

引用本文:唐晓军,孙春,赵臻青,等.光通信未来10年关键技术挑战[J].光通信技术,2021,45(8):1-7.

光通信未来10年关键技术挑战

唐晓军,孙春,赵臻青,周敏,马军棋,周恩宇,王建峰,何慧

(华为技术有限公司,广东深圳 518129)

摘要:面对高流量的增长趋势,光通信网承受着巨大的升级压力,现有的技术与设备即将无法满足业务发展的需求。针对此问题,前瞻性地提出光通信未来10年的关键技术,涵盖容量、频谱、下一代光纤、算法、网络规划、光交叉连接、新型光接入、卫星光网和光电集成九大领域。

关键词:光通信;容量;频谱;算法

中图分类号:TN929.11 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2021)08-0001-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.08.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Key technology challenges of optical communication in the next ten years

TANG Xiaojun, SUN Chun, ZHAO Zhenqing, ZHOU Min, MA Junqi, ZHOU Enyu, WANG Jianfeng, HE Hui

(Huawei Technologies Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518129, China)

Abstract: In the face of the growth trend of high traffic, optical communication network is under great pressure to upgrade, and the existing technology and equipment will not be able to meet the needs of business development. In view of this problem, the key technologies of optical communication in the next ten years are prospectively put forward, covering nine fields: capacity, spectrum, next generation fiber, algorithm, network planning, optical cross connect, new optical access, satellite optical network and optoelectronic integration.

Key words: optical communication; capacity; spectrum; algorithm

0 引言

2021年3月,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》^[1]和《2021年国务院政府工作报告》^[2]均明确提出要加快千兆光网建设。工信部也出台了《“双千兆”网络协同发展行动计划(2021-2023年)》^[3],明确了我国千兆光宽带和光传输网发展的建设标准和发展方向。欧洲电信标准协会(ETSI)在2020年初正式定义了固网代际,发布了第一个F5G全光网标准Release。因此,光通信的地位和作用在国内外都越来越重要。华为在光通信领域潜心耕耘超过25年,具备国际领先技术水平,本文

收稿日期:2021-07-09。

作者简介:唐晓军(1972—),男,物理电子学及光电电子学博士,华为光产品线首席技术规划师、技术规划部部长。1998年加入华为以来,历任开发部长、PDT经理、PDU部长和海外产品线代表等职,长期致力于光通信的产品研发和技术研究,目前主导开展光领域的先进技术规划、发展及项目落地等工作,推进光产业的长期技术演进及发展。



基于对光通信业务和技术的理解,提出未来10年可能遇到的关键技术挑战。

1 长途光系统单纤容量能否超过100T

互联网数据业务的爆炸式增长是长途光系统发展的主要推动力。过去20年,数据业务每年增速超过25%,促使长途光系统不断追求单纤容量的持续翻番。长途光系统先后经历了20世纪的2.5G波分系统、10G波分系统,至2008年,中国率先进入40G波分系统时代;2010年,业界从模拟传输系统进入划时代的数字相干传输系统时代,更是推动了长途光系统的普遍部署,数字相干光系统成为全光网络建设主流,当前正处于200G相干光系统(200G×80波)阶段。经过20年的发展,长途光系统现已具有如下特征:长途网络传输距离不低于1200 km;主要使用C波段频谱,波长通道间隔为50 GHz或25 GHz倍数关系;站间跨距为80 km左右。

1.1 400G×80 波相干光系统发展

下一代长途干线将走向 400G 时代,单纤容量从 16T(200G×80 波)倍增到 32T(400G×80 波),预计 2024 年迎来规模商用。行业正在如下几方面进行技术创新:

◆400G 高性能光电模块。通过高性能算法、高带宽光电器件和更高制程芯片工艺的进步,获得更高频谱效率(SE)的 400G@125 GHz 相干光电模块,性能与 100G/200G 正交相移键控(QPSK)基本相当。

◆C+L 波段更宽的可使用频谱。在 L 波段的铒纤材料掺杂工艺上创新,实现 L 波段的掺铒光纤放大器(EDFA)增益、噪声指数(NF)满足光系统应用要求,从而将可利用频谱从 Super C(6 THz),向 Super C+L 波段(10~12 THz)扩展。

