

城域与长途场景下100G/400G网络承载选择策略研究

Research on 100G/400G Network Bearer Selection Strategy in Metropolitan and Long-Distance Scenarios

张渭,徐阿强,夏芸,宋丽军,王晓媛(华信咨询设计研究院有限公司,浙江杭州310052)
Zhang Wei,Xu Aqiang,Xia Yun,Song Lijun,Wang Xiaoyuan(Huaxin Consulting Co.,Ltd.,Hangzhou 310052,China)

摘要:

基于100 Gbit/s和400 Gbit/s技术的性能对比,量化分析了不同网络场景下不同速率网络的关键指标,并通过业务全景分析,提出了在网络实际建设过程中面临的100 Gbit/s业务的承载网络选择问题。从建设成本、通道空置、纤芯占用等多个维度,分析了100 Gbit/s颗粒业务在不同场景网络上的承载代价,从而探讨得出100 Gbit/s与400 Gbit/s共存时代的业务部署策略。

关键词:

100 Gbit/s;400 Gbit/s;共存;业务部署;承载选择
doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.04.010
文章编号:1007-3043(2026)04-0057-05
中图分类号:TN913
文献标识码:A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Based on the performance comparison between the 100Gbit/s and 400Gbit/s technologies, it conducts a quantitative analysis of the key indicators of networks with different rates in various network scenarios. Through a panoramic analysis of services, it poses the question of how to select the bearer network for 100Gbit/s services during the actual network construction process. By considering multiple dimensions such as construction cost, channel vacancy, and fiber core occupation, it analyzes the bearer costs of 100 Gbit/s granular services on networks in different scenarios, and thus explores and concludes the service deployment strategy in the era of coexistence of 100Gbit/s and 400Gbit/s.

Keywords:

100 Gbit/s;400 Gbit/s;Coexistence;Service deployment;Bearer selection

引用格式:张渭,徐阿强,夏芸,等. 城域与长途场景下100G/400G网络承载选择策略研究[J]. 邮电设计技术,2026(4):57-61.

1 概述

近年来,随着互联网流量的井喷式增长,各大运营商纷纷加大了对高速光传输技术的投入,其中单载波400 Gbit/s成为业界关注的焦点。它是当前传送网演进升级的核心技术,成为构建面向算力的高品质确定性运力网络的坚实光底座。

从2021年起,国内三大运营商均在实验室组织400 Gbit/s波分的传输测试与试验。同时,多个城市积

极探索了400 Gbit/s技术在大型城域网中的应用。2023年,三大运营商在全国范围加速部署400 Gbit/s QPSK骨干网络,基于自身发展策略和技术要求,其技术选型略有不同:中国电信选择400 Gbit/s QPSK C+L和ROADM技术;中国移动采用400 Gbit/s QPSK C+L和电层SNCP保护技术;中国联通则倾向于选择400 Gbit/s QPSK C+L和OMSP保护技术。

400 Gbit/s网络步入商用阶段后,它将与100 Gbit/s网络长期共存。在实际网络建设过程中,将会面临100 Gbit/s颗粒业务的承载选择问题。本文对比分析了不同场景下400 Gbit/s和100 Gbit/s网络的关键指标,基于业务全景分析预测,结合100 Gbit/s颗粒业务在不同场景网

通讯作者:夏芸,xy.hx@chinaccs.cn

收稿日期:2026-02-16

络上的承载代价探讨业务部署策略。

2 400 Gbit/s 与 100 Gbit/s 的传输性能比较

业界普遍认为,400 Gbit/s 技术是传输网络跨越未来 10 年的关键技术。对于 IP 业务而言,虽然升级 400G 路由器中长期可提升投资效益,但在初期,能够升级为 400G 颗粒的业务主要集中在热点区域和方向。因此,无论是骨干传输网还是本地城域网,400 Gbit/s 与 100 Gbit/s 网络将长期共存。

