



专题：全光网技术与应用

“三超”光纤通信系统技术与趋势展望

冯勇华¹, 李响², 曹权³, 郭志霞¹

- (1. 中国信息通信科技集团烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074;
2. 中国信息通信科技集团光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 中国信息通信科技集团武汉飞思灵微电子有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 主要回顾了光纤通信系统的发展历程, 并通过回顾过去 20 年的发展历程以及当前“超高速、超大容量、超长距离”光纤通信系统的研究状况, 对未来 20 年光纤通信技术的需求和可能的解决路径进行了介绍。

关键词: 超高速; 超大容量; 超长距离; 光纤通信

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019082

Development and trend prospect of “tri-ultra” optical fiber communication system technology

FENG Yonghua¹, LI Xiang², CAO Quan³, GUO Zhixia¹

1. Fiberhome Telecommunication Technologies Co., Ltd., CICT, Wuhan 430074, China
2. State Key Laboratory of Optical Fiber Communication Technology and Networks, CICT, Wuhan 430074, China
3. Wuhan Fei Siling Microelectronics Technology Co., Ltd., CICT, Wuhan 430074, China

Abstract: The development of optical fiber communication system was reviewed and the demand and possible solutions of optical fiber communication technology in the next 20 years were introduced by reviewing the development of optical fiber communication system in the past 20 years and the current research status of “ultra-high speed, ultra-large capacity and ultra-long distance” optical fiber communication system.

Key words: ultra-high speed, ultra-large capacity, ultra-long distance, optical fiber communication

1 引言

本文以 20 年为视角, 回顾了光纤通信系统的发展历程, 并通过对过去 20 年光纤通信系统传输容量的快速增长, 试图推断出未来 20 年光纤通信技术的需求和可能的解决方案路径^[1]。显然, 所有的增长最终都会趋于饱和, 但是许多与信息

通信技术有关的例子表明, 增长是可以维持几十年的, 甚至一个世纪。一般来说, 人们倾向于关注技术的发展, 而技术的发展应与特定的应用相关。然而技术的发展会随着这种应用的实现而趋于饱和, 取而代之的是一种新技术, 并继续这类应用的发展。例如微处理器的功能发展, 首先涉及时钟速度的提升, 然后通过多核架构和存储功

收稿日期: 2019-03-10; 修回日期: 2019-04-10

能的提升进行发展。对于长距离光纤传输系统而言,最初是利用多模或者单模波导作为传输介质和单跨电再生时分复用技术,然后结合基于光放大的波分复用技术(WDM),现在正转向平行空间路径。尽管驱动流量增长的单类应用也可能呈现饱和状态,但是新的应用会出现并继续这样流量的增长。在未来20年里,网络流量的可持续增长和规模化将面临挑战,但并不认为会存在任何根本性的障碍来阻止这种继续增长的趋势。

在大约20年前,也就是1997年的时候,WDM系统在重大商业部署方面才刚刚开始。最先进的系统有16个通道,单通道速率为2.5 Gbit/s,光谱效率(SE)为0.012 5 bit/(s·Hz)。作为AT&T和Ciena公司WDM方案的替代方案,北电(加拿大著名电讯设备供应商)推出了10 Gbit/s的单波长系统^[2]。关于海底传输,TAT12/13跨大西洋光缆当时刚刚投入使用。每根光缆有2对光纤,使用掺铒光纤放大器(EDFA)作为中继器,以单波长每根光纤5 Gbit/s的速率进行传输,传输距离为5 913 km,总容量为20 Gbit/s,光缆总容量距离积为118 Tbit/s·km^[3]。在当时有记录的研究实验中,1996年实现了WDM总容量为1 Tbit/s(55×20 Gbit/s和25×20 Gbit/s×2偏振)的传输,是商业产品中SE的10倍以上。

如今,20年过后,商业长途C+L波段光纤通信系统包含多达192个间隔50 GHz的通道,单通道速率为250 Gbit/s,总传输容量为48 Tbit/s,SE为5 bit/(s·Hz)。而在短距离传输方面,单波长速率达到了400 Gbit/s,总容量为76 Tbit/s^[4-5]。作为容量最大的海底光缆,太平洋轻型光缆网络(PLCN)在太平洋上的传输总量为双向144 Tbit/s,其总容量距离积达到了3 686 Pbit/s·km。而今天的研究已经实现了超过1 Tbit/s的单载波净接口速率,单模光纤中WDM的总容量达到了115 Tbit/s^[6]。短距离光纤通信系统在单模光纤上的SE可以达到17.3 bit/(s·Hz)^[7],长距离单芯单模光纤的容量距离积

可达881 Pbit/s·km^[8]。而采用多芯光纤,系统容量可达10 Pbit/s^[9],容量距离积达到1 508 Pbit/s·km^[10]。展望未来20年,假设光纤传输技术以40%的比例增长,到2037年单根光纤的传输容量会达到100 Pbit/s,因此空分复用(SDM)技术在WDM之外必将发挥重要的作用。

