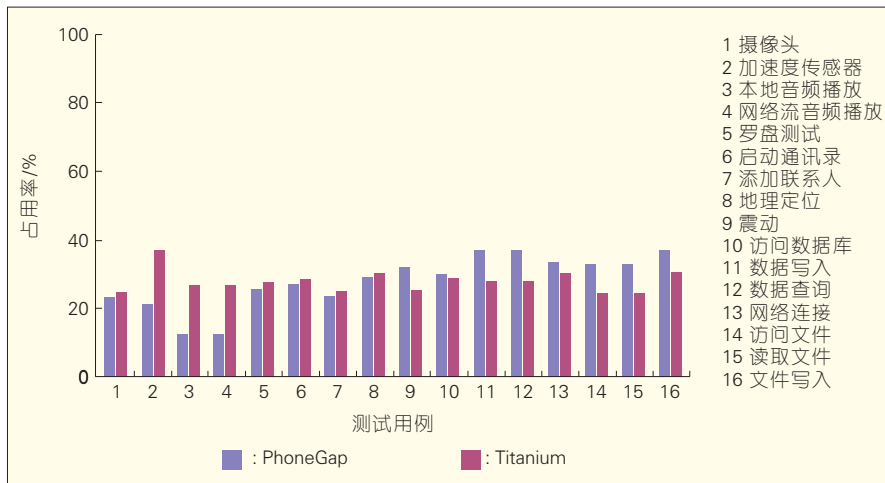
通过测试数据能够反映出:如果平台发生变化, PhoneGap 性能会保持较好的稳定性,而 Titanium 性能则出现较大起伏。从 CPU 占用率来看, Titanium 的执行效能较高, CPU 占用率相对较低。 PhoneGap 的跨平台性能较 Titanium 卓越,而 Titanium 的执行效率较 PhoneGap 较高一些。这些现象都会与 Titanium 将应用转换成原生应用以及 PhoneGap 调用手机系统的 API 这些混合跨平台解决方案的本身



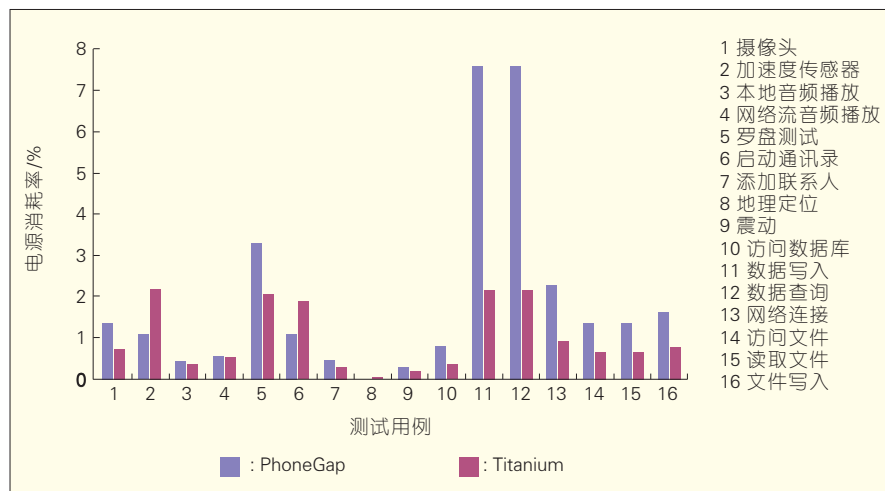
▲ 图3 iOS 上的访问时间



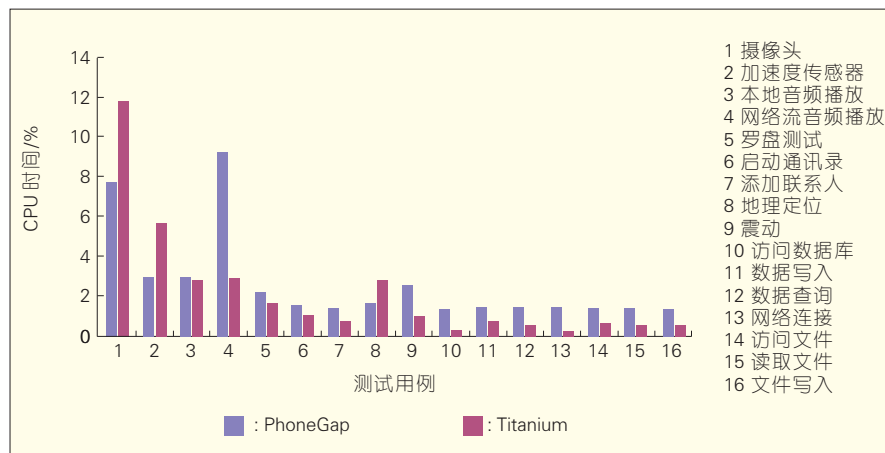
▲ 图4 Android 平台上的访问时间



▲ 图5 Android 平台上的CPU占用率



▲ 图6 Android平台上的电源消耗率



▲ 图7 iOS平台上的CPU时间

机制有关。总的来说, PhoneGap 和 Titanium 在以上不同环境背景下各有

优缺点,但 Titanium 具有更加优秀的性能和效率,而 PhoneGap 相对具有优

势的跨平台性。

参考文献

- [1] Appcelerator Platform[EB/OL].<http://www.appcelerator.com/>
- [2] PhoneGap Build is out of Beta [EB/OL].<http://www.phonegap.com/>
- [3] Rhodes[EB/OL].<http://www.motorola.com/Business/US-EN/RhoMobile+Suite/Rhodes>
- [4] appMobi[EB/OL]. <http://www.appmobi.com>
- [5] 跨平台移动开发工具:PhoneGap 与 Titanium 全方位比拼(3)[EB/OL].
http://mobile.51cto.com/web-338270_2.html

作者简介



罗圣美, 哈尔滨工业大学毕业; 现任中兴通讯股份有限公司首席架构师; 多年从事电信业务、云计算等技术研发和规划工作, 对电信网络架构有深入理解, 对电信和互联网领域的新技术和新业务有深入研究; 研发的 CDMA 移动定位系统获深圳市科学技术进步二等奖; 拥有发明专利 6 项, 已发表学术论文 10 余篇。



王蔚, 南京航空航天大学毕业; 现就职于中兴通讯股份有限公司; 长期从事移动增值业务的技术和产品研发工作, 近年来主要从事与移动互联网新型业务及应用、PaaS、终端应用开发技术相关方面的研究。



任文慧, 北京邮电大学计算机学院硕士研究生在读, 2012 年本科毕业于山东大学计算机科学与技术学院电子商务专业。

综合信息

全球 OTN 设备市场销售收入 2017 年将增长至 130 亿美元

【本刊讯】来自 Infonetics 最新的研究报告显示: 2012 年 OTN 传输和交换设备市场销售收入增长 8%, 至 73 亿美元。该增长主要来自 OTN 交换细分市场, 该市场在 2012 年的增幅高达 46%。Infonetics 预计到 2017 年 OTN 设备市场销售收入将增长至 130 亿美元。

北美市场在早期就选择了 OTN 技术, 因此其在整体 OTN 部署方面领先全球。同时, 中国在 OTN 交换部署方面也是领导者。2012 年 Infinera 是北美 OTN 交换市场的领导供应商, 尽管下半年其销售收入只排名第二。

2012 年分组光传输设备销售收入增长了 7%, 至 12 亿美元。Tellabs 和富士通占据分组光传输市场大部分市场份额, 这主要得益于其在 Verizon 的积极部署。同时, Ciena、思科和阿尔卡特朗讯市场份额也相差不多。

Infonetics 研究分析师 Andrew Schmitt 表示: “OTN 开支, 尤其是 OTN 交换, 正受益于相干核心网络投资的增长, 许多推出了 100G 的服务供应商正利用这个机会升级他们的光交换基础设施。在城域网方面, 投资正迅速地从传统 SONET/SDH 设备朝将光学和以太网电路交换结合在同一机箱内的分组光传输系统转移。”

实时渲染引擎架构

Architecture of Real-Time Rendering Engine

张忆楠¹/ZHANG Yinan, 严正²/YAN Zheng, 姚莉¹/YAO Li

(1. 东南大学, 江苏 南京 211189;

2. 中兴通讯股份有限公司 业务研究院, 江苏 南京 210012)

(1. South East University, Nanjing 211189, China;

2. Communication Service R&D Institute, ZTE Corporation, Nanjing 210012, China)

中图分类号: TP393.03 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0048-06

摘要: 文章主要分析了实时渲染引擎所要解决的几个关键问题——图形 API、特效管理、空间分割、场景图结构以及粒子系统等, 并根据需求给出了实时渲染引擎的一个参考模型。该参考模型可实现跨平台的图形渲染、其特效框架可编写和重用图形特效, 并且架构中的每个模块都易于定制和扩展。

关键词: 实时; 渲染引擎; 架构

Abstract: This paper describes some key problems in real-time rendering engines. These problems are related to graphics application programming interface (API), handling effects, spatial partitioning, scene graph, and particle system. Taking into account these requirements and the designs of some mainstream rendering engines, we provide a reference model for a real-time rendering engine. The model guarantees cross-platform rendering and provides an easily customizable and extendable framework that can help write and reuse visual effects.

Key words: real-time; rendering engine; architecture

三维图形技术在建筑虚拟、城市规划、场景漫游、场景制作、展馆展示、古迹复原、交通线路设计、3D 游戏等各方面都有了广泛的实际应用。随着硬件技术的逐步提高, 游戏引擎从架构和实现效果上也逐步实现精确细致和高效, 并取得了丰富的成果。

作为整个游戏引擎最关键的图形子系统, 实时渲染模块负责图形数据的实时计算和输出, 生成高效逼真的 3D 游戏场景, 同时硬件和图形技术的快速变化, 使实时渲染引擎框架

的需求越来越迫切。然而图形渲染引擎的框架研究和设计工作却刚刚起步, 目前全球范围与之相关的工作较少。如何构建通用的实时渲染框架满足游戏引擎图形渲染的要求, 同时保证新的图形技术产生后很容易添加到框架中是目前迫切需要解决的问题。

文章分析了实时渲染引擎需要解决的关键问题, 并给出了通用的实时渲染引擎框架参考模型, 介绍引擎对各个关键问题的解决方案。同时提供了可扩展的机制, 使得引擎框架内的具体算法可以实现用户自行定义、随意拆卸等, 从而保证最新的学术研究成果可以自如地运用于实际

工程之中。

1 实时渲染引擎的关键问题

1.1 图形 API

实时渲染引擎需要完成图形的渲染操作, 就需要实现中央处理器 (CPU) 和图形处理器 (GPU) 的交互, 并对图形应用程序编程接口 (API) 进行封装和 3D 优化加速。目前使用最广泛的两种图形 API 分别是 DirectX 和 OpenGL。