2.1 关键传输性能对比

相比于 100 Gbit/s,单波 400 Gbit/s 并无革命性技术突破,仍处于相干调制技术时代^[1]。400 Gbit/s 的研究一直致力于在传输距离和频谱效率之间寻求最佳平衡。单波速率的提升主要有 2 种途径,一是提高器件波特率,但这受限于硬件水平和产业链发展程度;二是提高调制阶数,阶数越高,同样的波特率下传输速率越高,但高阶调制对元器件性能要求也很高,传输距离很受影响。400 Gbit/s 的主流调制码型有以下 3 种^[2]。

a) PM-16QAM:采用 16 种不同幅度和相位的正交调制方式。各码元之间的幅度和相位都不同,平均功率较低,相比于 QPSK 有更高的传输速率,但也带来了更大的复杂度和更窄的容忍度,传输距离为 400~500 km,适用于城域传输场景。

b) PM-16QAM-PS:一种在 PM-16QAM 基础上通过星座概率整形技术优化得到的码型。星座整形技术对 QAM 信号星座点的分布进行重新设计,通过降低光功率来减轻非线性效应,从而达到改善传输性能、提高 OSNR、提升传输距离的目的。与 PM-16QAM 技术相比,其传输距离提升了 1 倍。

c) PM-QPSK:具有 4 个电平值的四进制相移键控 (PSK) 调制技术,可用于单波 400G 的传输,器件波特率约为 130 GBaud,通道间隔为 150 GHz。在这种调制码型下,传输距离能达到 1 500 km 以上,适合中长距传输场景。

100G 和 400G 不同调制技术的理论性能对比如表 1 所示。

从表 1 可以看出,PM-16QAM 所适用的场景范围较窄,仅适用于数据中心互联的短距传输;PM-16QAM-PS 适用于大城域网和本地网场景;PM-QPSK 则适用于骨干长途传输。

在 QPSK 码型下,相比于 100 Gbit/s 技术,400 Gbit/s

表 1 理论性能对比

单波带宽	100 Gbit/s	400 Gbit/s				
	PM-QPSK	PM-16QAM	PM-16QAM-PS		PM-QPSK	
波特率/GBaud	25	~60	~90		~130	
通道间隔/GHz	50	75/100	100		150	
频谱使用	C4.8T/C6T	C4.8T	C4.8T	C4.8T+L4.8T	C6T	C6T+L6T
通道数	96/120	64/48	48	96	40	80
单纤容量/(Tbit/s)	9.6/12	25.6/19.2	19.2	38.4	16	32
OSNR 性能	基准	-	-	-	-0.5~-1 dB	-1.5~-2 dB
跨段数(×22 dB)	31	4/8	预计 17	预计 17	预计 25	预计 20
传输距离/km	2 500	300~500	约 1 200		1 500~2 000	

技术单波传输带宽提升为 4 倍,但由于波特率提高,通道间隔占用也增长为原来的 3 倍。在同样的频谱范围内,通道数也下降为原来的三分之一。因此,C6T 下 400 Gbit/s 单纤容量提升并不显著。由于单波容量的提升,400 Gbit/s 的背靠背 OSNR 容限要求比 100 Gbit/s 至少提高 6 个 dB,同时线路传输能力却有所下降,相比于 100 Gbit/s,会带来至少 0.5 dB 的固有 OSNR 代价。此外,在扩展了 L 波段后,光层还会额外产生 1 dB 的系统代价^[2]。

2.2 基于现网的模拟结论

从上文的系统性能对比可以看出,同为 QPSK 码型,400 Gbit/s 系统的无电中继传输能力大约是 100 Gbit/s 系统的 60%。但这并不代表网采用 400 Gbit/s 技术所需的中继 OTU 端口数量就是 100 Gbit/s 系统的 1.6 倍。全网的中继代价不仅与传输能力有关,也和业务长短有关。因此,现网中采用 400 Gbit/s 引入的中继代价需要综合考虑网络拓扑、覆盖区域、纤芯质量、业务源宿点、业务数量及分布等因素。根据不同层级网络的特点,分城域本地和长途骨干 2 种场景进行现网模拟对比。

2.2.1 城域及本地场景

全国有 300 个以上本地网,本地网人口数从数十万至数千万不等,宽带用户数从 1 万至数百万不等,各本地网网络规模跨度较大。目前,基本实现了 100 Gbit/s 本地波分网络的全覆盖,城区和市县承载业务颗粒以 100 Gbit/s 和 10 Gbit/s 为主,县乡以 10 Gbit/s 和