2 光纤传输网络的发展

随着1977年光纤首次被应用在长距离传输中,通用电话和电子公司(GTE, 6 Mbit/s^[11])、美国电话电报公司(AT&T, 45 Mbit/s^[12])和英国邮局(8.4 Mbit/s^[13])先后使用多模光纤(MMF)实现了实时电话信号的传输。如果以40年的时间跨度来看,光纤传输系统按照主流技术的发展可以划分为4个阶段^[14],即电光再生技术(1977—1995年)、光放大与色散管理技术(1995—2008年)、相干通信技术(2008年至今)和空间复用技术(2008年至今)。

早期的光纤传输系统每经过一段光纤都需要采用电学的方式对光信号进行再生,其容量取决于收发器的接口速率,即收发器能够支持的净比特率。这种接口速率在商业系统和研究实验中的增长都非常缓慢。直到EDFA的发明以及在20世纪90年代WDM技术的出现,商用光纤通信系统的传输容量从20世纪90年代中期到2000年早期,每年都增加一倍。

在20世纪90年代早期只有两种商用的光纤。标准单模光纤(SSMF),其色散(CD)值在1.55 μm波长范围内的大小为17 ps/(nm·km),允许2.5 Gbit/s的光信号通过电再生的方式传输800~1000 km。然而,由于色散容限范围随符号速率呈二次变小的规律,即使是无啁啾的光源也只能将10 Gbit/s的光信号传输约60 km的SSMF。这导致了另一种光纤——色散位移光纤(DSF,零色散波长在1.55 μm)在世界各地大规模部署。然而,当时人们并没有广泛认识到,DSF固有的低色散在波长间隔很窄的WDM场景中将导致性能急剧恶化。直到今天,



将 WDM 技术应用到包含 DSF 的网络依然是一项复杂的任务。这主要是因为低 CD 环境中存在很强的四波混频 (FWM) 效应。因此, 许多紧密波长间隔的信号会发生相互作用, 并在新的波长上产生 FWM 产物。事实上, 不到 10 种信号波长就可以产生数百种 FWM 产物。这些 FWM 产物不仅剥夺了原始信号的功率, 更重要的是, 在均匀间隔波长的情况下, 这些新生成的 FWM 产物恰好落在信号的波长上, 从而与原始信号混合, 产生功率波动^[15]。美国电话电报公司贝尔实验室的研究人员意识到, 只要对光纤制造过程进行简单的修改, 就可以很容易地生产出 CD 低但不为零的光纤^[16]。最终得到的光纤被称为 TrueWave 光纤, 后来被通用标准化为非零色散光纤。有趣的是, TrueWave 光纤可以在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处产生正的或者负的 CD 值。这启发了后来被称为色散管理 (DM) 的技术^[17], 如图 1 所示。这种技术可以将具有相反色散符号的传输光纤连接起来, 从而使链路的整体 CD 接近于零, 但是链路上各处的 CD 都高到足以抑制 FWM。自 1993 年发明以来, DM 被广泛应用于所有高速密集 WDM 系统, 无论是研究还是商业领域, 直到 2008 年引入了数字相干系统。

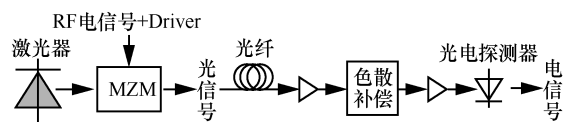


图 1 基于色散管理的光纤传输链路

2000—2008 年高速光纤通信系统主要研究的“高级调制格式”是差分编码的相位调制格式, 包括二元差分相移键控 (DPSK) 和四元差分正交相移键控 (DQPSK)。它们都提供了比 NRZ-OOK 更好的接收灵敏度, 这缓解了 21 世纪初 40 Gbit/s 系统相对于 10 Gbit/s 系统的传输距离降低所带来的问题。在 DQPSK 的情况下, 也可以获得比 NRZ-OOK 更高的 SE。这是通过对数据进行差分编码, 并在接收机上实现带有平衡光电二极管的

光延迟干涉仪, 将相位差转换为强度调制来实现的^[18]。DPSK 和 DQPSK 接收器相对简单, 这也是为什么直到 2007 年左右, 这些调制格式一直是所谓的“英雄”研究实验的首选方法之一。DPSK 和 DQPSK 也都是在那段时间实现商业化的, 例如, 朗讯技术公司在 2003 年的 64 波系统中使用了 40 Gbit/s 的 DPSK 调制格式^[19]。2007 年使用 DQPSK 实现了 25 Tbit/s 的 WDM 容量记录, 这应该是使用直接比特错误计数的研究设置中获得的最后一个容量记录^[20]。与此同时, 实验室 WDM 实验实现了每通道 100 Gbit/s 的传输, 并由 Verizon 在坦帕和佛罗里达州迈阿密之间 500 km 线路上进行了应用^[21]。实时视频 100 Gbit/s 的单波长传输证明了网络可以升级至单波长 100 Gbit/s, 这也推动了数字相干技术的产生, 可以说这是过去 20 年光纤通信系统中引入的最具颠覆性的技术, 从而开启了 WDM 系统开发的第三个主要时代。