1.1.1 OpenGL

OpenGL 是 Silicon Graphics (SGI) 公司在 1992 年时提出的开放标准图形库。它发展自 SGI 早起的 Iris API。由于 Irish API 的协议问题, 它并不是开放的。SGI 公司希望开放一套完整的图形 API 标准, 来留住使用他们硬件的用户, 并保持对市场的占有。因此基于 Irish 重新设计了一套 OpenGL API^[1] (Mark Segal, 1994)。从此每个厂商只要遵守 OpenGL 标准开发自己的图形硬件驱动即可。因此, OpenGL 已经被绝大部分的操作系统支持, 成为了真正的跨平台图形应用程序编程接口。

1.1.2 DirectX 3D

DirectX 是 Microsoft 在 Window 平台上的图形 API。Windows 95 推出时, MS 公司陆续推出了 DirectX 1.0、DirectX 2.0、DirectX 3.0 3 个版本。前两个版本都被认为是半成品, DirectX 3.0 被认为是 DirectX 第一套完整的版本。1996 年的 Westwood 公司基于 DirectX 3.0 开发的《红色警戒》大卖 1 200 万份, 从此 DirectX 名声鹊

收稿日期: 2013-02-20

网络出版时间: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (60803057)

起。2002年微软的DirectX 9提出了全新的Shader绘图功能以及高阶着色语言(HLSL), OpenGL霸主地位开始被瓦解。目前最新的发行版本是DirectX 11。

1.2 特效管理

图形渲染引擎应该能方便快速地对市面上最新的特效技术进行支持和管理,同时为开发人员提供一套清晰的API进行相应的工作。Matthias Bauchinger^[2]认为,所谓对新的特效进行支持,并不是说开发时就假定这些特效是什么,例如不应该假定只需支持顶点着色器和片源着色器,而应该能对渲染流程的每一个过程都进行支持。

第一种解决方案是由John O'Rourke^[3]于2004年提出,他把每一个着色器程序都写在一个文件中,每个文件可能是顶点着色器或者片源着色器,且只用于一个渲染通道,这样引擎只要知道程序的位置和入口函数即可。这种方案很容易添加或者删除一个着色器文件,但是单纯的一些着色器文件可能不足以完成一个新特效的渲染,因为他们难以与系统的渲染状态相关联和交互。如果不同的物体在渲染时需要用到不同的渲染通道,而渲染通道又与渲染状态相关联,那么就必须对每一个不同的状态重写一遍着色代码。

另一种可行的解决方案是使用特效文件,这些特效文件的格式是确定的,例如Microsoft的特效框架^[4](MSEF), NVIDIA的CgFX框架(CgFX)^[5]。这种解决方案中,顶点着色器和片源着色器也都被放在一个文件中,但是在特效文件中声明并使用。特效文件同时可以声明每一个渲染通道的渲染状态。这样的解决方案方便于实现多通道的渲染。

1.3 资源管理

引擎为其应用程序提供一个高效的资源管理模式是十分必要的,尤

其是在三维场景渲染中,为了实现较好的视觉效果,大量的资源将从外部导入或者在内部生成。防止资源的冗余,提供高效的资源导入、查找、创建、使用和销毁是一项繁琐而重要的工作。清晰的资源控制流将帮助开发人员和用户对程序进行管理。资源的类型包括:纹理资源、着色器资源、字体资源、模型与动画。

1.3.1 纹理资源

纹理资源是三维渲染程序最重要的资源之一,包括一维、二维纹理和三维纹理,纹理资源的应用使得GPU能以贴图等方式更加真实地渲染物体。引擎应该支持不同的纹理贴图格式,向上层提供统一的纹理使用接口。

1.3.2 着色器资源

着色器资源直接与图形特效相关。一般着色器资源分为顶点着色器和片源着色器,在Shader Model 4.0中引进了几何着色器,而在Shader Model 5.0又引入了镶嵌。这些着色器程序一般都会写在一个文件中,如果按照Effect Framework的方式进行管理,那么他们就与特效文件相关联。着色器因语言的不同,作用的底层图形API也有所不同,引擎应能够兼容OpenGL着色语言(简称GLSL)、高级着色器语言(HLSL)和Cg等多种着色语言。

1.3.3 字体资源

字体可以出现在很多应用场景中。Billboard、GUI和贴图等都可能使用到字体。三维渲染程序需要对字体资源进行合理的定义、加载以及使用。

1.3.4 模型与动画

模型和动画都是引擎呈现的两个重要单元。好的引擎应该兼容不同的模型格式和动画格式,同时屏蔽文件格式的不同,给上层用户提供统

一的使用接口。

1.4 粒子系统

三维应用程序中常常有一些特效难以用传统的渲染技术进行实现,特别是一些典型的模糊现象,例如火、爆炸、烟、水流、火花、落叶、云、雾、雪、尘、流星尾迹等。这些特效是与物理相关的、抽象的。一个比较好的图形引擎应该有自己的、高效的粒子系统。

通常粒子系统在三维空间中的位置与运动是由发射器控制的^[7]。发射器主要由一组粒子行为参数以及在三维空间中的位置所表示。粒子行为参数可以包括粒子生成速度(即单位时间粒子生成的数目)、粒子初始速度向量(例如什么时候向什么方向运动)、粒子寿命(经过多长时间粒子湮灭)、粒子颜色、在粒子生命周期中的变化以及其他参数等等。使用大概值而不是绝对值的模糊参数占据全部或者绝大部分是很正常的,一些参数定义了中心值以及一些允许的变化。

1.5 空间分割策略

把空间进行分割的初衷是为了减少不必要的GPU运算工作,例如我们不需要渲染位于身后的物体。寻找某种特殊的数据结构描述场景中物体的空间关系,以便根据视角锥体把空间中不可见的部分裁剪掉,可以大大提高引擎的工作效率。常见的空间分割八叉树、KD树和BSP树。

1.5.1 八叉树

八叉树^[8]把任何一个空间看成8个象限的组合,每一个空间节点有8个子节点。如图1所示,左边是想象中的空间分割,右边是对应的八叉树。每个节点中都存有渲染对象的信息,这些渲染对象或者完全处在该节点中,或者部分处于其中。

这种空间分割的缺陷是:当物体很稀疏时,大部分的节点可能都不含

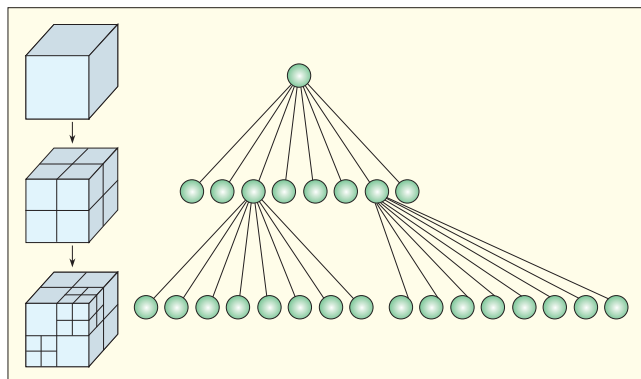


图1
八叉树示意图

有渲染对象,从而对树的遍历操作实际是很浪费的。

1.5.2 KD 树

KD 树^[7]是每个节点都为 k 维点的二叉树。如图 2 所示,所有非叶子节点可以视作一个超平面,把空间分割成两部分。在超平面左边的点代表节点的左子树,在超平面右边的点代

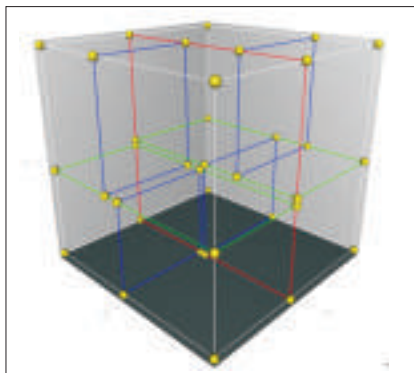


图2 KD树示意图

表节点的右子树。超平面的方向可以用下述方法来选择:每个节点都与 k 维中垂直于超平面的那一维有关。因此,如果选择按照 x 轴划分,所有 x 值小于指定值的节点都会出现在左子树,所有 x 值大于指定值的节点都会出现在右子树。这样以来,超平面可以用该 x 值来确定。

1.5.3 BSP 树

BSP 树^[8]即二进制空间分割树,是一类二叉树结构,它采用任意位置、方向的分割面递归地将空间划分为多个子空间对。对于 n 维空间,其分

割面则为 $n-1$ 维超平面,如图 3 所示。不同的分割策略会导致不同的结果和不同的运行效率。BSP 树的构建或部分更新过程一般都比较耗时,因此很少在运行期内对其进行构造或者更新。BSP 树多用于存储静态场景几何数据。

1.6 场景图

场景图是一幅数学上的图,它把渲染场景相关的对象以一种层次结构组织起来。与空间分割一节中所描述的内容不同的是,场景图关注的不仅仅是空间渲染中的几何对象,而是与渲染相关的一切内容。它可能包括如下的内容:渲染的纹理、材质、空间变换、摄像机、光源、动画、模型、着色器等等。

每次渲染过程中,场景图都必须被遍历一遍。遍历过程中通常要知道渲染系统的渲染状态。这个渲染状态对于场景图中的每个节点都是可见的,以便在遍历到任何一个节点时,都可以根据渲染状态对自身选项进行更新改变,自身选项的改变,

又可能影响到系统的渲染状态。在图 4 所示的例子中,场景图画得恰好是一棵树,但是一般出于子节点、兄弟节点间数据共享的考虑,一个节点可能会有很多个附节点,因此就成为了一幅图。

每一个几何上的节点都会处在一个包围盒中,当遍历过程访问到该几何节点时,就会对包围盒进行测试,以了解包围盒是否在视锥体之中。如果不在视锥体中,则该节点及其子节点都会被剔除。场景图的逻辑组织结构很方便进行剔除测试以提高运行效率。

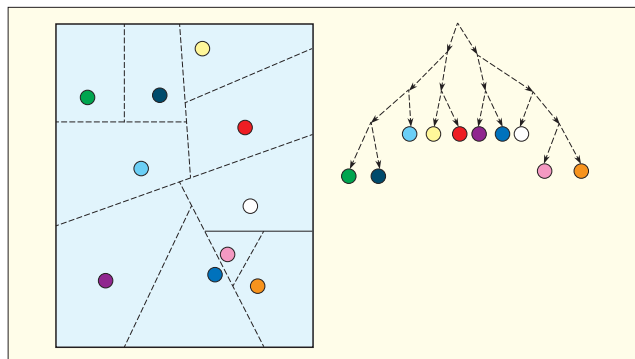
2 渲染引擎架构设计

2.1 设计概览

图 5 所示的架构图是一个通用的参考模型,底层部分是数学库,为引擎提供快速地数学运算。输入/输出(I/O)库则为引擎提供高速的文件流操作。GL 渲染封装和 D3D 渲染封装以统一的图形渲染接口重写两个图形渲染 API,屏蔽其中的差异。

这个参考模型是根据 YARE^[9]和 OGRE^[10]两个图形引擎架构提出来的。YARE 中把数学库和 I/O 库并入了核心模块,而 OGRE 则把渲染模块看成核心模块的一部分。在这里把它们分开的原因是:数学库和 I/O 库都是实际上的引擎底层,各自封装更有利于重用。而把渲染模块从核心模块区分的原因是:希望把图形渲染的过程和资源管理的过程分开。核心模块专注于资源的管理,当需要渲染