GE为主。在可预见的未来,400 Gbit/s 颗粒业务会首先出现在特大型和大型本地网的城域及市县层级。

除了少数边陲地区,全国本地网东西向/南北向的光缆物理距离一般在200~500 km。400 Gbit/s 系统采用PM-16QAM-PS 码型,其无电中继传输距离可达1 200 km,这一距离是基于均匀22 dB的理论跨段和0.25 dB/km的理想衰耗估算得到的传输距离。即使考虑实际光缆的长跨段和部分劣化的纤芯指标,本地网层面400 Gbit/s 业务基本也可以实现一跳直达。相比100 Gbit/s 网络,基本不会产生额外的中继代价。

2.2.2 长途骨干场景

从2011年开始,100 Gbit/s QPSK 作为主流技术被广泛应用;2016年,可重构光分插复用(ROADM)技术的引入更是大大提高了长途骨干传输的效率和灵活性,降低了成本。长途骨干传输网目前承载业务颗粒为100 Gbit/s。业务路由长度跨度很大,从百公里到数千公里不等。

对于不同AZ端业务来说,引入400 Gbit/s 的中继代价差别很大。因此,为了反映真实网络中引入400 Gbit/s 技术对比100 Gbit/s 网络产生的额外代价,假设网络拓扑不变,且业务长度分布完全一致,利用仿真软件进行模拟。模拟结果显示:在400 Gbit/s QPSK C+L技术下,全网电中继板卡增加120%。以全网OTU板卡(含业务上下和电中继)为基数,增幅达30%。

在同样的网络拓扑和业务分布前提下,针对上述2种场景,综合全网设备功耗、中继代价以及单纤容量、纤芯占用等因素进行对比,雷达图如图1所示。在城域及本地场景下,400 Gbit/s 技术带来的单比特功耗下降,更加绿色节能,全网功耗下降约30%,单纤容量提升1倍,中继代价相仿。在长途骨干场景下,全网中继代价增加1.2倍,总体功耗相比100 Gbit/s 略有下降,同样频谱带宽下单纤容量提升约30%。

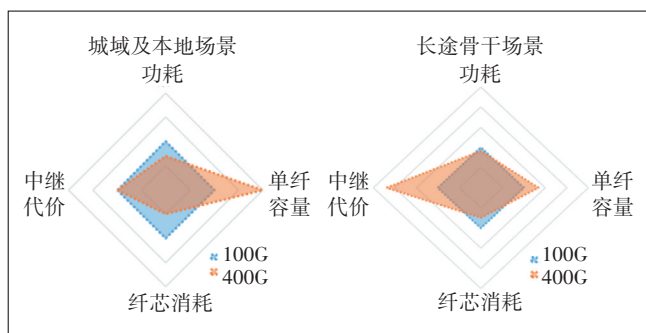


图1 不同场景下的多因素雷达图

3 业务模型分析

3.1 业务承载模型及需求预测分析

传输网作为网络的底层承载,其上承载的业务种类繁多,为方便后续分析,绘制业务全景图。传输网承载业务示意如图2所示。

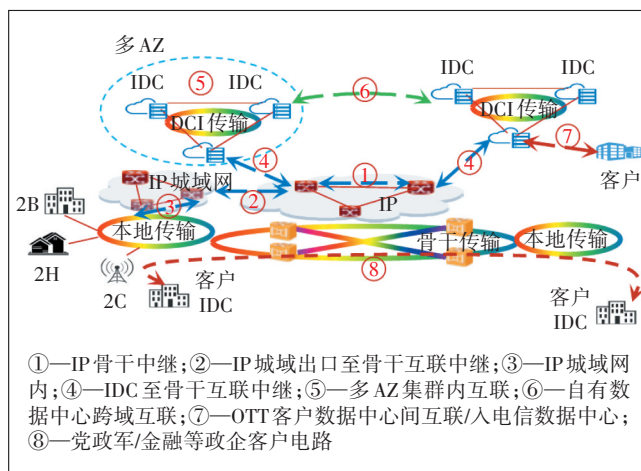


图2 传输网承载业务示意

下面按业务的不同层级(骨干、本地和区域)分别进行分析,其业务特点与颗粒构成存在显著差异。

a) 骨干层面电路:主要承载跨域、跨省的高价值流量,包括IP骨干中继、IP城域出口至骨干互联、IDC至骨干互联、自有数据中心跨域互联以及党政军/金融等政企专线。该层面业务颗粒高度集中,以100 Gbit/s 为主,且总体带宽需求大。