3 相干数字通信技术

3.1 CMOS 技术的发展

相干光通信技术在 20 世纪 80 年代得到了广泛的研究^[22], 但由于模拟频率锁相技术在当时很难实现, 因此该技术没有实现商业化。EDFA 在 20 世纪 90 年代早期的成功也使得相干光通信技术没有得到广泛的关注。而相干光通信技术在 2005 年左右重新获得关注主要有两方面的原因: 期望能够实现比 40 Gbit/s 更高的速率和频谱效率, 并且解决色度色散和偏振模色散的问题; CMOS 处理和 CMOS 集成模数转换器 (ADC) 以及数模转换器 (DAC) 的速度已经赶上了 10 GBaud 的符号速率, 从而可以实现最大似然序列估计 (MLSE) 的数字信号处理算法^[23]。这些先进的 CMOS 技术在 2004 年应用在了 10 Gbit/s 的商用产品中^[24], 并在 2005 年实现了数字色散预补偿^[25]。数字相干接收机结合了模拟零差检测 (接收机带宽要求低) 和模拟外差检测 (不需要模拟光学锁

相)的优点,如图2所示。利用自由运行的局域振荡器(LO)激光器,将信号粗略地下变频到基带,并将整个光信号场进行转换得到对应的实部和虚部,即I和Q两个分量,这就是现在使用的内差接收机。对光信号采用正交调制(I/Q)和偏振复用(PDM)技术,可以使频谱效率提高4倍,从而可以基于10 Gbit/s的器件实现40 Gbit/s的传输。从数学上获得完整的光场表达形式也使得CD、PMD、光学滤波代价以及光纤非线性失真,都可以用数字信号处理的方式进行补偿。

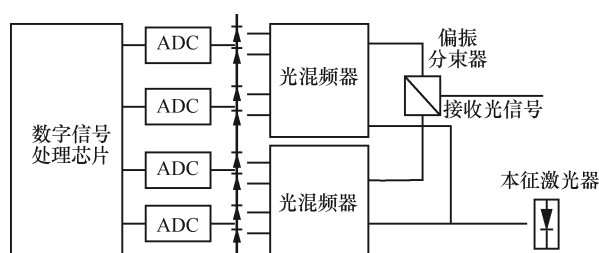


图2 数字相干接收机结构

一些研究机构从2004年开始研究数字相干接收技术,目标是基于10 GBaud的偏振复用QPSK调制格式实现40 Gbit/s的收发器^[26]。首个商用的内差收发器于2008年由北电研发完成,速率为40 Gbit/s^[27]。随后阿尔卡特朗讯成功研发了首个商用100 Gbit/s单波长收发器,并在2009年末交付给Verizon使用。随着2010年100 Gbit/s以太网(100GbE)的标准化,100 Gbit/s技术的应用非常迅速,从2010年的不到10个商业部署到2014年的大约600个全球部署,其中大部分部署在长途网络中。如今,城际网络也大量使用数字相干收发器,甚至更短距离(100 km)的数据中心互联(DCI)系统最终也可能采用数字相干技术^[28]。

3.2 相干光传输对光纤类型的影响

数字相干收发器能够对跨洋CD实现几乎没有损失的补偿,这主要和数字信号处理(DSP)中使用的数字滤波器的大小和结构有关。此外,研究表明,高速相干光传输与同样用于无色散管理系统的电子预补偿直接检测相比^[29],更倾向

于使用大CD值的无色散补偿链路^[30]。这导致了新部署的相干光链路不再使用色散管理模块,而且现在使用的光纤的CD(约20 ps/(km·nm))比SSMF的CD还要大,损耗仅略高于0.14 dB/km,与此同时具有大有效面积,从而可以减少非线性失真^[31]。

3.3 离线系统的性能评估

从实验的角度来看,先进的通信工程概念,如前向纠错码(FEC)和DSP,结束了在实验室直接计算比特误差来评价系统性能的方法。在使用FEC之前,误码率一般会测量到 10^{-10} 或 10^{-11} 量级来确定误码率的最低极限。而采用硬判决的FEC,误码率只用测量到FEC阈值,即误码率在FEC的译码器的输入端,可以得到可靠修正误差。根据采用FEC的方式,Pre-FEC的值大约在 10^{-5} 至 10^{-2} 之间。一般来说,对于硬判决FEC而言,Pre-FEC的误码率作为系统性能度量,只要错误是独立统计发生的,就可以工作得相当好。而这个度量对于使用软判决FEC的更现代的系统是失败的。Pre-FEC不仅是不准确的^[32],而且失去了其概念意义,必须被信息理论等指标所取代,如归一化广义互信息(NGMI)作为预测FEC解码后性能的指标^[33]。