图3
二维空间中一棵
BSP 树



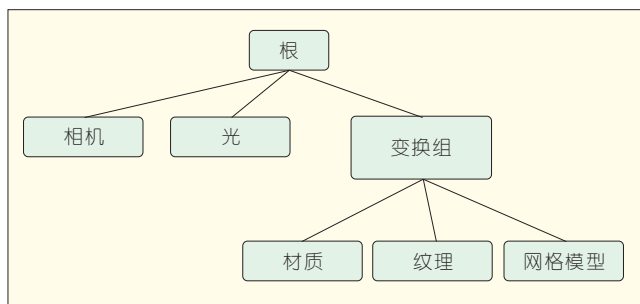
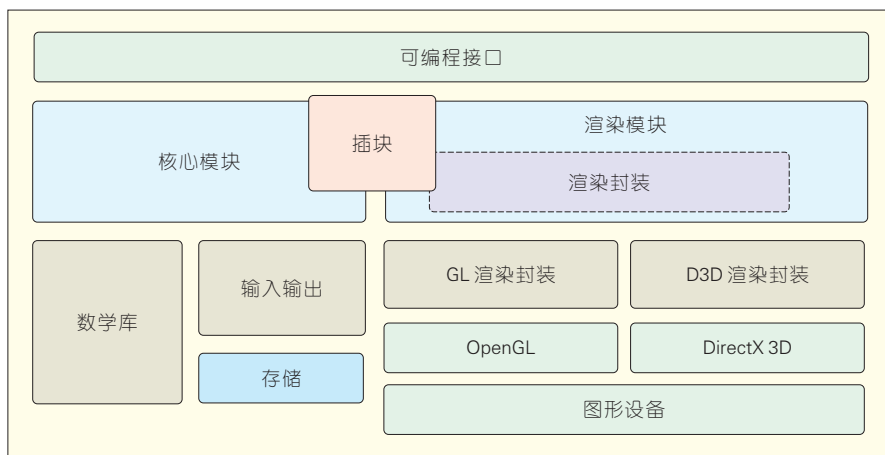
图4
简单的场景图

图5 实时渲染引擎参考架构

时,再把渲染资源和指令提交给渲染模块进行渲染操作。在核心模块和渲染之间还有一个插件模块。

2.2 核心模块介绍

2.2.1 渲染模块

渲染模块所要完成的任务是管理与GPU交互相关的缓存和渲染选项,定义统一的图形渲染接口并根据平台的不同而进行具体实现(例如,分别实现DirectX和OpenGL版本的接口),而后为上层的渲染提供便利。

2.2.2 核心模块

核心模块主要负责资源的管理,包括场景管理器和资源管理器。这里说的资源包括正在渲染的场景的场景图和渲染所需要的各项材质、纹理、模型等。

(1)场景管理器

场景管理器负责维护场景图,包括场景的空间分割树、场景图中的节

点、节点内的物体、摄像机、光源、材质等。这里,我们建议场景图和场景内容需要分离,场景内容不应该直接与场景图相关。

(2)资源管理器

资源管理器负责从存储设备中读取、维护并销毁资源。这些资源包括:纹理资源、材质资源、文件资源、二维信息板、脚本、字体、模型资源和GPU程序等。

资源管理器应该可以把资源分成多个组,每个组由用户定义,并加载时根据用户要求对不同的组进行加载和卸载。把所有资源进行分组的一个好处是便于提高检索效率,每次的检索功能都可以只发生在某一资源组内部。而且有利于提高资源的利用率和内存的控制。例如,用户可以定义关卡1的资源组,而在进入关卡2时卸载关卡1的资源并重新加载关卡2所需的资源。在实际的使用中,很多人常常会把所有的资源统统导入引擎的管理器中,而真正被使

用的却只有一小部分。

2.3 特效框架

在设计三维应用程序的时候,我们希望能够利用多个基本的特效单元(例如散射光、影子、凹凸映射等)来组成大型的、复杂的视觉特效。用户在不需知道特效实现的细节的情况下就可以方便地调用,而细节则由引擎自动控制。这就是特效框架的初衷。

2.3.1 特效文件的结构

一般情况下,特效文件的层次结构如图6所示。

一个特效包含有一个或者多个技术,然而在运行时,只有一个技术会被执行,选择的过程可以由引擎根据图形硬件的状态判断,也可以由用户指定。

每个技术有一个或者多个通道,每个通道是GPU执行的基本单元,通道中可以定义光照模型、雾化、剔除、纹理映射等的基本效果单元。

已经存在的特效框架有MSEF和CgFX。MSEF和CgFX并没有本质上的不同,在文件的格式上几乎是一致的,唯一的不同在于MSEF只支持HLSL,而CgFX支持的是Cg语言。因为Cg语言是跨平台的,因此CgFX也就可以同时用于OpenGL和DirectX。通过特效框架,所有的渲染选项、渲染着色器都被统一在一个文件中,从而便于管理。

2.3.2 后处理

后处理是指在一帧画面被渲染出来之后在帧缓存上进行的特效处

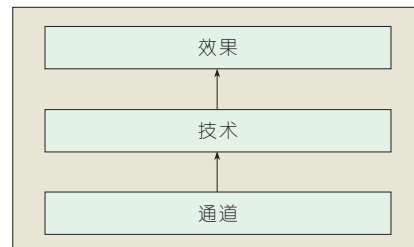


图6 特效文件的层次结构

理。例如老电影、老照片、模糊、热图等等。

一个典型的后期处理框架是合成器框架。合成器框架最初用于OGRE引擎之中,后来被分离出来,成为一个独立的开源项目^[12-13]。

2.4 粒子系统

典型的粒子系统更新循环可以划分为两个不同的阶段:参数更新/模拟阶段以及渲染阶段。每个循环执行每一帧动画。在典型的粒子系统实现方式中,粒子系统的行为可以大致分为模拟和渲染两个阶段^[9]。

2.4.1 模拟阶段

在模拟阶段,根据生成速度以及更新间隔计算新粒子的数目,每个粒子根据发射器的位置及给定的生成区域在特定的三维空间位置生成,并且根据发射器的参数初始化每个粒子的速度、颜色、生命周期等参数。然后检查每个粒子是否已经超出了生命周期,一旦超出就将这些粒子剔除模拟过程,否则就根据物理模拟更改粒子的位置与特性。这些物理模拟可能会简单地将速度加到当前位置或者调整速度抵消摩擦,或者是进行复杂处理,例如将外力考虑进去以计算正确的物理抛射轨迹。另外,经常需要检查与特殊三维物体的碰撞以使粒子从障碍物弹回。由于粒子之间的碰撞计算量很大并且对于大多数模拟来说没有必要,所以很少使用粒子之间的碰撞。

每个粒子系统都有用于其中每个粒子的特定规则,通常这些规则涉及到粒子生命周期的插值过程。例如,许多系统在粒子生命周期中对粒子的阿尔法值即透明性进行插值直到粒子湮灭。

2.4.2 渲染阶段:

在更新完成之后,通常每个粒子用经过纹理映射的四边形精灵(sprite)进行渲染,也就是说四边形

总是面向观察者。但是这个过程不是必须的,在一些低分辨率或者处理能力有限的场合,粒子可能仅仅渲染成一个像素,在离线渲染中甚至渲染成一个元球,从粒子元球计算出的等值面可以得到相当好的液体表面。另外,也可以用三维网格渲染粒子。

2.4.3 典型的粒子系统举例:

粒子的形态可以是四边形、圆形或者简单的点,但是其大小应该是可以改变的。粒子的其他属性还包括数量、材质、重量、速度、生命周期等,这些属性封装在一个管理器中。管理器还应管理粒子的颜色衰变和线性力的影响。粒子的产生是有粒子发射器负责的。粒子发射器不一定要有固定的形状,它可以是点、圆形、方形甚至立方体型的。一个典型的粒子系统结构统一建模语言(UML)如图7所示。

2.5 可扩展插件体系

一个好的渲染引擎需要快速地支持市场上最新或者最流行的某些功能,而这些功能不一定由引擎的开发人员开发完成,用户可以通过插件进行扩展。引擎也不应该局限地要求用户使用某一套效果或者某一方案的特定实现方式,而应该为用户提供更新和改进的自由。用户可以通过插件指定符合自身需求或者自己

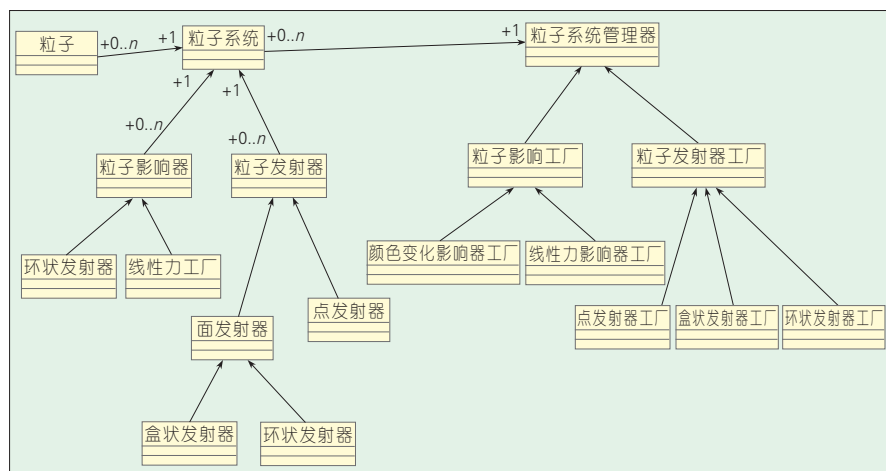
喜欢的一套算法或实现方式。通过一套统一的插件接口,用户开发的插件可以由引擎方便地调用。不论是核心模块还是渲染模块都应该为提供插件的接口。一旦有了插件机制,引擎和其应用程序的开发都变成了一种叠砖块的游戏。

插件机制另一个优势在于可以把插件和应用程序分开编译。因此当应用程序很庞大时,编译通常都会非常耗时,而插件的编译可能仅仅需要一分钟。

2.6 场景图

场景图一直被认为是适合进行游戏场景管理的方式。在传统的设计中,很多引擎都倾向于把场景图和场景内容放到一个继承体系之中,所有内容都继承自场景节点的基类。这样做的一个缺点是场景图和场景内容的紧密联系导致当出现新的数据类型(如声音、磁场、光照环境等)时,场景管理的扩展是很笨拙的。引擎开发者必须修改相应的接口。如今很多设计者认为不应该限制场景图的组织方式,用户应该可以选择自己喜欢的方式来组织场景图。这里我们也建议设计中把场景内容和场景图进行分离^[14]。