◆其它技术创新。例如,如何实现稳态的宽谱光系统,以抵消系统非线性效应影响,以及网络自动化运维等方面的创新。

1.2 单纤 100T 容量(1.2T×80 波)的技术方向

根据香农定理的通信信道容量约束,基于已铺设的 G.65x 光纤信道,需要从 SE、可用频谱和信噪比三方面研究创新:

◆提高 SE。将 SE 从 2.67(对应 400G@125 GHz)提高到 4(对应 1.2T@300 GHz)左右。这主要需要从算法、光电器件以及先进工艺这三方面来持续提升。

◆扩展可用频谱。拓宽现有可用频谱 150%,从 Super C+L(10 THz 宽度)扩展到 C+L+S+U/E 波段(总宽度>24T)。这主要需从光纤放大材料、光放大器新架构方向取得突破。

◆提高信噪比。一方面研究更高性能算法,以恢复数字信号;另一方面,可以通过改变组网拓扑和加密中继站点,加密跨距由 80 km/跨距调整为 40 km/跨距,提升光纤信道的信噪比。这一点需要根据网络实际情况来论证可行性。

2 C 波段之外可以利用的新频谱空间有多大

数据通信量的爆炸式增长给数据流量主要的承载系统——光网络系统带来了严峻的挑战。衡量光网络系统承载能力的关键在于光纤传输容量。提升光纤传输容量的最直接办法就是增加光纤数量,但是由于光缆的部署涉及层层审批、基建施工及民事协调环节,导致光缆的更新部署周期漫长,远远赶不上光网络升级换代的速度。因此,如何利用现有的光纤传输网络,实现单光纤传输速率的提升,已成为光纤通信领域研究的重要技术课题。

随着 5G、人工智能(AI)技术的应用推广,预计 2025 年后,全球光网络系统又将迎来新一波的技术升级,且这种升级的周期会越来越短。主流光网络系统基于波分复用(WDM)技术,扩大单纤容量主要有 2 种技术手段:一是提升单波长的传输速率,二是拓展光系统可用的光频谱。对于传输速率,可以基于新的调制理论、前向纠错(FEC)优化等光算法创新,使得 400G 长途传输得以实现;也可以是薄膜铌酸锂等新型光电材料的技术突破,实现 800G/1.6T 速率的长途传输。但是,传输算法的发展使得工程能力越来越接近理论极限,且新型高频器件的制造工艺难度越来越大,这些因素都表明单波提速技术面临巨大挑战,所以对于光纤传输系统新可用频谱的开拓,成为光网络行业实现传输容量扩展的新兴创新方向。

光纤作为光信号传输介质具有近 415 nm 的极大可用带宽,依据 ITU-T 标准分为 O 波段(1260~1360 nm)、E 波段(1360~1460 nm)、S 波段(1460~1530 nm)、C 波段(1530~1565 nm)、L 波段(1565~1625 nm)和 U 波段(1625~1675 nm)共 6 个波段。目前,光通信密集波分复用(DWDM)系统已完成 C 波段和 L 波段(1529~1611 nm)商用,仅占可用频谱的 20%左右,这也给光频谱扩展留下了巨大的发展空间(O、E、S 主要是粗波应用,频谱未充分应用)。

O 波段由于色散系数太小,暂时难以在 DWDM 系统应用;U 波段由于光纤宏弯损耗的限制,要实现工程应用还需要进一步理论突破。因此,对于光纤新应用波段的拓展主要集中在 L+(1611~1625 nm)、S(1460~1530 nm)和 E 波段(1360~1460 nm)。其中,S 波段是继 L 波段之后,近期行业集中关注和技术研究的重点。

拓展新波段光纤通信系统的关键技术基础在于开发能够满足新光谱应用的光纤放大器。目前,在 C 和 L 波段的光放大技术研究已经有了长足的进展,但关于 S 波段(1460~1530 nm)的光放大技术还处于探索阶段,如稀土元素(铥、铒)掺杂增益光纤、半导体激光器(SOA)等关键技术都对 S 波段光信号的放大和传输具有重要意义。

3 G.652 后的下一代主流光纤是什么

光纤是光通信系统的基础传输媒质,随着技术的不断发展,经历了从多模到单模的若干重要阶段,当前业界用于 WDM 系统传输的光纤主要为单模光纤(G.652、G.655、G.653 和 G.654),各种光纤的特点如下:

◆G.652 光纤是当前全球 WDM 系统传输的主流

光纤,约占全球传输光缆 65%。非相干时代因信号速率(2.5G/10G/40G)和光信噪比(OSNR)容限低,主要受色散影响,通过节点增加色散补偿模块进行长距离传输;而相干时代色散和偏振膜色散(PMD)都可以通过数字信号处理(DSP)技术补偿。因此,G.652 光纤的损耗和非线性成了相干传输的主要制约因素。

◆G.655 光纤色散系数小,在非相干时代更易于色散补偿,在早期 2.5G~40G 时代部署较多;相干时代因光纤色散小和有效截面积小导致的非线性效应强,严重限制光纤传输性能,传输距离约为 G.652 的 60%。当前无新增 G.655 光缆部署,现已使用光缆占全球光缆的 33%。

◆G.653 光纤在 1550 nm 波长处零色散,四波混频(FWM)造成 DWDM 系统波道间的非线性干扰十分严重,入纤功率低,不利于 2.5G 以上多信道 WDM 传输,因而未在世界上推广使用,当前 G.653 光缆约占全球传输光缆的 1%。

◆G.654 光纤在 1530~1625 nm 波长区间兼具超低损耗和大有有效截面积的优点。非相干时代主要用于跨洋光缆,随着相干时代到来,G.654 光纤在截止波长以上的 C 和 L 波段可提升系统传输距离。但当前 ITU 定义的 G.654E 光纤的光缆截止波长为 1530 nm,波长小于 1530 nm 的业务光和监控光在传输过程会出现高阶模式,高阶模的多光路干扰(MPI)对系统传输产生影响,且无法满足未来传输向 S、E、O 波段扩展的要求。

随着增强现实(AR)、虚拟现实(VR)、云计算和物联网等新兴业务与应用的极速发展,IP 流量快速增长,年复合率增长高达超过 30%,这意味着需要更大带宽、更大容量和更高速率的网络传送服务。业务流量的快速增长推动传送网从单波速率 100G 向 400G 甚至 800G/1.6T 速率演进,原有单模光纤的损耗、光纤有效截面积和可用频谱等因素对传输容量的影响逐渐凸显。

为了匹配距离不变、容量不断翻倍,满足波分产业发展的光摩尔规律,本文认为下一代的光纤需要具备以下特点:

◆高性能。本征损耗小(<0.14 dB/km)、抗非线性效应能力强。

◆容量大。覆盖全量或更宽的可用频谱(如 C/L/S/E/O 等波段)。

◆成本低,可工程化。易制造,成本不高于 G.652 光纤;易部署、易维护。

为具备以上特点,未来的光纤研究方向可能有但不限于以下 2 种:空芯光纤和空分复用(SDM)光纤。

3.1 空芯光纤

相对于普通光纤来说,空芯光纤具有环境不敏感、耐辐照、低色散(低于 10 ps/(nm·km⁻¹))、低非线性(利用空气比玻璃低 3 个数量级的非线性系数)、低时延(比实心光纤高 1~1.5 倍的传输速度)和低损耗(利用空气比玻璃低的瑞利散射系数)等特点,可以匹配单波速率提升、频谱扩展和高频谱效率调制码型来实现单根光纤的网络容量增加。但是,空芯光纤也存在光学性能如损耗、可制造性和成本等一系列的问题,能否成熟商用需要做进一步的研究。

3.2 SDM 光纤

SDM 光纤可分为两类:按纤芯复用的多芯光纤(MCF)和按模式复用的少模光纤(FMF)。通过二者的结合,可实现多芯少模光纤(FM-MCF),使单纤容量获得成倍提升。FM-MCF 能够实现 P 比特量级的单纤传输容量和超高频谱效率,为光纤传输容量增长提供足够的管道。当前,有多种技术路径在并行研究,并取得了一定的进展,但扇入/扇出器件引入插损、模式损耗,信号间耦合模式处理、多个空间通道放大增益一致性、多芯光纤芯间串扰和折射率设计等问题仍需继续研究解决;另外,对于多个空间信道要求多组器件、光纤间的耦合/熔接等困难、高密度纤芯设计与制造对于光纤的可量产性等工程商用领域提出了苛刻的要求,SDM 光纤能否成为下一代光纤同样需要业界专家共同来研究。