3.4 高速相干接口

由于采用幅相正交编码和偏振复用技术,相干收发器相对于二进制的直接检测系统,所需要的符号速率降低了4倍。2008年前后,由于CMOS技术的发展,单线路电速率从10 Gbit/s提升到28 Gbit/s。因此,基于高速离散电子器件的实验接口速率也需要快速扩展到100 Gbit/s以上。2009年,通过幅相正交4级电调制技术,在比特率增加2倍的情况下,基于56 GBaud 16 ary正交调幅(16 QAM)实现了净速率400 Gbit/s的传输^[34];到2013年,相干研究实验的波特率为107 GBaud^[35];到2015年,使用64QAM技术实现了单载波1 Tbit/s的传输^[36]。经过19年的研究,一个激光载波可以携带的信息,在1996年时需要一个完整的波分复用系统来承载。虽



然接口研究的进展令人印象深刻，但如果不考虑 PDM 导致的接口速率一次性翻倍，这对应每年 14% 的增长率，从而需要使用高阶 QAM 格式，使得每个符号编码可以携带更多的比特^[37]。这本质上是以传输范围减少为代价的，限制了此类高速接口在长途网络中的适用性。在这方面，需要指出的是，光收发器的传输距离范围主要是由其调制格式决定的，而与它的符号速率无关。

从目前来看，商业光学接口率继续以每年约 20% 的速度增长，但为了达到这一目标，人们不得不求助于高阶 QAM，这本质上限定了他们的应用范围。目前市场上的 400 Gbit/s 的单波长商用光学接口使用的是 64QAM 调制格式，传输距离可达 100 km 左右。事实上，商业符号速率仅以每年约 10% 的速度进行扩展。由于转换器和 DSP 之间的巨大带宽需求，数字相干检测需要将 ADC 和 DAC 与 CMOS DSP 集成，因此商用码率的增长相对缓慢。例如，一个数字相干接收机在 50 GBaud 下工作，其 4 个 ADC 在标称的 8 位分辨率下进行 2 倍的过采样，在 ADC 和 DSP 之间总线的运行速度需要达到 $2 \times 4 \times 8 \times 50 \text{ GBaud} = 3.2 \text{ Tbit/s}$ ，这在合理的功耗下很难实现。

3.5 光学超信道

虽然越来越难以构建具有长距离传输的高速率光学接口来支持每个光载波每年 20% 的增长速率，但是基于 CMOS 包处理（遵循摩尔定律）的 IP 路由器继续以每年 40% 的^[1] 的速度扩展。虽然有可能在 20 世纪 90 年代初将多个 IP 路由器端口聚合到一个常见的高速波分复用波长，但是现在情况发生了逆转：多个波长通常需要运输来自单个路由器端口的信息，这种反向复用的情况，是普遍不可接受的。在这方面，十年来更重要的发展之一是在 2009 年引入了“光学超信道”的概念，这是一种由多个共同产生、共同传播和共同检测的光学子载波组成的光学接口。虽然最初主要基于正交频分复用（OFDM）格式^[38]，但快速 DAC

的可用性最终使今天部署在网络中的 Nyquist 形状的超信道子载波成为可能^[39]，如图 3 所示。采用超信道技术可以进一步提升 SE，比如针对 32 GBaud 的信号，子载波间隔可以仅有 33 GHz，这样 200 GHz 的光带宽可以传输 6 个子载波，而传统方式只能传输 4 个（间隔 50 GHz）。目前用于长途传输的 400 Gbit/s 收发器采用的是刚刚标准化的 400 GbE 路由器接口，例如基于 $2 \times 200 \text{ Gbit/s}$ 的 8QAM 或 $4 \times 100 \text{ Gbit/s}$ 的 QPSK 超信道技术。

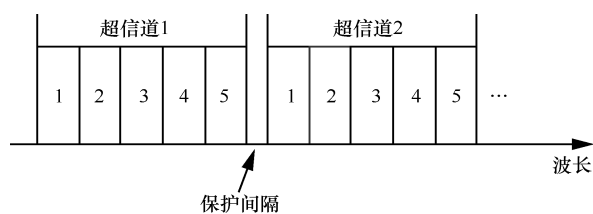


图 3 超信道光谱分布

3.6 系统容量达到极限

虽然高阶 QAM 调制格式有助于提升单波长的传输速率，但它对 WDM 系统容量的增加更为关键。与传输范围一样，主要是调制格式决定了 SE，从而决定了给定系统带宽的 WDM 容量。一般来说，基于 M-QAM 调制格式的每个符号可以携带最多 $2 \times \log M$ 个比特，其中 2 代表 PDM。然而，实际可实现的 SE 总是小于这个数。这主要是因为数字端，FEC 的额外开销、导频、帧符号以及非均匀概率的编码都会降低 SE。后一种方法称为概率星座整形（PCS）技术，即能量较高的符号发送频率低于能量较低的符号，这可以带来 1.5 dB 的信噪比提升，并允许 SE 准连续自适应，匹配不同的信道条件^[40]。在模拟端，SE 的降低是由于 WDM 通道之间的保护频带，这是在 ROADM 网络中避免 WDM 串扰和滤波性能下降所必需的。调制信号的频谱范围是由一个孤立符号脉冲的时域波形给出的，该信号通常使用发射机上的 DAC 来控制，这种技术也称为 Nyquist 脉冲整形^[39]。