为了实现这个目标,场景管理器中只定义了场景图的接口,并不关心它的实现。场景图的接口只负责维



▲图7 一种粒子系统架构的UML图

护场景结构,没有具体的方法或者管理方式对节点的状态进行干涉。

一个可行的解决方案是:让场景中的物体和场景节点维持组合关系,即一个可渲染的物体不是继承自某个场景节点,而是场景节点中的一个组成部分,场景节点可以不存在任何场景内容,这降低了架构中的耦合性。场景节点因此与场景内容是无关的,因此用户可以选择不同的场景管理方式^[12-13]。

2.7 优缺点分析

文章提出的实时渲染架构,有以下主要优点:

- 兼容了不同的底层图形 API,是跨平台的图形引擎。为跨平台的图形应用提供了可能。

- 支持目前主流的高级着色语言和特效框架,用户可以方便地利用 GPU 地运算能力并自定义特效。特效文件重用性好。

- 每一个模块都是独立的、可扩展的,用户可以根据自己的需求修改、定制引擎。

- 为图形提供了一套高效的渲染框架。把资源的管理和图形渲染作为核心,尽可能充分利用 CPU 和 GPU 的计算资源。

当然,没有任何框架是完美的,该框架的主要缺点在于:

- 目前, GPU 可以用于通用计算,该架构并没有充分考虑 GPU 通用计算的能力,以达到分担 CPU 计算任务从而保持负载均衡的目的。

- 该架构暂时没有支持 WebGL 等新技术,因此不适用于开发未来的面向网页和移动平台的图形应用。

3 结束语

文章提出的架构是基于传统的软件工程设计,这种设计使得引擎可以屏蔽底层 API 的不同,向上提供统一的图形接口。随着面向通用计算的 GPU 概念 (GPGPU) 的出现, GPU 的计算能力越来越受到大家重视,除了图形渲染功能, GPU 还可以很好承担通用计算的功能。下一步我们将充分考虑 GPGPU 的运用,使更多的工作由 CPU 和 GPU 协同完成,保证二者的负载均衡。另外我们会充分考虑 WebGL 等新技术的加入,使引擎能够适用于移动平台的开发。

参考文献

- [1] SEGAL M, AKELEY K. The Design of the OpenGL Graphics Interface[R]. Mountain View, CA, USA: Silicon Graphics Inc, 1994.
- [2] BAUCHINGER M. Designing a Modern Rendering Engine—Design Decisions and Implementation Details[M]. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag, 2008.
- [3] O'RORKE J. Integrating Shaders into Applications [M]. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 2004.
- [4] MSDN, Effects(Direct3D 11) [EB/OL]. [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff476136\(v=vs.85\)](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ff476136(v=vs.85)).
- [5] The Cg tutorial, Appendix C: The CgFX file format [EB/OL]. http://http.developer.nvidia.com/CgTutorial/cg_tutorial_appendix_c.html
- [6] SAMET H. The Design and Analysis of Spatial Data Structures [M]. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1989.
- [7] MOORE A W. An introductory tutorial on KD trees[R]. Technical Report No 209. Pittsburgh, PA, USA: Computer Laboratory, University

of Cambridge, 1991.

- [8] ERICSON C. Real-Time Collision Detection [M]. Amsterdam, Netherland: Morgan Kaufmann, 2005.
- [9] REEVES W T. Particle Systems—A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. ACM Transactions on Graphics, 1983, 17(3):359–376.
- [10] Ogre3d manual [EB/OL]. http://www.ogre3d.org/docs/manual/manual_4.html#SEC4
- [11] JUNKER G. Pro Ogre 3d Programming[M]. Berkeley, CA, USA: Apress, 2006.
- [12] Ogre3d Manual [EB/OL]. http://www.ogre3d.org/docs/manual/manual_29.html
- [13] Multiverse [EB/OL]. http://update.multiverse.net/wiki/index.php/Compositor_Framework

作者简介



张忆楠, 东南大学软件学院在读; 现在微软亚太研发集团实习; 主要研究方向为游戏引擎、三维动画、基于物理的图形渲染。



严正, 东南大学电子工程系毕业; 现就职于中兴通讯任二级高工; 从事有线网络产品、增值业务产品、云计算产品的研究工作。



姚莉, 2007 年获得上海交通大学博士学位; 东南大学计算机科学与工程学院、软件学院副教授, 硕士生导师, 计算机学会会员、IEEE 会员, 中国人工智能学会智能 CAD 与数字艺术专委会委员, 同时担任多个国际期刊的审稿人; 长期从事计算机图形学和移动互联网的科学研究及教学工作; 发表学术论文 30 余篇, 出版专著 1 本, 申请发明专利 5 项(已授权 1 项), 软件著作权 1 项。

综合信息

中国光纤产业 2012 年业绩出色

【本刊讯】截止到 2013 年 4 月 27 日, 光纤厂商的 2012 年度报告已经全部出炉。从年报可以看到: 2012 年, 中国光纤厂商在光通信行业整体疲软的情形下, 仍然取得了出色的业绩增长, 光纤产销量达 1.4 亿芯公里, 同比大增 33%, 占据全球近 50% 份额, 达到历史最高点。

业界预计中国光纤的需求量在 2013 年仍将继续上涨 10% 以上。最新消息指出: 中国电信启动 2013 年光纤、室外光缆和引入光缆集中采购项目, 需求量达 5 600 万芯公里。宽带建设的推进和 LTE 对光纤的需求, 推动着中国光纤需求的高位上涨, 同时中国光纤厂商的产能仍在继续扩张, 并将超过光纤的实际需求。

一种基于蚁群融合的盲传输格式检测方法

Blind-Transport-Format Detection Method Based on Ant Colony Merge Algorithm

中图分类号: TP393.03 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0054-03

摘要: 针对现有 3GPP 标准中盲传输格式检测方案的性能不足, 文章结合蚁群算法和融合量的特点提出了一种适用于 WCDMA 终端的盲传输格式检测算法。该算法利用蚁群信息量记忆传输格式历史数据, 对不同判据的可靠性程度进行加权融合。仿真结果表明: 文章提出的方法在多应用场景下均明显提高了 WCDMA 终端中盲传输格式检测的可靠性。

关键词: 蚁群; 融合; 盲传输格式检测; 宽带码分多址

Abstract: In this paper, a new blind transport-format detection method based on ant colony merge algorithm for WCDMA systems is proposed. The method is designed to alleviate detriments to link performance using currently available blind-transport-format algorithms. Such algorithms use the ant colony to remember historical information about the transport format, and merge the detection judgment according to the reliability. Simulations show that the proposed algorithm significantly improves link performance in all practical scenarios.

Key words: ant colony; merge; blind transport format detection; WCDMA

邱宁/QIU Ning

李强/LI Qiang

陈玉/CHEN Yu

(中兴通讯微电子研究院, 南京 210012)
(Microelectronics Institute, ZTE Corporation,
Nanjing 210012, China)

在宽带码分多址 (WCDMA) 系统的下行链路中, 为了节省信道容量, 某些传输信道并未发送传输格式的信息^[1]。通过上层的协商, 仅知道可能的传输格式 (可能的结束比特位置 $\{n_{end}\}$) 集合, 如图 1 所示。图中有 4 个可能的结束比特位置, 分别为 $n_{end} = 1 \sim 4$, 且实际传输的结束比特位置为 $n_{end} = 3$ 。因此, 终端需要通过维特比译码器的工作状态以及循环冗余校验 (CRC) 校验的结果检测当前正在使用的实际传输格式。

现有写入第三代移动通讯伙伴

项目 (3GPP) 标准中的盲传输格式检测算法, 具体为: 在每一个可能结束的比特位置从零状态开始回溯幸存路径, 并恢复出相应长度的数据序列。对于每一个被恢复的数据序列, 通过检查 CRC 来进行错误检测, 如果能通过 CRC 校验, 并且路径量度满足一定的条件, 则说明被恢复的序列是正确的^[2]。第三代移动通信的其他标准中也有类似的需求^[3-4]。

$$S(n_{end}) = -10 \log \frac{(a_0(n_{end}) - a_{\min}(n_{end}))}{a_{\max}(n_{end}) - a_{\min}(n_{end})} \quad (1)$$

其中 $a_{\max}(n_{end})$ 和 $a_{\min}(n_{end})$ 是在结束比特位置 n_{end} 的所有状态中路径量度值的最大值和最小值, $a_0(n_{end})$ 是零状态的路径量度值。

为了减少错误检测的可能性 (当

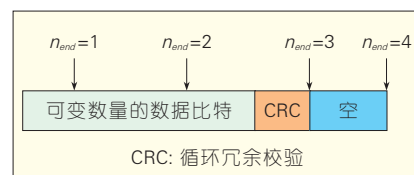
选择的路径是错误的而 CRC 却是正确时, 会发生此类情况), 刻意引入一个路径选择门限 D 。门限 D 决定了是否应该在每一个结束比特位置 n_{end} 进行回溯。如果在这个可能的结束比特位置处的路径量度满足条件:

$$S(n_{end}) \leq D \quad (2)$$

则可以从该结束比特位置回溯并恢复出数据, 其中 D 是路径量度门限, 是一个设计参数。

如果不止一个满足 (2) 的结束比特位置恢复出的数据通过 CRC 校验, 则认为具有最小的 $S(n_{end})$ 值的结束比特位置是正确的。如果所有的结束比特位置都没有满足 (2), 则认为接收到的帧数据流错误。

业界也有针对标准中盲传输格式检测方式的修正和性能的评估探讨^[5-6]。上述盲传输格式检测流程均基于分支判决的模式, 未能综合考虑



▲ 图 1 可变比特数的数据帧格式示例

收稿日期: 2012-12-11

网络出版时间: 2013-03-18

基金项目: 国家科技重大专项
(2012ZX03001-003)

路径量度和CRC校验结果之间的关系。CRC长度与CRC校验结果的置信度也未在现有的检测流程中得到体现。实际应用中由于语音信号以及声码器的特点造成了传输格式在使用时间上有一定的延续性^[7],并使得系统在启用某种传输格式后通常会沿用该传输格式一段随机的时间。该特点作为先验信息亦未被现有的盲传输格式检测流程利用。

1 蚁群融合盲传输格式检测的提出

1.1 融合量的产生

(1) 路径量度融合量

定义结束比特位置在 n_{end} 处的路径量度融合量的表达式为:

$$S(n_{end}) = \frac{a_0(n_{end}) - a_{\min}(n_{end})}{a_{\max}(n_{end}) - a_{\min}(n_{end})} \quad (3)$$

其中 $a_{\max}(n_{end})$ 和 $a_{\min}(n_{end})$ 是在结束比特位置 n_{end} 的所有状态中路径量度值的最大值和最小值, $a_0(n_{end})$ 是零状态的路径量度值。

可见,路径量度融合量的最大值为1,此时 $a_0(n_{end}) = a_{\max}(n_{end})$,表明零状态是在该位置到达可能性最大的状态;路径量度融合量的最小值为0,此时 $a_0(n_{end}) = a_{\min}(n_{end})$,表明零状态是在该位置到达可能性最小的状态。此外,路径量度融合量 $S(n_{end})$ 随着 $a_0(n_{end}) - a_{\min}(n_{end})$ 增加而单调增加。分母 $a_{\max}(n_{end}) - a_{\min}(n_{end})$ 起到了归一化路径量度融合量的作用。