4 光信道算法能否突破非线性难题

光纤传输中,光信号产生线性和非线性失真,DSP 技术已能有效补偿光信号的线性失真。因此,光信道算法的研究重点是非线性失真的信道补偿算法。

在 WDM 传输系统中,光纤有效面积 <80 μm^2 ,即使入射光信号功率不大也会在光纤中产生非线性效应,包括受激散射效应(受激布里渊散射、受激喇曼散射)和光学克尔效应(自相位调制、交叉相位调制和四波混频)等,导致光信号在物理信道间以和不同信号通道间的失真。

光传输系统正在向单光纤 400G×80 波以及更高容量演进。一方面随着传输速率和器件带宽提升,信号对非线性失真更加敏感;另一方面光系统正在占用更宽频谱(如 C+L),意味着入纤总光功率相较 C 波段光系统更大,由此带来的信号非线性失真效应更大。因此,非线性信道补偿算法是下一代光传输系统容量进一步提升的关键因素。

非线性信道补偿算法的研究方向,除了追求补偿效果之外,还需要考虑算法在工程中实现时的复杂度问题,以便以较小的芯片资源/功耗代价实现非线性信道补偿。

信道算法研究方向包括但不限于如下方面:

◆建立非线性效应理论模型。在对非线性失真效应补偿前,需要对非线性信道进行建模仿真,并基于模型得到补偿非线性效应的理论增益。目前,经典的非线性效应理论模型包括高斯噪声模型、强化高斯噪声模型和码间串扰(ISI)模型等,以这些模型为基础,建立接近实际信道的非线性理论模型。

◆非线性效应补偿算法。研究方向包括数字反向传输(DBP)、扰动补偿算法和基于神经网络(ANN)学习的补偿算法等。

传统信道算法补偿是基于已知的发送或者接收信号分别在发送端预补偿及接收端补偿。但这种补偿方法在 WDM 系统中,因某一接收机只能接收到本通道的信息,所以对于该接收机相邻信道的信息是不可知的,无法对相邻信道信息进行补偿,存在局限性。

近年来,基于 ISI 模型的信道补偿算法补偿信道间非线性作用是可行的方案之一。ISI 模型的非线性效应可以看作随时间缓慢变化的码间串扰过程,如果能计算出部分信道间非线性效应并在接收端进行均衡,是可以部分消除信道间非线性效应的。

ANN 学习与机器学习理论发展迅速,学术界正在尝试将 ANN 机器学习方法与 DBP、扰动补偿等算法结合,演变出了一些新的补偿方法,实现非线性补偿算法的简化优化,降低实现过程复杂度。

综上所述,克服光信道的非线性信号失真,建立接近实际信道的非线性理论模型,准确且简洁的非线性补偿算法是未来光纤容量进一步提升的重要研究方向。

5 超大规模网络规划能否找到最优解

作为新时代经济社会发展的战略性公共基础设施,光纤宽带网络已被广泛应用于家庭接入、企业运营、政务服务和交通管理等领域,光网络节点的数量呈现爆炸式增长,超大规模光网络的时代即将到来。

路由与波长分配(RWA)问题是光网络规划的典型问题,早在 20 世纪就被学术界广泛研究。在网络新建或扩容阶段,RWA 旨在为网络中需要承载的每种业务寻找光路和波长,让有限的网络资源能够得到充分利用,以尽可能大地提供通信容量。然而,RWA 问题已被证明是不确定多项式(NP)难问题,其子问题波长分

配(WA)可等价于图染色问题。随着网络规模的增大,求取其最优解的难度呈指数级上升。在大规模 RWA 问题上,当前的求解方法可大致分为两类:

◆数学规划方法。学术界已经尝试使用列生成、Benders 分解和分支定价等方法求解 RWA 问题,并取得了一定的进展,但都建立在业务是可分流的假设情况下,或使用子问题分解的方式,分步求近似解。这与实际需求不相符,一定程度上松弛了原始问题的路由约束。

◆启发式算法。多采用 K-shortest path+First-fit+迭代(如禁忌搜索、基因算法和模拟退火等)的方法来求解。在 AI 兴起的潮流下,也有研究者采用强化学习的方法来解决,但 AI 求解的问题规模非常有限,一般只能求解数个至数十个节点的网络,难以应用于实际工程项目。

由此可见,上述求解方法都无法求得大规模 RWA 问题的最优解。随着网络的发展,各种新兴的数据业务应用的不断增长,网络规模越来越大,如今的网络规划问题早已脱离原始的 RWA 问题。例如,在大容量、高速光网络中,网络变得越来越复杂、地理上更加分散,故障可能在任何时间、地点以任何形式发生。因此,在网络规划时,除业务工作路由外,还需要根据不同故障场景为业务规划一条或多条保护(恢复)路由,确保可靠的网络质量和性能。