从目前短距离系统到跨洋系统的 SE 和传输距离研究表明，SE 和传输距离之间的权衡遵循对数关

系,传输距离每增加一倍,SE就减少 $2\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ ^[1]。在所有传输范围内获得的最佳实验记录中,在短距离应用中使用星座最大为 4096QAM ^[41]的概率整形技术,在陆地应用中为 256QAM ,在海洋距离中为 64QAM ,后者于2017年应用在了跨大西洋光缆上。近年来SE的变化呈现出20%的年增长率,并快速接近饱和,目前研究实验^[7]的记录为每个偏振态的谱效率为 $8.65\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$,而产品^[5]目前记录为每个载波频谱效率为 $8\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。

4 未来的研究方向

4.1 每个维度接近香农极限

波分复用技术正迅速接近其香农极限,而如何解决迫在眉睫的容量危机,需要依靠5个物理维度,如图4所示,即时间、频率、幅度、相位和空间。光纤通信系统最终的容量通过将双偏振SE与系统带宽 B 和并行空间路径数 M 相乘得到。目前的研究表明,光纤通信系统的SE已经接近香农极限,通过低噪声光放大器^[42]以及低损耗、低非线性系数光纤^[43]和数字非线性补偿技术来提高信噪比的增益很小^[1]。从根本上说,通过提高信噪比的技术通常只能带来很小的容量增益,大约只有10%。因此,只有通过增加系统带宽 B 和并行空间路径数 M ,才能获得较大的(线性)容量增益。

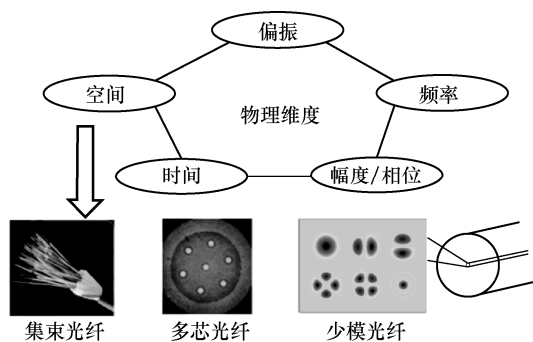


图4 光纤传输系统中可利用的5个维度

4.2 超宽带传输系统

理想情况下,扩大系统带宽可以线性增加系统容量。一般来说,如果传输系统使用从O波段

一直到L波段(即 $1260\sim1625\text{ nm}$,而不是只使用C波段),传输容量可以扩大12倍。然而从目前的发展情况来看,实现传输容量5倍的提升是更为现实的^[1]。超宽带传输系统的设计包括两个方面:跨宽带窗口的低损耗光纤;能够跨整个系统带宽的光学器件,如光学放大器、激光器和滤波器。其中前者适用于许多海洋和DCI的情况,而后者是典型的陆地骨干网络和城域网络。

一般情况下,未使用光纤的运营商有强烈的动机在尽可能宽的系统带宽上利用其可用的光纤资源,因为租用和部署新光纤都是很昂贵的。关于超宽带系统的第二个方面,即整个系统带宽上的光学子系统的可用性,很重要的一点是要考虑相对带宽,即系统带宽与系统中心频率的比值。在大多数工程领域,包括微波和光学,器件和子系统的复杂性随着其相对带宽的增加而增加。目前C波段(对应EDFA的增益带宽)的相对带宽为2.3%;最近100 nm宽的半导体光放大器的相干传输^[6]演示跨越了13 THz的带宽,对应的相对带宽为6.6%;从O波段到L波段的频率占据25%的相对带宽。构建跨越如此大的相对带宽的放大器、可调谐激光器或可调谐滤波器是非常复杂的,这迫使构建超宽带系统所需的子系统要采用分频带的方法。由于不同的子频带采取不同的技术,分频带系统通常比单频带系统的每比特成本更高。很明显“波长并行性”不是真正的并行性,一个真正的并行系统应该并行部署相同的系统器件,并通过减少体积和集成来降低成本。因此,如果需要将容量扩大100倍甚至1000倍,增加可用频带的宽度并不是一个有效的方案。

4.3 增加并行空间路径数

通过前面关于带宽扩展限制的分析可以看出,从长远来看,空间并行性是扩展系统容量的唯一选择。空间复用(SDM)是指使用并行空间路径,利用 $\text{WDM}\times\text{SDM}$ 矩阵来对波分复用(WDM)系统进行补充。