(2) CRC校验结果融合量

CRC校验结果的可靠程度与CRC比特数的多少密切相关,CRC比特数越多,CRC校验结果的置信度就越高,每增加1比特CRC比特数时同一错误数据帧通过CRC校验的概率下降大约50%。

根据标准,WCDMA系统收到的数据帧可以使用8比特、12比特、16比特或24比特这4种CRC比特数,并可以知道当前使用的CRC比特数^[8]。

参照路径量度融合量的置信程

度,定义CRC比特数为8且通过CRC校验时的CRC校验结果融合量的值为0.5,由此可以得出CRC比特数分别为12、16和24时通过CRC校验时的CRC校验结果融合量的值分别为0.875、0.96875和0.99609375。如未能通过CRC校验,则CRC校验结果融合量的值为0。

综上所述,结束比特位置在 n_{end} 处的CRC校验结果融合量的表达式为(4),即:

$$C(n_{end}) = \begin{cases} 0 & \cdots \text{未通过CRC校验} \\ \frac{1}{2} & \cdots 8 \text{ 比特CRC, 通过校验} \\ \frac{7}{8} & \cdots 12 \text{ 比特CRC, 通过校验} \\ \frac{31}{32} & \cdots 16 \text{ 比特CRC, 通过校验} \\ \frac{127}{128} & \cdots 24 \text{ 比特CRC, 通过校验} \end{cases} \quad (4)$$

可见,CRC融合量为0到1区间内的变量。 $C(n_{end})$ 的数值越大表明使用CRC判据得出的该帧结束比特位置在 n_{end} 处的置信度越高。

(3) 蚁群融合量

根据昆虫学家的观察,发现自然界的蚂蚁虽然视觉不发达,但它可以在没有任何提示的情况下找到从食物源到巢穴的最短路径,并且能在环境发生变化(如原有路径上有了障碍物)后,自适应地搜索新的最佳路径。这种能力是因为蚂蚁在走过的路上会释放一种特殊的分泌物—信息激素,使得一定范围内其他蚂蚁能够觉察到并由此影响它们的行动,当一条路上的信息激素越来越多(随时间的推移会逐渐减弱),后来的蚂蚁选择这条路径的概率也越来越大,从而增加该路径的信息激素强度,这种选择过程称为蚂蚁的自催化过程,其原理是一种正反馈机制,所以蚂蚁系统也称为增强性学习系统。

蚁群系统的基本思想是模仿蚂蚁依赖信息激素进行通信而显示出的社会行为,在智能体定义的基础上,由一个贪心法指导下的自催化过程引导每个智能体的行动,它是一种随机的通用试探法,可用来求解各种不同的组合优化问题。

文章基于上述原理引入蚁群融合量作为盲传输格式检测的判据之一,蚁群融合量产生方法如下所述:

不妨假设可能的结束比特位置有 N 个,盲传输格式检测流程在这 N 个可能的结束比特位置中选出当前实际传输的结束比特位置。定义 $N \times N$ 阶的信息素浓度矩阵为 P ,其中 $P[n_{end}', n_{end}]$ 表示从第 n_{end}' 个结束比特位置转变到第 n_{end} 个结束比特位置的信息素浓度。可见,当前一帧检测出的结束比特位置为 n_{end}' 时, $P[n_{end}', n_{end}]$ 就是结束比特位置为 n_{end} 的蚁群融合量,简称为 $P(n_{end})$ 。

为了便于表述信息素浓度矩阵的更新流程,定义信息素释放系数 p_r 、信息素挥发系数 p_v (以及最大信息素浓度 p_{\max} 和最小信息素浓度 p_{\min})。完成当前帧检测后可以采用以下方式更新信息素浓度矩阵:在信息素浓度矩阵中相应位置上以信息素释放系数的速度释放信息素,并使得更新后的信息素浓度不大于最大信息素浓度;信息素浓度矩阵中所有位置上的信息素以信息素挥发系数的速度挥发,并使得挥发后的信息素浓度不小于最小信息素浓度。前一帧检测出的结束比特位置为 n_{end}' ,当前帧检测出的结束比特位置则为 n_{end}^* ,此时更新信息素矩阵的过程可以描述为两个步骤:

(1) 使用(5)中在矩阵的第 n_{end}' 行,第 n_{end}^* 列的位置释放信息素

$$P[n_{end}', n_{end}^*] = P[n_{end}', n_{end}^*] + p_r \quad (5)$$

如果更新后的 $P[n_{end}', n_{end}^*]$ 大于 p_{\max} ,则令 $P[n_{end}', n_{end}^*]$ 等于 p_{\max} ;

(2) 使用(6)在矩阵中每个元素的位置上挥发信息素,(6)中的 i 和 j 均为 $[0, N-1]$ 区间内的任意整数

$$P[i, j] = P[i, j] - p_v \quad (6)$$

如果更新后的任意一个 $P[i, j]$ 小于 p_{\min} ,则令该 $P[i, j]$ 等于 p_{\min} 。

1.2 合并融合量

将每个可能的结束比特位置 n_{end} 处的上述3种融合量按比例融合后

得出该结束比特位置处的融合量度 $M(n_{end})$ 。一种可行的融合方式是将上述3种融合量按照相等的比例融合得出融合量度,计算方法为(7):

$$M(n_{end}) = S(n_{end}) + C(n_{end}) + P(n_{end}) \quad (7)$$

不妨假设可能的结束比特位置有 N 个,依次求得这 N 个可能的结束比特位置各自的融合量度,随后通过比较得出这 N 个融合量度中的最大值 $M(n_{end}^*)$,则 n_{end}^* 为盲传输格式检测流程检测出的结束比特位置。

2 性能仿真与分析

语言业务帧的结构见图1,有10种可能的结束比特位置,分别为 $n_{end}=1\sim 10$,它们各自对应的帧长分别为16,55,58,65,71,74,77,91,81和97,其中的CRC比特数均为8比特。仿真中实际传输的帧长按照给定的帧长变化周期从上述10种帧长中随机选取。盲传输格式检测在这10种可能的结束比特位置中选出当前实际传输的结束比特位置。

仿真环境为加性高斯白噪声(AWGN)信道,而每个数据的仿真语言业务帧数则为10万帧,比特信噪比 E_b/N_0 均为译码器的典型工作区域1.0 dB,仿真结果如表1所示。

其中,方法的种类1为现有的方案;2为采用CRC和路径量度的融合法;3为蚁群融合算法。DER为误检测率,表示未能正确检测出结束比特位置的比例;PDER为净误检测率,表示译码正确但未能正确检测出结束比特位置的比例;FDR为误传输格式检测率,表示未能正确检测出结束比特位置但通过CRC校验的帧的比例。

由统计结果可见,方法2在同样仅使用路径量度和CRC校验结果作为判据的情况下,基于融合方式后在DER和FDR这两种性能上均优于基于分支判决的现有算法。且在帧长变化周期较大时,引入的蚁群融合量大幅改善了3种误检测率。同时,在帧长变化周期较小甚至每帧的长度都在发生随机变化的极端场景下,蚁

▼表1 不同算法的检测性能比较

帧长变化周期	每100帧			每10帧			每1帧		
方法的种类	1	2	3	1	2	3	1	2	3
DER	5.01e-2	1.08e-2	2.48e-3	5.02e-2	1.13e-2	5.16e-3	5.05e-2	1.07e-2	1.07e-2
PDER	6.90e-4	8.90e-4	6.00e-5	5.40e-4	8.10e-4	2.90e-4	6.60e-4	8.50e-4	8.90e-4
FDR	1.80e-3	1.17e-3	2.60e-4	1.72e-3	1.14e-3	6.10e-4	1.65e-3	1.03e-3	1.07e-3
DER: 误检测率 FDR: 盲传输格式误检测率 PDER: 净误检测率									

群融合算法依然保持了较好的误检测率指标。

考虑到实际应用环境中语音编码的传输格式有一定周期,基于融合法的蚁群算法速率判决在实际应用中收到了较为满意的效果。

根据仿真结果综合分析,蚁群融合法的性能提升主要来源于以下方面:

- (1) 采用了基于融合的检测方法取代了现有的基于分支判决的检测流程。
- (2) 对于不同的CRC比特数,在检测流程中引入了不同的权重。
- (3) 提出了蚁群融合量判据。

3 结束语

盲传输格式检测是WCDMA终端侧接收语音业务时必须进行的步骤,其性能的优劣直接影响到后续语音处理的质量。文章一改传统分支判决的思路,采用融合法作为判决的基本方案,并将蚁群融合量引入了融合过程,在计算机仿真和芯片应用实践中均获得了显著的性能改善。为同类系统中盲检测设计提供了一种新的选择。

参考文献

- [1] 3GPP TS 25.211(Release 9). Technical Specification Group Radio Access Network Physical Channels and Mapping of Transport Channels on to Physical Channels (FDD)[S]. 2012:51-54.
- [2] 3GPP TS 25.212(Release 9). Technical Specification Group Radio Access Network Multiplexing and Channel Coding (FDD)[S]. 2012:102-104.
- [3] MAO W M, BROWN T. Optimal Blind Transport Format Detection for the UMTS uplink[J]. IEEE Transactions on Communications, 2008,56(6):866-870.
- [4] LI P, WANG S, LUO X. Blind Rate Detection for CDMA2000 1x EV-DO Reverse Traffic

channel[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO '09), Dec 19-23, 2009, Guilin, China. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009:2244-2248.

- [5] HU Y, WU S, GENG H. Improvement on Blind Symbol Rate Detection under Unfavorable Conditions[C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Communications and Intelligence Information Security (ICCIS '10), Oct 13-14, 2010, Nanning, China. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2010:29-35.
- [6] 张家杰, 吴更石. 传输格式检测方法、装置以及通信系统[P]. CN 201010603655.X, 2011.
- [7] 白杨, 景新幸. EVRC语音编解码算法的研究及实现[J]. 电声技术, 2008,32(3): 53-55.
- [8] WU C. Ant Colony Multilevel Path Optimize Tactic Based on Information Consistence Optimize[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM '10): Vol 1, Oct 22-24, 2010, Taiyuan, China. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2010: 533-536.