同时,业界的普遍共识是光传送网需要提供“软硬”兼备、刚柔并济的传送管道,全面满足不同形态业务(同步传输业务、准同步传输业务、以太网业务、无源光网络业务和通用公共无线接口业务等)的传送需求。不同速率的不同业务可以映射到最匹配的管道中进行统一传送。因此,除路由与波长外,还需进一步考虑不同层次大小管道之间的映射关系。

最后,随着网络规模的逐步扩张和业务量的持续增长,也衍生出了如中继最小化、网络扩容拓扑最优化等一系列新的网络规划问题。

综上所述,相比于原始 RWA 问题,当前面临的网络规划问题变得更加复杂化与多元化。在即将到来的超大规模网络中,节点数量将达到千级,业务数量将达到万级,规划这样一张超大规模的光网络将面临更加艰巨的挑战。

6 光交叉连接(OXC)能否实现超低损 128 维(D)+波长交换

数据流量的爆发式增长,对传输网络骨干节点的处理容量及调度能力提出严峻挑战。WDM 光层从原有

的光终端复用/光分插复用(OTM/OADM)的全手动光层,逐渐演进到普通 OADM,自动无色、无方向可重构的光分插复用(CD-ROADM)以及无色、无方向和无竞争的 ROADM(CDC-ROADM),最终会演进到自治的高维度全光 OXC 光层。波长选择光开(WSS)具备大颗粒业务调度能力、天然超低时延等优势,是 ROADM/OXC 的核心功能模块,是应对流量洪流与超低时延诉求的最佳选择。WSS 可以实现以下波长级的调度功能:

- ◆单端口输入多波,可以从多端口输出任意波长;
- ◆任意波长可以交叉调度到任何方向;
- ◆单波光功率独立调节,互不干扰;
- ◆全部采用软件配置交叉调度、光功率调节。

目前,在业界成熟应用的 WSS 单板主要有 4D、9D、20D 和 32D 共 4 种类型,WSS 发展主要经历了 3 代技术,即微机电系统(MEMS) WSS、液晶(LC) WSS 和硅基液晶(LCoS) WSS,各种 WSS 的特点如下:

◆MEMS WSS。电压产生的静电力改变微机械的角度和位置,MEMS WSS 通常可以实现 Fix(如 100G)和低端口(如 4D/9D)波长选择,体积大。

◆LC WSS。LC 是介于液态与结晶态之间的一种物质状态。在液晶层上施加不同电压时对光线有不同的透过率,实现波长调度或光路切换,LC WSS 通常可以实现 Fix 或大颗粒 Flex(50G/100G)间隔和低端口(如 4D/9D),体积较大,波长级控制精度优于 MEMS,商用产品波长切换时间为秒级。

◆LCoS WSS。LCoS 是一种硅基的 IC 芯片+反射膜层+液晶结构的小尺寸矩阵液晶装置,芯片上通过金属分隔为不同单元,每个单元称为 pixel(像素);每个波长对应了 LCoS 芯片上的多列 pixel,当在 pixel 上施加电压时,会改变其相位,当多个 pixel 连续改变相位时,光路的方向即被改变。LCoS WSS 为当前业界成熟商用 WSS,体积小,可以做到高端口(20D/32D)、大颗粒 Flex(6.25G×N),商用产品波长切换时间为百毫秒~秒级。

随着网络带宽需求持续增长、网络时延要求越来越高和网络业务更加灵活调度等需求驱动,WSS 模块向更高端口、更快速调度和更高性能的技术方向演进趋势日趋明显,具体情况如下:

◆端口数量。当前业界商用的 WSS 端口数量最高有 32 个,未来网络 MESH 化,要求线路具有更多维度级调度能力;同时,大端口 WSS 可以实现更大数量的波长上下,节省机房空间。期望可以通过材料突破(如 LCoS 大角度偏转 $\geq 11^\circ$)实现下一代 128D+WSS。

◆超高光学性能。当前成熟商用 WSS 光学性能特

点是可支持 C 或 L 波段,插损 6 dB 左右,有滤波特性,偏振相关损耗(PDL)大。在系统设计时,通常需要额外增加光放大器进行损耗造成的功率削减补偿,预留 WSS 级联滤波代价、PDL 代价等系统传输裕量;希望通过设计、材料技术的突破可以实现面向未来高性能 WSS 解决方案(光学性能 IL ≤ 3 dB,隔离度 ≥ 35 dB,频偏为 ± 0.5 GHz,PDL ≤ 0.3 dB,更宽频谱支持)。