尽管光谱和空间超信道都受益于阵列集成，但是这两种方法有一些基本的差异。光谱超信道可以提供更紧密的子载波间隔，并在光网络中利用非线性数字补偿技术补偿子载波间的串扰，但是这只能带来很小的性能提升^[44]。产生大量的子载波需要对多个波长进行管理。这可以通过集成多路激光或利用外部提供的光频梳，然后再将调制后的信号在收发器内复用到一根光纤上。这种方式当需要维护超信道光谱的可调谐性时存在一定的问题，这主要是由于每个收发器需要一个可编程滤波器。此外，集成器件的波长变异性以及在超信道收发器中进行增益平坦放大的要求也会带来一些实际问题。另一方面，空间超信道可以在单个波长上运行，这使得集成设计更加容易。例如，每个超信道收发器只需要一个激光器，所有集成器件的工作波长相同，并且不需要在超信道收发器内集成增益平坦光放大器。与光谱超信道相比，单波长光源作为 LO 用于超信道内的所有调制器和所有接收器，对激光功率的要求较低。重要的是，由密集的空间路径引起的线性串扰，可以通过多输入多输出（MIMO）的数字信号处理方式进行补偿。

近 10 年来，SDM 研究涵盖了广泛变化的传输介质，包括非耦合型和耦合型多芯光纤（MCF）、多模光纤（MMF）、少模光纤（FMF）以及相对应的线性和非线性传播效应^[45-46]。在这样的研究背景下，耦合 MCF 显示出比单芯光纤略好的非线性传输性能^[47]。不耦合的核心—光纤方法的一个主要优点是它不依赖于特殊的 DSP，因此可以用传统的收发器实现。然而，制造这种光纤的复杂性和成本目前都无法与传统的单模光纤相比拟^[48]。所有基于其他光纤的传输都需要定制的 MIMO-DSP ASIC 来解开芯或模式之间的混合。因此，通过这些光纤的空间路径的数量将受到 ASIC 的复杂性和接口速率的限制。混合解决方案给出了一个折中方案，采用少量模态，名义上不耦合的光纤芯^[49]。到目前为

止，几乎所有的研究 SDM 实验都使用离线处理。最新的 SDM 系统实验使用 C+L 波段在 6 模 19 芯光纤上传输容量达到了 10 Pbit/s。该系统由 84 246 个 SDM/WDM 通道^[9]组成。

无论以上哪种 SDM 技术或超通道架构最终会被商业化，阵列集成的光学器件将是必不可少的。例如，为了构建 10 Tbit/s 的超通道，必须集成 10 个 1 Tbit/s 的传输单元。如果 1 Tbit/s 的传输单元无法实现高度集成阵列形式，可以过渡到一个相应的低速率的更多单位，例如 100×100 Gbit/s，即单元数目和单元单个速率的乘积必须等于超信道的总容量。目前来看，为实现 SDM 系统的集成，需要解决以下 3 个难题：光学阵列集成；光电集成，即光电阵列与 CMOS DSP ASIC 的紧密集成；整体 DSP 集成，即共同设计 DSP 来弥补高密度集成带来的性能不足。这些都是未来集成 SDM 系统需要解决的问题。

5 结束语

本文回顾了过去 20 年来光纤通信系统的发展历程，并对未来的发展进行了推断。本文认为在传输和光交换方面，基于 WDM×SDM 形式的并行空间路径以及集成单元矩阵是唯一可扩展的解决方案。本文分析了光谱超信道和空间超通道实现阵列集成的好处。空间超信道适用于点对点系统，需要专用光纤安装，如 DCI 和海缆光纤传输系统。另一方面，光谱超信道似乎更有益于陆地网状网络，需要利用各种已安装的光纤基础设施尽可能多地提升系统容量。

参考文献：

- [1] WINZER P J, NELSON D T N, CHRAPLYVY A R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 24190-24239.
- [2] TRISCHITTA P, COLAS M, GREEN M, et al. The TAT-12/13 cable network[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 34(2): 24-28.
- [3] GNAUCK A H, TKACH R W, CHRAPLYVY A R, et al. High-