作者简介



邱宁, 东南大学信息与通信工程专业硕士毕业; 现为中兴通讯股份有限公司微电子专家委员会委员、3G算法组组长; 主要研究领域为移动通信终端基带芯片物理层关键技术。



李强, 东南大学信息与通信工程专业博士毕业; 现为中兴通讯股份有限公司算法设计部部长; 负责通信基带芯片的算法研究与设计工作。



陈玉, 东南大学信息与通信工程专业博士毕业; 现为中兴通讯股份有限公司微电子专家委员会委员, 手机芯片开发团队总体资深系统工程师; 主要研究领域为移动通信终端基带芯片物理层关键技术。

大数据

3

于艳华/YU Yanhua, 宋美娜/SONG Meina

(北京邮电大学计算机学院, 北京 100876)

[编者按]数据是与自然资源一样重要的战略资源,大数据技术就是从数量巨大、结构复杂、类型众多的数据中,快速获得有价值信息的能力,它已成为学术界、企业界甚至各国政府关注的热点。本讲座将分3期对大数据进行讨论:第1期介绍了大数据的提出、含义、特点,大数据和云计算的关系以及大数据典型应用;第2期介绍大数据获取、存贮、搜索、分享、分析、可视化等方面的关键技术,并对当前热点技术—可视化进行重点分析;第3期探讨数据流挖掘等实时数据分析技术,介绍大数据中非结构化数据处理和挖掘技术,并给出大数据发展面临的挑战与应用前景。

中图分类号: TN91 文献标志码: A 文章编号: 1009-6868 (2013) 03-0057-06

7 数据挖掘和数据流挖掘

7.1 大数据挖掘技术的简介和分类

大数据技术广义上包括大数据相关的获取、存储、处理、挖掘等技术,但就美国政府2012年提出的“大数据研究与发展计划”而言,它主要指的是面向大数据的数据挖掘、机器学习技术。此期重点介绍大数据中的数据挖掘技术,重点是数据流挖掘技术。

数据挖掘技术是一个涉及数据库、机器学习、统计学、神经网络、高性能计算和数据可视化的多学科领域,是计算机模仿人类学习机理和方法,利用数据自动获取知识的一种技术。数据挖掘出现于20世纪80年代末,在过去的20年中得到了广泛的研究和快速的发展,表现在出现了大量的算法,并可以处理各种类型数据。然而随着大数据时代的来临,数据挖掘技术迎来了空前广泛的应用机会,也面临新的挑战。大数据是伴随智能终端的普及和互联网上微博、社交网络等业务的广泛应用而出现

的,因此面向大数据的数据挖掘的应用首推Google、Amazon、Yahoo、阿里巴巴等互联网公司,比如2009年甲型H1N1流感爆发时,Google利用海量的用户搜索词及其组合,比美国国家疾控中心更及时更准确地报告了疫情;Amazon公司首先提出并应用协同过滤技术进行书籍推荐,其应用效果超过了之前被誉为“公司皇冠之上宝石”的书评团队,开启了电子商务应用中商品推荐的先河。基于互联网上海量语言材料应用机器学习技术的Google语言翻译系统,则是目前为止最为成功的计算机自动翻译系统。面向大数据的数据挖掘技术的一个挑战是:大数据时代我们能得到现象相关的所有数据,即统计学上所说的总体,而不再是传统的统计学和数据挖掘中一个容量有限的样本或容量有限的训练集。另外一个挑战是所得到的数据不是绝对精确的,只要在保证速度的前提下近似地反映宏观和整体情况^[12],这一挑战要求数据挖掘要能处理非结构化数据和含噪音的数据,而挖掘结果的正确性则只要保证在期望的区间内。目前来看,应对这两个挑战的主要技术之一就是

数据流的挖掘。

数据挖掘技术主要分为如下几个分支:分类、聚类、关联规则挖掘、序列模式挖掘、异常点挖掘、时间序列分析预测等。在大数据的相关挖掘应用中,虽然处理的数据形式更丰富,但就学习方法来看并没有根本差别,因为全部是基于数字化后信息的学习。

7.2 概念漂移

“概念漂移”是Schlimmer等人于1986年首次提出的^[13]。大部分的数据挖掘技术都有一个假设前提:样本是随机获取的,并且服从同一稳定的分布。然而在大数据场景下,数据源源不断地到来,样本具有不稳定和不确定性。例如,顾客的购买兴趣随着时间很有可能发生变化;用户上网的浏览习惯也会随着时间的推移而发生明显地改变。因此大数据场景中不可避免的,一定要考虑概念漂移问题。如图8,样本的统计特性在某一时刻开始发生变化,我们认为此时发生了“概念漂移”。

从样本是否服从相同分布的维度,可以将数据流划分为2类:稳定

收稿日期: 2013-03-21
网络出版时间: 2013-05-07

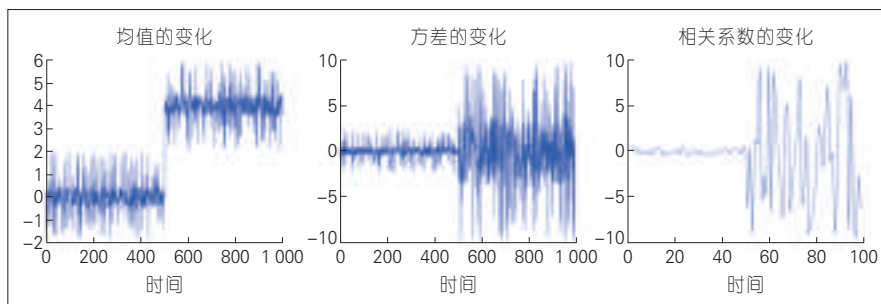
数据流,样本服从同一分布;动态数据流,随着时间推移,样本服从不同分布,只有动态数据流中才存在“概念漂移”现象。概念漂移又可以分为:突变式和渐变式,对这两种漂移的处理方式和难度通常并不相同,在设计漂移算法时,应该分别进行考虑。如图9所示,在 t_0 时刻之前,数据样本服从同一分布A,而在 t_0 和 t_1 之间,数据流发生概念漂移,在 t_1 时刻之后,数据重新趋于稳定,并服从同一分布B。

当概念漂移发生之后,最直接的结果就是从之前样本中学习获得的概念模型,已经不再适用,必须尽快更新。现有概念漂移检测的方法,可以分为3类:模型性能监测法、概念聚类法、样本分布监测法。

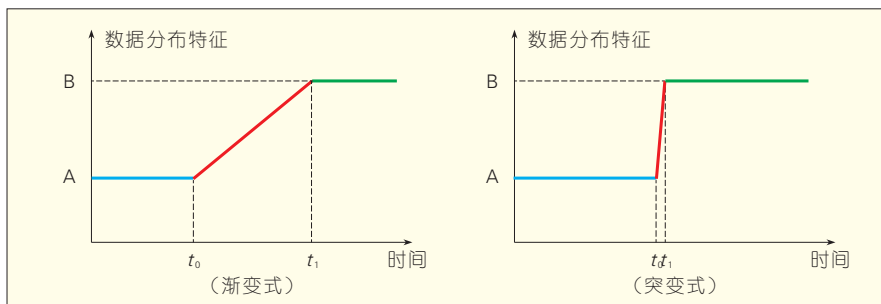
(1)模型性能监测法。以分类挖掘为例,首先需要对分类器的性能进行跟踪监测,当使用新采集的训练集,对现有分类器进行更新之后,如果分类器在测试集上表现出的性能明显下降,我们则认为发生了概念漂移。Windmer 和 Kubat 提出的 FLORA 系列算法^[14]、Last 提出的 OLIN 算法^[15]等都是属于这一类。模型性能监测是十分常用的方法,但当数据流中存在类别不平衡或者进行半监督学习时,此方法将不再适用。

(2)概念聚类法。Katakis 在 2010 年首次提出这一方法^[16],基本思路是将数据流划分为数据块,并且再将其映射为“概念向量”,对多个概念向量进行聚类,每一个聚类代表一个概念。当一个新的数据块到来时,计算其对应的概念向量与各个聚类中心之间的距离,并以此判断是否发生了漂移。这一方法可以解决概念漂移领域的一个重要问题:重复概念的检测。概念聚类法局限的地方在于:假设每次划分的数据块内所有数据都属于同一概念。

(3)样本分布监测法。针对样本集,提取其中的统计特性:特征值分布等,以这些参数的变化来判断是否



▲图8 概念漂移



▲图9 概念漂移:渐变式和突变式

发生概念漂移。2006–2011 年间, Alippi^[17-18]、Peter^[19]、Kuncheva^[20] 等都是基于此原理提出了检测概念漂移的具体策略。

7.3 聚类

Han Jiawei 教授在《Data Mining: Concept and Techniques》中,对聚类有一个简短的定义:将物理或抽象对象的集合分成相似的对象类的过程称为聚类。更形式化的一个描述方法是:聚类分析就是按照某种相似性度量方法对对象进行分组,使得各组内的相似度高,而组间的相似度低。俗语“物以类聚,人以群分”可以说是聚类作用的一个生动说明。

聚类挖掘已广泛用于各种应用领域的模式识别以及离群点检测中。市场分析人员可以在没有任何先验知识的情况下,应用聚类方法基于购买模式数据库发现不同的顾客群;网络数据分析人员针对 web 文档数据或网络访问日志数据对访问的网页进行聚类,以发现对不同网页信息感兴趣的人群,来支持精准营销或分析社会学上原因。应用聚类还可

以发现异常点,即那些无法归入任何簇的点,离群点检测广泛应用于信用卡欺诈检测和监控电子商务中的犯罪活动。聚类分析还可以作为研究数据分布的功能以及作为其他算法的预处理步骤。

从 1967 年研究人员提出第一种聚类算法开始,目前为止已经有多种可用的聚类算法。但是没有任何一种是普遍适用的,因为不同问题中数据的维度高低不同、各维数据特性不同、数据分布情况不同、数据规模不同,而随着大数据时代数据流的出现,对聚类算法更提出了内存限制、处理时间限制等挑战。但这些算法可以按照聚类依据不同进行分类,首先总体分为 2 大类:基于样本的聚类、基于变量的聚类。其中,基于样本的聚类人们研究的比较多,前面的聚类举例也全部是针对基于样本的;基于变量的聚类顾名思义就是对变量(即维度或属性)进行分组,它和数据分析中的因子分析及主成分分析(PCA)比较像;但聚类分析并不会对变量进行合并,只是用层次式等方法对变量的远近亲疏程度进行判别。

在某些领域,基于变量聚类非常有用,比如传感器网络、社会网络、电力供应、股票市场上,比如通过聚类分析我们可以发现各支股票之间的关系,而通过流数据聚类则可以发现这种关系的变化情况。

基于样本的聚类是目前为止研究的最多,这些算法又可以分为:基于划分的聚类、基于层次的聚类、基于网格的聚类、基于密度的聚类、基于模型的聚类。对流数据的聚类也是在这些聚类算法的基础上发展而来的,因此,接下来简要介绍下这几类聚类算法及其特点。

7.3.1 基于划分的聚类

经典的聚类算法 k -means 就是基于划分的,这种算法之所以应用广泛是因为其简单快速。但该算法需要人为设定一个代表聚类个数的参变量 k ,如何正确设置这个值是个难题。另外, k -means 算法的理论基础是找到 k 个点(所谓中心点 centroid)使得相应簇中的点到这 k 个点的距离平方和最小。由此可见,采用这种理论所找到的簇是球形的,而且这种方法对噪声和孤立点敏感。而 k -中心点法则是克服了这个问题的另一种基于划分的聚类算法。为了处理大规模数据集,人们在这些算法基础上进行了改进,提出一些新的算法如最大期望算法(EM)、基于随机选择的聚类算法(CLARANS)等。