◆超低时延。基于 LCoS 的商用,WSS 可以支持百毫秒~秒级的切换速度。随着 5G 时代的到来,低时延网络已渐渐成为人类生活中愈发重要的高感知基础设施,满足不断降低的时延诉求,如 4K+视频的极致体验,需要超低时延网络保障。期望通过光路设计、材料技术和算法突破,实现微秒级 WSS 切换速率。

为了满足下一代传输的高性能、高维度和高可靠要求的 WSS 解决方案,本文认为研究方向包括但不限于这些方面,更简洁的光路设计,新的材料技术突破(如超低损透镜、光栅、超大超快偏转角度 LCoS、超表面材料)和创新算法(补偿算法、控制算法)等,需要业界专家一起共同来研究攻克。

7 光接入能否打破时分复用(TDM)机制,实现新型点对多点(P2MP)技术

无源光网络(PON)现有架构在 GPON/10GPON 时代因其大带宽(1G/10G/50G)、长距离(40 km)和光层流量统计复用的优点,简单、高效(低能耗、低成本)地满足了数据互联时代的业务需求,PON 和 P2MP 光配线网络(ODN)得到了广泛的部署。但是,随着新业务(AR/VR/全息)和新应用(工业制造、无线承载)场景的兴起,除了带宽的持续演进外(10G $\rightarrow$ 50G $\rightarrow$ 200G),用户对时延、抖动和安全隔离都提出了更高的要求。例如:工业制造对时延及抖动有微秒级的确定性需求;垂直行业存在多张业务网络(数据采集网、视频监控网、生成控制网等)统一承载的诉求,因为可靠性和行业规范的要求,多业务承载在同一 ODN,逻辑上要保持严格隔离(时域或频域等),以满足各业务网服务等级协议(SLA)的要求。而 PON 技术的演进,要同时考虑如下约束:

◆基于现有部署的 ODN 演进。ODN 属于基础设施,投资占比在 70%以上,因此新的 PON 技术一定要能在已经部署的 P2MP ODN 上应用。

◆代际技术在单 bit 能耗和成本方面要持续降低,而且至少 2 倍的优化。接入网具有海量部署的特点,因此只有能耗和成本持续降低,新技术才能得到广泛应用。

现在面临的挑战主要表现在以下两方面:

◆对发射机的发送光功率要求过高。根据以上介绍不同代际(更高速率 PON)都部署在现有 ODN 网络上,基于现网部署的 ODN 情况(多级分光,传输距离为 20 km),一般要求 ODN 的功率预算 >32 dB,根据直接检测情况下接收机灵敏度的计算公式可知,在其它条件不变的情况下,当带宽提升 1 倍时,接收机灵敏度下降 3 dB,可求出 200G 接收机灵敏度比 10G 接收机灵敏度下降了 13 dB。根据 ITU-T G987.2 标准要求,10G 接收机的接收灵敏度为 -28 dBm,意味着 200G 情况下接收机灵敏度 -15 dBm (-28 dBm+13 dB)。因 ODN 的功率预算 >32 dB,故 200G 系统的发射功率 >17 dBm(-15 dBm+32 dB)。再考虑色散代价,200G 系统可能有 12~13 dB 的色散代价,因此要求 200G 系统的发射功率 >30 dBm(17 dBm+13 dB),这对发射机的发送光功率要求超出了当前可见的技术能力。

本文现在考虑 2 种技术突破路线:一种是研发高带宽、高功率和低啁啾发射机,另一种是寻找新型的调制解调技术。新的技术路线同样受到“单 bit 能耗和成本要持续降低”的约束,因此挑战大。

◆现有 PON 架构无法满足业务发展需求。为了满足超低确定性时延、抖动和硬隔离的要求,传统的 TDM PON 机制由于上行多光网络终端(ONT)成帧的需要,导致了动态带宽分配(DBA)算法调度时延和不同 ONT 帧突发对齐的带宽开销(时延/抖动越低带宽开销越大)。