b) 本地层面电路:主要服务于城域或本地范围,包括IP城域网内中继、OTT客户数据中心互联/入云,以及其他政企客户组网需求。该层面业务颗粒以100 Gbit/s 和10 Gbit/s 为主。

c) 区域层面电路:主要指多AZ集群内部的数据中心互联。该场景业务目的性强,目前也以100 Gbit/s 颗粒为主,但总体流量规模相对骨干和本地层面较小,其发展受特定算力业务布局影响显著。

从业务需求特点、规模以及发展趋势分析,最有可能出现400G颗粒的业务场景为IP业务及IDC互联。其中,IP业务的增速整体放缓,流量区域化特征保持稳定。据运营商IP网络规划部门分析预测,IP网400 Gbit/s 高速端口预计在2027年以后实现规模部署,在2024—2026年,可协同传输进行少量业务方向的提速。IDC互联的跨域场景多为政策刺激所致,实际流

量不大,多AZ集群内场景或会较先出现400G颗粒。

由上述分析可以看出,与100 Gbit/s传输网不同,400G传输网的建设并不是由业务直接推动的,其建设节奏和400 Gbit/s颗粒业务的发展并不匹配。因此,在400 Gbit/s传输网建设初期,真正的400 Gbit/s颗粒业务很少,大部分业务仍是100 Gbit/s和10 Gbit/s颗粒。从减少通道空置率的角度,10 Gbit/s业务仍由长期并存的100 Gbit/s网络承载;至于100 Gbit/s业务,是选择由100 Gbit/s网络还是400 Gbit/s网络承载,其承载策略需要进一步探讨。

3.2 城域及本地场景下 100 Gbit/s 业务不同承载方式的对比

针对100 Gbit/s颗粒业务的承载策略,需要考虑通道空置率、建设成本等因素。其中,波分网络的建设成本与OTU板卡的配置规模高度相关。基于2.2节的分析,城域本地场景采用400 Gbit/s技术建设基本不会引入额外的中继代价。按最近的集采价(4×100G单板为100G单板价格的3.3倍)估算,同方向新增不同规模业务利用不同网络承载的建设成本(以100G系统承载成本为基准值1)和通道空置率对比分析如图3所示。

当同方向新增带宽达到200 Gbit/s时,利用400 Gbit/s系统承载的建设成本系数约为1.4倍,通道空置率为50%;当新增带宽达到300 Gbit/s后,建设成本系数降至0.7~1.1区间;当新增带宽恰好为400 Gbit/s的整数倍时,建设成本系数达到最优值(约0.7),且通道空置率为0。如果再考虑未来价格趋势,随着400 Gbit/s产业链发展的日渐成熟,单比特造价会进一步下降,在城域及本地场景中,利用400 Gbit/s系统承载100G业务的成本优势会愈发显著。

3.3 长途骨干场景下 100 Gbit/s 业务不同承载方式的对比

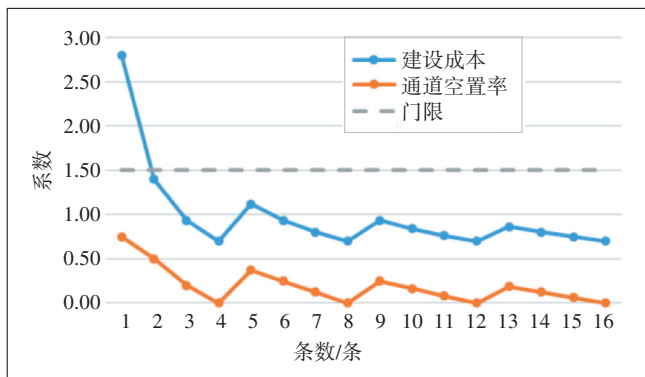


图3 利用400 Gbit/s PM-16QAM-PS系统承载的指标对比

近年来,随着ROADM系统的建设、WSON控制平面的开启以及业务级保护恢复的启用,长途纤芯资源的消耗越来越快,越来越多的段落呈现纤芯紧张态势,尤其是关键路径上的纤芯资源尤显珍贵。因此,在长途骨干场景中,讨论100G颗粒业务的承载策略时,还需要考虑纤芯容量因素。