对数据流聚类时,因为流数据不断到达,所以无法在数据完全到达后进行聚类,部分数据上的聚类结果也很可能不再适用后面到达的数据,因此必须进行增量式聚类。而且,为了及时对后面很快到达的数据进行处理,每次的聚类操作必须在指定时间内完成,同时内存也要不断腾出来配合下一次聚类操作。当然,聚类结果可能达不到理论上的完美效果,但是要有尽可能好的效果,最好这个结果和理想结果差多少有一个理论上的范围。这些问题其实是所有流数据

挖掘和静态数据的区别所在:要在有限内存有限时间内给出一个准确性有一定保证的挖掘结果,

Farnstrom 等人提出的一趟 k -mean 算法是适应流数据挖掘的 k -means 算法,它只对数据进行一趟扫描,当然历史结果的保存需要采用一种叫做聚类特征的概要数据。Domingos 和 Hulten 在此基础上提出的快速 K 均值算法(VFKM)则对每次增量聚类时需要的样本个数给出了理论上计算方法,其采用的理论基础是 Hoeffding 不等式,这个不等式和契比雪夫不等式性质类似,都是对于一个分布特性未知的随机变量,已知很少量的统计参数,可以在任意置信度之下计算出相应的置信区间。而 Guha 等人则提出了数据流聚类的 k -中心点算法,并给出所需的样本个数及所需时间和空间的理论计算结果。

7.3.2 基于层次的聚类

层次聚类也是一种常用聚类方法。它不再是只给出 k 个聚类而成的簇,而是给出多层的树状聚类结果。层次聚类又可分为凝聚和分裂两类,分别采用自底向上和自顶向下两种方法。BIRCH 算法则综合了这两种方法。

Aggarwal、J. Han 等人提出的 CluStream 算法则是 BIRCH 算法在数据流挖掘上的扩展。该算法的特征之一是:提出了倾斜时间窗口的概念,依据较近的数据比历史数据更重要的理念,最近的时间变化以较细的时间粒度刻画,而离现在较远的数据则采用较粗的时间粒度。该算法的另一个重要特点是,整个流聚类分为在线和离线两部分。在线部分增量式进行数据处理,获得摘要信息微簇(micro-cluster),离线部分宏簇(macro-cluster)通过对在线部分的结果进行再处理获得层次的聚类结果。

7.3.3 基于网格和密度的聚类

基于密度的聚类不再按之前两

种聚类采用的距离的远近作为分划的依据,而是按照单位空间范围内点的个数即密度来划分空间,只要某一范围内密度大于某一指定参变量,则认为是同一簇。基于密度的聚类算法(DBSCAN)、通过对象排序识别聚类结构算法(OPTICS)等是经典基于密度聚类算法。

基于网格的聚类是面向时空相关问题。它采用一个多分辨率的网格数据结构,这些网格把空间量化为有限数目的单元,所有聚类操作都在这些网格上进行。这些方法的主要优点是处理速度快,独立于数据对象数目,只与每一维上的单元数目相关。经典算法是信息网格算法(STING)、WaveCluster,而 Quest 上聚类(CLIQUE)则综合了密度和网格两种方法。

在流数据聚类中,分形聚类则是一种基于网格的聚类,它将具有相同分形维的具有高自相似性的点分为一类。

7.3.4 基于模型的聚类

基于模型的聚类其实是把回归拟合应用在聚类中,它为每一簇拟合一个模型,根据拟合模型的方法不同又分为统计学方法和神经网络方法,属于前者的有简单增量概念聚类算法(COBWEB)方法,属于后者的有学习矢量量化网络(LVQM)、自组织映射(SOM)等方法。

7.4 数据挖掘中的分类

数据挖掘中的分类指的是:首先根据已知类别的一些样本进行学习,得到一个分类的规则或者说是模型,然后利用学习得到的模型对另外一些类别未知其他属性值已知的样本进行类别的判断或者预测。可以看出,分类和聚类的不同之处在于:分类学习时,样本类别是已知的;而聚类学习时,样本类别甚至类别数目是未知的。因此前者是有监督的学习,后者则是一种无监督的学习。分类

学习的一个经典的例子是对银行现有的顾客信用信息进行学习,建立信用良好或欺诈客户的判断模型,当一个新的顾客申请银行借贷时,利用学习模型进行判断,给出新客户良好或是欺诈客户的可能性,从而提高银行业务决策的科学性。

典型的分类方法有很多,主要包括基于决策树(DT)的分类、基于贝叶斯(Bayesian)分类、基于神经网络的分类等。决策树分类是基于信息论中的信息熵的概念,学习结果是一个由各个属性及其取值形成的代表判断流程的树状结构,称为决策树。典型的算法包括ID3、C4.5等。适用于大规模数据集决策树构造的算法则有Quest上的有监督学习(SLIQ)和可伸缩并行决策树(SPRINT)等。贝叶斯分类算法基于统计学中的贝叶斯后验概率定理,并应用各属性间类条件独立的朴素假定,方法简单,可伸缩性好,很多实验表明其分类效果与复杂的决策树和神经网络相媲美。

传统的分类方法多是非增量式的,即当全部训练样本准备好之后,对样本集进行多次扫描,获得一个分类器,例如工业界广泛应用的分类算法C4.5和CART;而数据流场景下,由于数据源源不断地到来并且数据量巨大,完全将数据存储下来再进行处理,是无法实现的,这就要求分类算法必须是增量式的,即训练样本集不能一次性全部获取的情况下,先利用已经获得的样本集来建立分类器,再用新到达的样本来修正分类器。

快速决策树算法(VFDT)是由Domingos、Hulten等人在2000年提出的^[20],主要用于解决稳定数据流的分类问题,性能渐近逼近传统的C4.5算法,其基本思路为:利用Hoeffding不等式来保证选取的分裂属性的可信程度,并且不断地将叶子节点替换为中间节点(决策节点),最终生成一棵决策树。其中每个叶节点都保存着样本属性值的统计信息,这些信息将用于选取分裂属性。当一个新样本

到来后,它将沿着决策树从根节点向叶节点去遍历,它在树的每个中间节点都进行属性值判断,并进入不同的分支,最终到达叶节点,并更新叶节点上的统计信息。每隔一段时间重新评估每个叶节点,选取满足Hoeffding不等式的属性,进行分裂。

现在通过一个简单的实例,来说明VFDT算法的基本过程。如图10所示,假设从 t_0 时刻开始进行挖掘,样本源源不断地到来,此时节点1是叶节点(根节点),样本到达节点1之后,更新其中的属性值统计信息,并判断是否有属性满足Hoeffding不等式;假设在 t_1 时刻,一个样本到达后,节点1内某一属性满足Hoeffding不等式,则按照此属性进行分裂,产生节点2和节点3,节点1由叶节点变为中间节点;此时, t_0 到 t_1 之间所有到达样本的统计信息,都被舍弃;从 t_1 时刻起,所有新到达的样本数据,根据节点1中的属性分裂条件,到叶节点(达节点2或者节点3),并更新叶节点中的统计数据,同时判断是否有属性满足Hoeffding不等式,若有则继续进行分裂生长。从上述过程可以看出,决策树每次进行生长时,都会单独占用并消耗一部分数据:节点1分裂时,消耗了 t_0 到 t_1 之间所有到达节点1的样本,这些样本将不再对此后决策树的生长产生任何影响;当节点2分裂时,消耗了 t_1 到 t_2 之间所有到达节点2的样本,这些样本将不再对此后决策树的生长产生任何影响。

基于VFDT算法,Hulten、Domingos等人于2001年提出可以解决概念漂移问题的概念自适应快速决策树算法(CVFDT)。此后近十多年时间里,

针对VFDT算法拓展和应用的层出不穷,CVFDT算法都取得了不错的性能测试效果。然而在2012年Rutkowski等人在TKDE上发表一篇文章指出,VFDT算法中使用的Hoeffding界不符合数据流的应用场景,应该改为McDiarmid's界^[22]。这一点感兴趣的读者可以自己查阅,但不可否认的是在各式各样的测试数据集上,VFDT确实显示出令人满意的测试性能。

此外,数据流中经典的分类算法还有:基于模糊信息网络的2002年Last提出的OLIN算法等。特别要说明的是,近几年在数据流分类挖掘中,基于单分类器的集合分类器方法得到了较广泛的研究和应用。

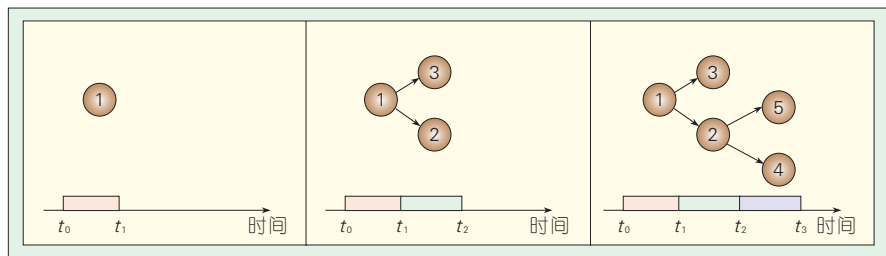
7.5 频繁模式挖掘

7.5.1 关联规则挖掘算法

关联规则挖掘算法的基本概念包括两个方面的内容:项以及项集,其中项是基本单元,用来表示实际环境中的单个具体事物,例如在超市购买的物品;项集是由一个或者多个项组成的集合,表示的是具体的一次事务,例如顾客的一次购买行为,在项集内部,项与项之间不存在次序关系。而所谓的关联规则是形如 $X \rightarrow Y$ 的蕴涵表达式,其中 X 和 Y 是不相交的项集,即 $X \cap Y = \emptyset$ 。通常的关联规则算法主要分为两个步骤:

(1)产生频繁项集。其目标是发现满足最小支持度阈值的所有项集,并将这些项集称为频繁项集。

(2)产生关联规则。分解频繁项集,获取满足最小置信度的规则集,并将这些规则称为关联规则。



▲图10 VFDT算法

其中,支持度表示给定数据集的频繁程度,而置信度是指在包含的事务中出现的频繁程度。

关联规则算法是由 R.Agrawal 首次提出的,称为 Apriori 算法。它采用“支持度—置信度”的框架产生关联规则集,其影响深远,后续许多算法都是基于其思想提出的,并统称为类 Apriori 算法。该类算法首先是利用 k -频繁项集,计算得到对应的 $(k+1)$ -候选项集;其次利用先验定理(频繁项集的子集一定是频繁项集)裁剪非频繁项集;最后使用支持度裁剪机制获取 $(k+1)$ -频繁项集。之后重复上述迭代过程,直到无法产生新的频繁候选项集为止。其算法的缺点是产生过多的候选项集,并且多次扫描数据库。

另一个有影响深远的算法是 FP-growth 算法,针对 Apriori 算法多次扫描数据库的缺点,FP-growth 算法设计了一种 FP-Tree 的数据结构体,通过读取一次数据库将其所有的数据压缩到一棵 FP-Tree 上,并通过循环产生前缀序列的 FP-Tree,获取对应的频繁项集。该算法的优点在于利用 FP-Tree 结构压缩原始数据集,缩小搜索范围,快速产生频繁项集。