参考无线接入技术的发展,从时分多址→码分多址→正交频分多址(TDMA→CDMA→OFDMA),PON 技术在“万物智联”时代也需要考虑新的系统架构。

新的 PON 架构同样受到“单 bit 能耗和成本要持续降低”的约束,需要配套新的光系统/器件/光算法、调制/解调机制等的协同突破,例如:电子管→半导体→代际突破,才可能实现能耗和成本的指数级优化。

8 能否构建高动态、大带宽、大规模卫星光网络

卫星通信技术是基于人造地球卫星作为通信基站或中继站来传播和转发无线电波,进而进行终端间的通信,其具有覆盖范围广、抗灾能力强和组网迅速等特殊优点,成为地面通信的强有力补充。20 世纪八九十年代,卫星通信多是单颗卫星的通信体系,到 2000 年前后,逐渐涌现出几十上百颗星组成的卫星星座,如美国铱星、全球星和轨道通信等星座体系。

基于卫星星座构建的卫星互联网能够提供空中、

海洋和地面偏远地区的全方位通信机制,并成为 6G 移动通信领域的关键技术。2015 年开始,全球兴起互联网低轨卫星的建设狂潮,以 SpaceX 为代表的新兴互联网星座企业,依托一箭多星、民用器件上天等技术创新,快速建设其互联网卫星星座,截止目前,其在轨卫星数量已超过 1500 颗。近期,中国也相继启动了卫星互联网建设规划。2019 年 12 月,中国通信标准化协会(CCSA)成立 TC12 工作组,专门负责卫星通信标准的研讨和制定。2020 年 4 月,卫星互联网纳入国家“十四五”新基建范畴。2020 年 9 月,中国向国际电信联盟(ITU)正式提交 12992 颗低轨卫星轨道资源申请。2021 年 4 月 28 日,中国卫星通信网络集团有限公司在雄安新区挂牌成立。

网络联接是互联网的通信基础,卫星互联网也不例外。由于激光具有发散角小、传输容量大、传输距离远和抗干扰/截获等优点,星间链路的主流技术方案采用激光作为通信载体。然而,要构建适用于大规模低轨卫星组网的未来商业物联网卫星星座的星间光通信系统,还面临许多待突破的技术课题,具体表示如下:

◆星间光通信速率能否突破 100 Gb/s,甚至达到 400 Gb/s? 目前,欧美国家已经实现了 10 Gb/s 速率星间激光通信载荷的商用,我国也突破了 5.625 Gb/s 速率的工程应用。另一方面,全球地面网络已普遍实现 100G 光互联,并逐渐向 200G/400G 光系统演进,如此大的传输速率失配对有效实现 6G 天地网络协同提出了挑战。

◆光通信载荷如何实现工业器件应用,以降低建造成本? 基于低轨卫星的互联网星座需要几千甚至上百万卫星来实现全球覆盖,其光通信载荷数量是卫星数量的 4 倍以上,因此对光载荷成本提出了较大的挑战。传统光通信载荷采用航天专用芯片、器件,制造成本极高。目前,SpaceX 和国内部分民用商业航天企业的技术探索表明:工业级器件、芯片经过抗辐照、抗冲击等技术加固后,有望在低轨星间应用场景中使用,这给低轨卫星互联网开启一条规模商用的有效路径,通过兼容地面通信成熟产业链来降低光载荷的商用成本。

◆卫星互联网规模庞大,如何实现光通信载荷规模化生产以满足供应? 传统的航天制造业由于交付数量少、多是定制化部件,因此多采用作坊式制造。然而,面对数以千/万计的互联网卫星光载荷生产,作坊式生产流程基本难以实现有效供应。近期,卫星平台的脉动式产线已逐渐在国内建立起来,因此光通信载荷的生产采用脉动产线,甚至采用通用流水线生产也

成为可能。

◆光通信载荷如何实现低功耗、轻量化演进?商用低轨卫星由于发射成本限制,体积重量都小于传统的中高轨通信卫星,而其搭载的载荷数量众多,除了光通信载荷,还有对地的微波通信载荷,以及星上的通信交换、控制系统,其留给光通信载荷的体积、重量和功耗余量受到极大限制。因此,光通信载荷需要不断优化其自身结构,包括相控、免信标光和新轻量化材料的技术创新来实现整套系统的小型化和低功耗。