- capacity optical transmission systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9): 1032-1045.
- [4] CHO J, CHEN X, CHANDRASEKHAR S, et al. Trans-atlantic field trial using high spectral efficiency probabilistically shaped 64-QAM and single-carrier real-time 250 Gbit/s 16-QAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 103-113.
 - [5] ZAMI T, LAVIGNE B, PARDO O B, et al. 31.2Tbit/s real time bidirectional transmission of 78×400 Gbit/s interleaved channels over C band of one 90-km SMF span[C]//*Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC)*, March 13-15, 2018, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018.
 - [6] RENAUDIER J, MESEGUER A C, GHAZISAEIDI A, et al. First 100-nm continuous-band WDM transmission system with 115 Tbit/s transport over 100 km using novel ultra-wideband semiconductor optical amplifiers[C]//*European Conference on Optical Communication (ECOC)*, Sep 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. Piscataway: IEEE Press, 2017.
 - [7] OLSSON S L I, CHO J, CHANDRASEKHAR S, et al. Record-high 17.3 bit/(s·Hz) spectral efficiency transmission over 50 km using probabilistically shaped PDM 4096-QAM[C]//*Optical Fiber Communications Conference and Exposition*, March 13-15, 2018, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2018.
 - [8] CAI J X, BATSHONA H G, MAZURCAYK M V, et al. 51.5 Tbit/s capacity over 17 107 km in C+L bandwidth using single mode fibers and nonlinearity compensation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018: 1.
 - [9] SOMA D, WAKAYAMA Y, BEPPU S, et al. 10.16 Pbit/s dense SDM/WDM transmission over low-DMD 6-mode 19-core fibre across C+L Band[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018: 1.
 - [10] TURUKHIN A V, SINKIN O V, BATSHON H G, et al. High capacity ultra long-haul power efficient transmission using 12-core fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(4): 1028-1032.
 - [11] HECHT J, City of light: the story of fiber optics[J]. *Isis*, 2001(1): 92-94.
 - [12] SCHWARTZ M I, REENSTRA W A, MULLINS J H, et al. The chicago lightwave communications project[J]. *Bell System Technical Journal*, 1978, 57(6): 1881-1888.
 - [13] BERRY R W, BRACE D J, RAVENSCROFT I A. Optical fiber system trials at 8 Mbit/s and 140 Mbit/s[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1978, 26(7): 1020-1027.
 - [14] AGRELL E, KARLSSON M, CHRAPLYVY A R, et al. Roadmap of optical communications[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(6).
 - [15] FORGHIERI F, TKACH R W, CHRAPLYVY A R, Fiber nonlinearities and their impact on transmission systems[J]. *Optical Fiber Telecommunications IIIA*, 1997, 50(2): 196-264.
 - [16] CHAPLYVY A R, TKACH R W, WALKER K L, Optical fiber for wavelength division multiplexing[J]. *IEEE Circuits and Devices Magazine*, 1996, 12(5): 49-50.
 - [17] CHRAPLYVY A R, GNAUCK A H, TKACH R W, et al. 8×10 Gbit/s transmission through 280 km of dispersion-managed fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(10): 1233-1235.
 - [18] WINZER P J, ESSIAMBRE R J. Advanced optical modulation formats[J]. *Optical Fiber Telecommunications*, 2008, 94(5): 23-93.
 - [19] FISHMAN D A, THOMPSON W A, VALLONE L. LambdaXtreme® transport system: R&D of a high capacity system for low cost, ultra long haul DWDM transport[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2006, 11(2): 27-53.
 - [20] GNAUCK A H, CHARLET G, TRAN P, WINZER P J, et al. 25.6 Tbit/s C+L-band transmission of polarization-multiplexed RZ-DQPSK signals[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(1): 79-84.
 - [21] WINZER P J, RAYBON G, SONG H, et al. 100-Gbit/s DQPSK transmission: from laboratory experiments to field trials[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(20): 3388-3402.
 - [22] LINKE R A, GNAUCK A H. High-capacity coherent lightwave systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1988, 6(11): 1750-1769.
 - [23] ALIC N, PAPEN G C, SAPERSTEIN R E, et al. Signal statistics and sequence estimation in intensity modulated fiber optic links containing a single optical pre-amplifier[C]//*Leos Summer Topical Meetings*, July 25-27, 2005, San Diego, USA. Piscataway: IEEE Press, 2005.
 - [24] FARBERT A, LANGENBACH S, STOJANOVIC N, et al. Performance of a 10.7 Gbit/s receiver with digital equalizer using maximum likelihood sequence estimation[C]//*European Conference on Optical Communication(ECOC)*, Sep 5-9, 2004, Stockholm, Sweden. Piscataway: IEEE Press, 2004.
 - [25] MCGHAN D, LAPERLE C, SAVEHENKO A, et al. 5 120 km RZ-DPSK transmission over G.652 fiber at 10 Gbit/s without optical dispersion compensation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(2): 400-402.
 - [26] CHARLET G, MAAREF N, RENAUDIER J, et al. Transmission of 40 Gbit/s QPSK with coherent detection over ultra-long distance improved by nonlinearity mitigation[C]//*European Conference on Optical Communication(ECOC)*, Sep 4-28, 2006, Cannes, France. Piscataway: IEEE Press, 2006.
 - [27] SUN H, WU K T, ROBERTS K. Real-time measurements of a 40 Gbit/s coherent system[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 873-879.
 - [28] CHEN X, ANTONELLI C, CHANDRASEKHAR S. Kramers-kronig receivers for 100 km Datacenter interconnects[J]. *Lightwave Technology*, 2018, 36(1): 79-89.
 - [29] ESSIAMBRE R J, WINZER P J, LEE W, et al. Electronic predistortion and fiber nonlinearity[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1804-1806.
 - [30] ESSIAMBRE R J, TKACH R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. *Proceedings of IEEE*, 2012, 100(5): 1035-1055.
 - [31] HASEGAWA T, YAMAMOTO Y, HIRANO M. Optimal fiber design for large capacity long haul coherent transmission[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 706-712.
 - [32] CHO J, XIE C, WINZER P J. Analysis of soft-decision FEC on non-AWGN channels[J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7915-7928.
 - [33] CHO J, SCHMALEN L, WINZER P J. Normalized generalized