基于2.2节的分析可知,在长途骨干场景中,采用400 Gbit/s技术建设引入的额外中继OTU板卡数量约为全网OTU板卡(含业务上下和电中继)总数的30%。在分析同方向业务时,为了屏蔽业务长短对分析结果的影响,采用2.2节的全网平均值来计算。按最近的集采价(4×100G单板价格为100G单板的3.3倍)来估算,同方向新增不同规模业务利用不同网络承载的建设成本、通道空置率以及纤芯占用率(以100G系统的承载成本和纤芯占用率为基准值1)对比如图4所示。

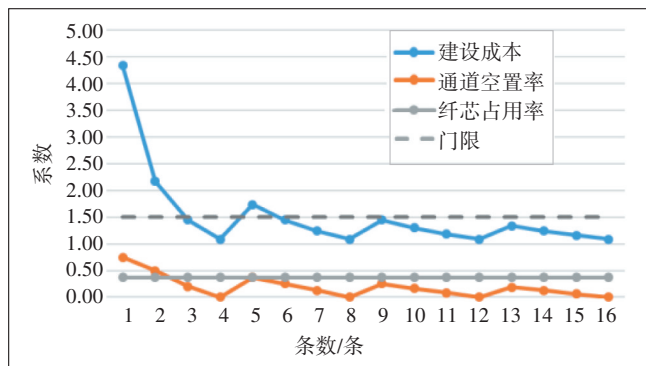


图4 利用400 Gbit/s QPSK C+L系统承载的指标对比

当同方向新增带宽达到300 Gbit/s时,利用400 Gbit/s系统承载的建设成本系数约为1.5,通道空置率为20%;当新增带宽达到400 Gbit/s的整数倍时,400 Gbit/s系统的建设成本与100 Gbit/s系统基本持平,通道空置率为0。建设400 Gbit/s QPSK C+L系统,其单纤容量是100 Gbit/s系统的2.67倍,承载同样容量的业务,其对纤芯的消耗会少得多。

4 业务部署策略

随着400 Gbit/s网络进入商用阶段,出于产业链发展和网络集约化的考虑,运营商将不再大规模建设100 Gbit/s网络。但在业务层面,100 Gbit/s颗粒业务并不会快速消退,预计会长期存在。基于前述分析,在400 Gbit/s与100 Gbit/s网络共存时期,针对100 Gbit/s颗粒业务的承载策略,需结合不同场景进行阐述。

4.1 城域本地场景

在目前城域本地场景中,本地业务流向比较固定,大多为汇聚节点—中心局之间的业务。在每年新增业务中,10 Gbit/s 颗粒业务约占75%,100 Gbit/s 颗粒业务约占24%,GE等小颗粒业务约占1%。预计在未来相当长的时期内,10 Gbit/s 业务仍然是城域本地场景的主力颗粒。城域本地现有的100 Gbit/s 网络截面波道配置率并不高,整体在30%~40%。因此,作为10 Gbit/s 等低速率业务的承载网络,100 Gbit/s 网络按需进行补充建设。

综合考虑当期建设成本、业务流向和颗粒特点,针对城域本地场景中,100 Gbit/s 颗粒业务的承载策略,建议如下。

a) 鉴于本地网业务流向固定,后续新增业务大概率会有同方向电路,建议同方向新增的200 Gbit/s 及以上的同类型业务,由400 Gbit/s 网络承载。低于200 Gbit/s 的业务仍然由100 Gbit/s 网络承载,以降低网络的空置率和当期建设成本。

b) 对于将升级为400 Gbit/s 颗粒的局向,目前该类型的100 Gbit/s 业务仍由100 Gbit/s 网络承载。

c) 若在100 Gbit/s 网络中承载100 Gbit/s 业务会导致纤芯紧张的光复用段(OMS)段落需新建,则建议将这部分100 Gbit/s 业务移至400 Gbit/s 网络承载,给长期存在的低速率业务预留网络资源。