◆如何有效实现千/万级卫星星座的网络管控和安全性保障?传统的卫星系统一般由一颗或几颗卫星组成,最多是百颗量级。而卫星互联动辄成千上万的卫星规模给网络管控带来前所未有的挑战,且不同于地面网络的固定节点,低轨卫星是在地表轨道上实时高速移动,对网络实时端口路由切换的精确度和时延都有十分高的要求。因此,如何实现空间光网络如地面自动交换光网络(ASON)一样的高安全性管控是需要解决的关键问题,同时依托量子通信技术建立星间高安全链接也是关键的技术方向。

9 能否实现超高集成度的一体化光电模块

当前的 DWDM 光电模块绝大部分为一个模块出一个波长、承载一路信号,每个波长需要独立对应的激光器、调制器与控制电路、DSP、光电模块的时钟、电源和中央控制等。当前普遍应用的波段为 C96,即 50 GHz 间隔 96 个波长,75 GHz 间隔 64 个波长,100 GHz 间隔 48 个波长,以此类推。每个波长需要相应数量的外围控制电路。同时,网元的每个槽位一般可以放 2~4 个模块,那么 96 个模块即需要 24~48 个槽位,对应数个网元;多波长合波在模块外实现,另需要额外的槽位放置合分波板卡。随着网络流量的增加,未来会逐步实现 L、S、U 等波段商用,按现有技术发展,系统占据的机房空间会越来越大。因此,光电模块向超高集成度方向发展已势在必行。未来的单个光电模块需要能实现多波长输出,甚至实现 C+L+S+U+...全波段上百路集成到同一个光电模块,模块内部实现合分波,一纤、一槽位一模块。因此,各组件必然会带来很大的技术挑战,本文认为需要重点研究的技术方向如下:

◆光频梳技术。全波段光电模块需要全波段光源。光口需要能输出全波段的连续光(CW),各波长光功率基本可以做到一致,与当前的可调光源类似具备一定范围的调节能力;需要做到多波的集中控制,而非简单的多波长拼凑,如果每个波长仍然独立控制,

整个光源将会非常复杂。光频梳技术可能是解决此问题的一个方向,但目前来看,光功率普遍比较低,并且各波长功率不平坦,距离商用仍有很多工作要做。同时,也期望有其它技术来实现这个目标。

◆异质集成技术。调制器/接收机需要进一步小型化和集成化,把上百路光组件做到单片集成,目前成熟应用的 SiP/InP 调制器、研究中的薄膜铌酸锂调制器,以及处于前沿的聚合物调制器,哪种技术是能实现如此高密度集成的最优路线,有待进一步研究。同样,接收机的多路集成也存在极大的挑战。若能将全波段光源与调制器/接收机做单片集成是比较理想的方向,可是光源、调制器这 2 种材质不完全一样,如何能做到异质集成,学术界和产业界已经有多个团队在做研究,做到大规模产业化需要更多的力量投入。

◆光电合封技术。DSP 部分同样需要做到上百路信号输出,并且要考虑 DSP 如何跟驱动器、跨阻放大器(TIA)和光组件做到高效高集成的封装,光、电合封同样是需要解决的难题之一。

◆散热技术。如此多路的光、电高密度集成,随之带来的就是工程方面的问题,散热技术存在很大的技术挑战,必须从模块到系统端到端提升散热效率。因此,需要在如下几个方面有较大的技术突破:高导热、高回弹热界面材料;耐摩擦、低接触热阻技术;超薄、高能效比(COP)热电制冷技术;高能效、低噪声风扇技术。

10 结束语

从 1966 年诺贝尔奖得主高锟先生把光纤带到世界的那天起,“光”正在逐渐演变成为人们生活日常的必需品。华为公司正在为建设低碳、高效和智能的全光网络,消除数字鸿沟,打造无处不在的光联接而不懈努力。我们希望能够与光通信行业的上下游产业链协同,携手全球光通信领域的顶尖学者、专家,共同攻克以上光系统、光器件、光算法和光智能领域的业界难题,共同促进光通信产业未来的繁荣发展。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13)[2021-07-09]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1694069736958498532&wfr=spider&for=pc>.
- [2] 2021 年国务院政府工作报告[EB/OL]. (2021-03-05)[2021-07-09]. http://www.gov.cn/zhuanti/2021lhzfzgbg/index.htm?_zbs_baidu_bk.
- [3] 工业和信息化部.“双千兆”网络协同发展行动计划(2021-2023 年)[EB/OL]. (2021-03-24)[2021-07-09]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-03/25/content_5595693.htm.