- mutual information as a forward error correction threshold for probabilistically shaped QAM[C]//European Conference on Optical Communication(ECOC), Sep 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [34] WINZER P J, GNAUCK A H, RAYBON G, et al. 56-Gbaud PDM-QPSK: coherent detection and 2 500 km transmission[C]//European Conference on Optical Communication(ECOC), Sep 20-24, 2009, Vienna, Austria. Piscataway: IEEE Press, 2009.
- [35] RAYBON G, ADAMIECKI A L, WINZER P J, et al. Single-carrier 400G interface and 10-channel WDM transmission over 4,800 km using all-ETDM 107-Gbaud PDM-QPSK[C]// Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC), Sep 22-26, 2013, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [36] RAYBON G, ADAMIECKI A, CHO J, et al. Single-carrier all-ETDM 1.08 Tbit/s line rate PDM-64-QAM transmitter using a high-speed 3-bit multiplexing DAC[C]//IEEE Photonics Conference (IPC'15), Oct 4-8, 2015, Reston, USA. Piscataway: IEEE Press, 2015.
- [37] NAKAZAWA M, YOSHIDA M, KASAI K. 20 Msymbol/s, 64 and 128 QAM coherent optical transmission over 525 km using heterodyne detection with frequency-stabilized laser[J] Electronics Letters, 2006, 42(12): 710-712.
- [38] MA Y, YANG Q, TANG Y, et al. 1-Tbit/s per channel coherent optical OFDM transmission with subwavelength bandwidth access[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition (OFC), March 22-26, 2009, San Diego, California, USA. Piscataway: IEEE Press, 2009.
- [39] GOTO H, KASAI K, YOSHIDA M, et al. Polarization-multiplexed 1 Gsymbol/s, 128 QAM (14 Gbit/s) coherent optical transmission over 160 km using a 1.4 GHz Nyquist filter[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exposition(OFC), Feb 24-28, 2008, San Diego, California, USA. Piscataway: IEEE Press, 2008.
- [40] BUCHALI F, STEINER F, BOCHERR G. Rate adaptation and reach increase by probabilistically shaped 64-QAM: an experimental demonstration[J]. Lightwave Technology, 2016, 34(7): 1599-1609.
- [41] OLSSON S L I, CHO J, CHANDRASEKHAR S, et al. Probabilistically shaped PDM 4096-QAM transmission over up to 200 km of fiber using standard intradyne detection[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4522-4530.
- [42] TONG Z, LUNDSTROM C, ANDREKSON P A, et al. Towards ultrasensitive optical links enabled by low-noise phasesensitive amplifiers[J]. Nature Photonics, 2011, 5(7): 430-436.
- [43] YAMAMOTO Y, KAWAGUCHI Y, HIRANO M. Low-loss and low nonlinearity pure-silica-core fiber for C- and L-band broadband transmission[J]. Lightwave Technology, 2016, 34(2): 321-326.
- [44] DAR R, WINZER P J. Nonlinear interference mitigation: Methods and potential gain[J]. Lightwave Technology, 2017(35): 903-930.
- [45] KLAUS W, PUTTNAMU B J, LUIS R S, et al. Advanced space division multiplexing technologies for optical networks[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communication and Networking, 2017, 9(4): C1.
- [46] 罗鸣, 邱英, 李响, 等. 560 Tbit/s 相干光双偏振 DFT-s OFDM 32QAM 信号 10 km 单模 7 芯光纤传输实验[J]. 光通信研究, 2017(2): 1-4, 8.
- LUO M, QIU Y, LI X, et al. 560 Tbit/s coherent optical dual polarization DFT-s OFDM 32QAM signal 10 km single-mode 7-core optical fiber transmission experiment [J]. Optical Communication Research, 2017(2): 1-4, 8.
- [47] ANTONELLI C, SHTAIF M, MECOZZI A. Modeling of nonlinear propagation in space-division multiplexed fiber-optic transmission[J]. Lightwave Technology, 2016, 34(1): 36-54.
- [48] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature Photonics, 2013, 7(5): 354-362.
- [49] RANDEL S, SIERRA A, RYF R, et al. Crosstalk tolerance of spatially multiplexed MIMO systems[C]//European Conference on Optical Communication(ECOC), Sep 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Piscataway: IEEE Press, 2012.

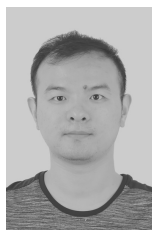
[作者简介]



冯勇华(1979—), 男, 博士, 中国信息通信科技集团烽火通信科技股份有限公司系统工程师, 主要研究方向为高速光传输与光交换相关技术和产品开发。



李响(1987—), 男, 博士, 中国信息通信科技集团武汉邮电科学研究院有限公司光纤通信技术和网络国家重点实验室高级工程师, 主要研究方向为光纤通信系统架构、数字信号处理算法、微波光子学、光纤传感以及人工智能在光纤网络中的应用。



曹权(1986—), 男, 博士, 中国信息通信科技集团武汉飞思灵微电子有限公司系统工程师, 主要研究方向为硅光子集成技术的研究和产业化应用。



郭志霞(1973—), 女, 中国信息通信科技集团烽火通信科技股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为大容量智能 OTN 系统架构、100 Gbit/s 及超 100 Gbit/s 光传输系统等。