4.2 长途骨干场景

长途骨干网络主要承载省内、省际的IP业务和IDC互通业务,业务颗粒包括100 Gbit/s、10 Gbit/s 和400 Gbit/s。在每年的新增业务中,100 Gbit/s 颗粒业务占比最高,条数占比在75%以上,带宽占比高达95%;400 Gbit/s 颗粒初期条数占比仅为2%~3%,后续其占比将随着网络流量的增长按业务局向逐步提升;10 Gbit/s 颗粒业务则逐年递减。骨干100 Gbit/s 网络经过多年的建设和运营,整体资源空置率很低,频点利用率偏高,部分热点方向利用率达80%以上,全网平均值达55%。

从长期来看,建设4×100G TMUX 波道并不会造成资源过多闲置,反而能为10 Gbit/s 等低速率业务预留100 Gbit/s 网络资源。鉴于骨干100 Gbit/s 网络接近满载,将100 Gbit/s 业务全部承载于400 Gbit/s 网络也可作为一种策略选择。但考虑到当期建设成本和未来设备价格的走势,400 Gbit/s 网络在建设初期还需要控制建设规模。基于3.3节的量化对比分析,综合考虑

当期建设成本、业务流向颗粒特点以及单纤容量等因素,针对长途骨干场景下100 Gbit/s 颗粒业务的承载策略,提出如下建议。

a) 针对同局向、同路由业务,若新增带宽需求达到300 Gbit/s 及以上,建议利用400 Gbit/s 骨干网承载;若新增带宽需求小于300 Gbit/s,仍由100 Gbit/s 网络承载,以降低网络的空置率和当期建设成本。

b) 对于将升级为400 Gbit/s 的局向,当年新增的100 Gbit/s 电路建议仍由100 Gbit/s ROADM网络承载。

c) 对于不满足前述条件、但利用100G网络承载需新建系统的100G业务,应重点评估新建系统所用纤芯的稀缺性。鉴于400G系统单纤容量约为100G系统的2.67倍,对于关键路径且剩余纤芯资源不足8芯的情况,应优先采用400 Gbit/s 骨干网承载;对于其他情况,则可综合成本等因素灵活决策。

d) 考虑到100 Gbit/s 网络中板卡利旧调配的灵活性和部署成本较低,对于未来可能存在调整的业务,应优先利用100 Gbit/s 网络承载。

5 结束语

400 Gbit/s 网络和100 Gbit/s 网络各有其适用场景和优势,在2种网络共存时代,业务承载的精细化能力已成为运营商应对流量激增与场景分化的核心挑战。本文通过分析多场景下不同颗粒度业务的传输需求,结合网络特性、成本效益,提出了综合部署策略。未来,网络技术的代际共存将成为常态。随着跨层协同管控体系的构建和应用,可研究基于AI驱动的业务分配算法,实现网络资源与业务需求的最优匹配,从而在降低成本的同时提升服务韧性。

参考文献:

- [1] 李俊杰,杨玉森. 400 Gbit/s WDM 传输技术及标准化进程[J]. 邮电设计技术,2018(6):57-61.
- [2] 吕凯,盛夏,王曦朔,等. 400G 骨干全光网面临的机遇和挑战[J]. 通信世界,2023(20):10-12.

作者简介:

张渭,高级工程师,学士,主要从事长途干线传送网的规划研究和设计工作;徐阿强,工程师,硕士,主要从事长途干线传送网的规划研究和设计工作;夏芸,正高级工程师,硕士,主要从事长途干线传送网的规划研究和设计工作;宋丽军,高级工程师,硕士,主要从事长途干线和本地传输网的规划研究和设计工作;王晓媛,高级工程师,硕士,主要从事长途干线和本地传输网的规划研究和设计工作。