通过多年的发展,目前关联规则算法已经定义了许多新类型的模式,如模糊关联规则、稀有关联规则、基于权重的关联规则等。由于关联规则算法的日趋成熟,其相应的研究热点已经从如何产生关联规则逐渐转变为如何产生有效的关联规则,例如目前有效规则的一个研究热点是如何挖掘高“效用”的关联规则^[23]。

7.5.2 频繁序列模式挖掘算法

频繁序列模式挖掘算法是由 Agrawal 和 Srikant 首次提出的,并且随着其被广泛应用在分析用户的购物习惯、异常行为检测以及网络入侵检测等应用场景中,序列模式挖掘算法的研究取得了迅猛发展。从宏观上讲,序列模式的组成包括3方面的内

容:序列、事件(事务或者项集)以及项,它们三者之间的关系是序列是由一个或者多个事件组成的,而事件是由一个或者多个项组成的;在组成序列的事件中,事件与事件之间存在着先后时间关系,而在组成事件的项中,项与项之间不存在先后时间关系。

频繁序列模式依据产生序列模式的方法不同可以分为两种:一种可以被称为类 Apriori 算法,其基于“候选—测试”的思想,利用前一步产生的 k -频繁序列模式,产生 $(k+1)$ -频繁序列模式候选集,并利用支持度测试的裁剪机制,从而获取最终的 $(k+1)$ -频繁序列模式集。其具有代表性的算法包括:AprioriAll 以及 SPADE^[24]算法,其中图 11 展现了使用 SPADE 算法产生新的候选序列的过程。

如图 11 所示,SPADE 算法使用树形结构,利用上层的 2-频繁序列模式 a_1-b_1 以及 a_1-d_1 产生 3-频繁序列模式 $a_1-b_1-d_1$ 。类 Apriori 算法的优点是可以挖掘出在限制条件下所有的频繁序列模式集,其缺点是有些类 Apriori 算法会在产生频繁序列模式集的时候,多次扫描数据库,增加算法的 I/O 操作;其次在产生频繁序列模式的时候,会产生大量的无用候选序列,增加算法的计算时间,降低算法的挖掘效率。

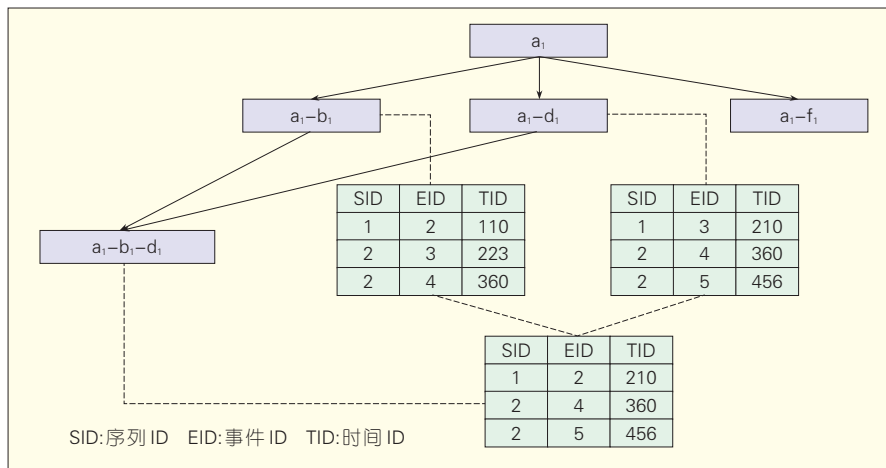
另一类算法是采用“投影”技术,依据不同的前缀序列对原始数据集

进行划分,并通过不断更新前缀序列以及划分数据集的操作,最终获取完整的频繁序列模式集,其具有代表性的算法是 PrefixSpan^[25]。图 12 显示了利用“投影”技术,获取的原始数据集中所有 1-前缀序列所对应的投影数据库:

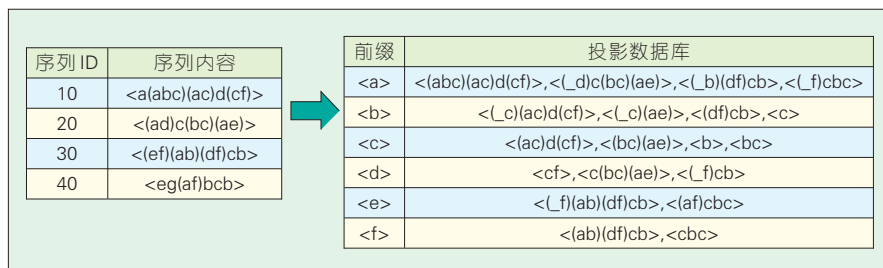
在图 12 中显示了利用“投影”技术,获取原始数据集对应的所有 1-前缀序列的投影数据库。其算法的优点在于利用“投影”技术可以将原始数据集的规模不断缩小,以缩小算法的搜索范围,同时由于各个前缀的投影数据库是相互独立的,所以可以并行地挖掘对应的各个投影数据库,提高算法的挖掘效率;该算法的缺点是如果前缀序列在原始序列集中分布均匀,即对应的投影数据库变小趋势缓慢,则无法缩小算法的搜索空间。根据算法挖掘结果的不同,可以将序列模式算法分为:全集频繁序列模式挖掘算法、闭合频繁序列模式挖掘算法以及最长频繁序列模式挖掘算法等。

7.5.3 基于数据流的频繁序列模式挖掘算法

由于数据流具有无限性以及动态性的特点,因此传统的频繁序列模式挖掘算法已经无法适用于数据流对象,如何在数据流中获取频繁序列模式已经成为了序列模式挖掘算法



▲ 图 11 SPADE 算法新频繁序列生成过程



▲图 12 原始数据集转变为投影数据库

中的一个研究热点,由于其尚处在一个发展阶段,大部分的算法还是在原有的数据流基本算法的基础上,结合序列模式挖掘算法设计完成的。根据使用不同基本算法,数据流挖掘算法大致可以分为3类,第1类是利用给定的界限值,挖掘近似的频繁序列模式集;第2类是设计一种新的滑动时间窗口,基于批处理的思想,挖掘频繁序列模式集;第3类是设计一种新的数据结构,例如FP-Growth中的FP-Tree结构体,保存对应的压缩信息,结合滑动时间窗口,挖掘频繁序列模式集。根据数据流动态变化的性质,又可以将数据流挖掘算法分为两类,一类是针对分布固定不变的数据流对象,挖掘近似完备的频繁序列模式集,另一类是针对动态分布变化的数据流对象,检测数据流中出现的“概念漂移”的现象,解决模型失效的问题。

8 结束语

物联网兴起,互联网高速发展,各种信息普遍数字化,PB级数据广泛出现,云计算和云存储技术都在改变人们使用计算机使用信息服务的方式,企业依托海量数据学习来解决以往无法解决问题,互联网企业则利用数据挖掘技术获得高额利润和社会影响力,这些都意味着大数据时代的来临。大数据的获取和应用对企业来讲,意味着经济效益,Google、Yahoo、阿里巴巴等是大数据应用获益的典型代表;对科技界来讲,意味着新的科学研究方法甚至是新的科研范式;而大数据对政府而言则是与

人力资源、自然资源一样重要的国家战略资源。但是,在大数据的研究和应用中,存在着很多问题和挑战,包括:(1)传统关系数据模型无法高效处理非结构化和半结构化数据,以MapReduce和Hadoop为代表的非关系数据分析技术在应用性能等方面仍存在很多问题,尚没有一个像当年Codd所提出的关系数据库那样的理论来统一解决非结构化处理问题。(2)适合不同行业的大数据挖掘分析工具和开发环境。不同行业需要不同的大数据分析工具,当前跨领域跨行业数据共享仍存在很多壁垒。(3)数据隐私保护。大数据以数据的共享为基础,但如何同时保护用户的隐私则是需要解决的问题。相信随着大数据技术问题逐步解决,大数据应用必将给我们社会和生活带来更多的正能量。

参考文献

- [12] MAYER-SCHONBERGER V, CUKIER K. 大数据时代:生活、工作与思维的大变革[M]. 盛杨燕,周涛,译. 杭州:浙江人民出版社,2012.
- [13] Schlimmer J C, Granger R H Jr. Incremental Learning from Noisy Data[J]. Machine Learning, 1986, 1(3): 317-354.
- [14] Gerhard W, Kubat M. Effective Learning in Dynamic Environments by Explicit Context Tracking[C]//Proceedings of the European Conference on Machine Learning (ECML'93), Apr 5-7, 1993, Vienna, Austria. Berlin, Germany: Springer, 1993.
- [15] Last M. Online Classification of Nonstationary Data Streams[J]. Intelligent Data Analysis, 2002, 6(2): 129-147.
- [16] Katakis I, Tsoumakas G, VLAHAVAS L. Tracking Recurring Contexts Using Ensemble Classifiers: An Application to Email Filtering[J]. Knowledge and Information Systems, 2010, 22(3): 371-391.
- [17] Alippi C, Roveri M. Just-in-time Adaptive Classifiers—Part II: Designing the Classifier [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(12): 2053-2064.

- [18] Alippi C, Boracchi G, Roveri M. An Effective Just-in-Time Adaptive Classifier for Gradual Concept Drifts[C]// Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN'11), Jun 31-Aug 5, 2011, San Jose, CA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1675-1682.
- [19] Vorburger P, Bernstein A. Entropy-Based Concept Shift Detection[C]// Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'06), Dec 18-22, 2007, Hong Kong, China. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2006: 1113-1118.
- [20] Kuncheva L I. Change Detection in Streaming Multivariate Data Using Likelihood Detectors[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2013, 25(5): 1175-1180.
- [21] Domingos P, Hulten G. Mining High-Speed Data Streams[C]//Proceedings of the 6th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'00), Aug 20-23, 2000, Boston, MA, USA. New York, NY, USA: ACM, 2000: 71-80.
- [22] Rutkowski L, Pietruczuk L, DUDA P. et al. Decision Trees for Mining Data Streams Based on the McDiarmid's Bound[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, To be published.
- [23] Tseng V S, WU C W, Shie B E, et al. UPGrowth: An Efficient Algorithm for High Utility Itemset Mining[C]//Proceedings of the 16th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD'10), Jul 25-28, 2010, Washington, DC, USA. New York, NY, USA: ACM, 2010: 253-262.
- [24] Zaki M J. SPADE: An Efficient Algorithm for Mining Frequent Sequences[J]. Machine Learning, 2001, 42(1/2): 31-60.
- [25] Pei J, Han J W, MORTAZAVI-ASL B, et al. PrefixSpan: Mining Sequential Patterns Efficiently by Prefix-Projected Pattern Growth[C]//Proceedings of the 17th International Conference on Data Engineering (ICDE'01), Apr 2-6, 2001, Heidelberg, Germany. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 215-224.

作者简介



于艳华, 北京邮电大学计算机学院副教授; 主要研究方向为网络管理与优化、数据挖掘等; 已发表论文 10 余篇, 申请专利 10 余项。



宋美娜, 北京邮电大学计算机学院教授; 主要研究方向为分布式系统、服务计算、数据工程等; 已发表论文 50 余篇, 申请专利 20 余项。