

大容量光传输系统发展现状

刘博, 李丽楠

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

摘要 综述了大容量光传输系统的发展现状及最新技术研究进展。理论和实验研究表明, 由于光纤的非线性及放大器的带宽等限制, 通信容量已经接近了单模光纤的传输极限。因此, 光纤通信的发展需要克服单载波传输中高速器件的限制瓶颈。本文总结了多载波技术的产生方案: 用频分复用 (OFDM) 或奈奎斯特波分复用 (Nyquist-WDM) 技术提高频谱的利用率, 增加信道容量实现 P bit/s 甚至更高传输速率。另一方面需要从研究光纤本身的角度出发, 在考虑成本效益和能源效率的前提下充分利用光纤的空间维度。空分复用技术 (多模、多芯) 及角动量复用技术 (OAM) 将成为未来超越单模光纤的容量极限、大幅度提高光纤传输容量的研究重点。

关键词 大容量光传输系统; 高频谱效率调制; 多载波; 模式复用

光纤通信系统指光波作为信息载体, 光纤作为传输介质的一种通信方式。特点是传输频带宽, 因而通信容量大; 传输的损耗低, 中继距离相应变长; 光纤工艺精制: 直径小、线细、重量轻, 以石英为原材料, 来源广; 绝缘、抗电磁干扰性能强、保密性好; 还具有抗腐蚀能力强、可绕性好、抗辐射能力强等优点, 可用于特殊环境或军事上。光纤通信系统的基本构成模块有光发射机、光纤信道及光接收机, 系统模型如图 1 所示, 在发送端首先将传送的信息变成电信号, 然后通过驱动电路和调制器将电信号调制到激光器发出的光上, 使光的强度随电信号的幅度 (频率) 变化而变化, 然后发送到光纤中传输; 在接收端, 光电探测器将收到的光信号转换成电信号, 经解调后恢复原信息。

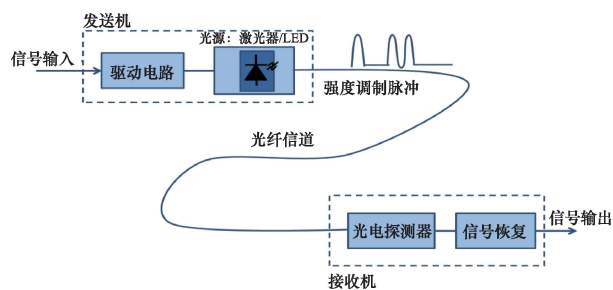


图 1 光通信系统模型

Fig. 1 Model of optical communication system

根据第 10 次 Cisco Visual Networking Index (VNI) 年度预测, 2019 年的年度互联网协议 (IP) 流量将增加到 2014 年的 3 倍, 创造 2 ZB 的新纪录, 全球互联网用户、个人设备和机器对机器 (M2M) 互联的增加, 所需宽带速度更快以及高级视频服务的使用等是流量快速增长的根本原因^[1]。一般情况下, 这些变化预计将带来全球 IP 流量年复合增长率 (CAGR) 提升至 23%。如图 2 所示, 思科推算估计, 2012—2017 年, 全球 IP 数据流量将增至 2.77 倍, 年复合增长率为 22.59%; 据统计, 亚太地区的 IP 数据流量约占全球数据流量的 36.01%。与 2014 年全球 IP 流量的每月 59.9 EB 相比, 2019 年每月将达到 168 EB, 明显增长。2019 年, 全球 IP 网络传送的流量几乎为之前所有“互联网年” (1984—2013 年) 传送流量的总和。

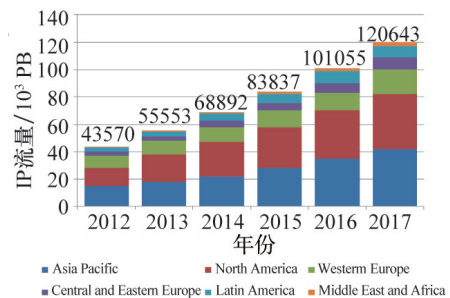


图 2 全球 IP 流量预测

Fig. 2 Global IP traffic forecast

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2013AA013403, 2015AA015501, 2015AA015502, 2015AA015504, 2015AA016901); 国家自然科学基金项目 (61425022, 61522501, 61307086, 61475024, 61275158, 61201151, 61275074, 61205066); 北京市科技新星计划项目 (Z141101001814048); 北京优秀博士学位论文培育基金项目 (20121001302); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (20120005110003, 20120005120007); 中央高校基本科研业务费专项 (2014RC0203)

作者简介: 刘博, 讲师, 研究方向为融合网络和光传输, 电子信箱: dabaotoo@qq.com

引用格式: 刘博, 李丽楠. 大容量光传输系统发展现状[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 20-33; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.002

中国电信公司科技委主任韦乐平曾预言：“未来5年，中国骨干线路网络流量的年增长率依然会高达60%~70%，这意味着5年后的干线网络带宽要求将是当前的10~15倍，骨干传输网总带宽将从64 Tbit/s增加到至少120~155 Tbit/s，甚至200 Tbit/s以上。”^[12]持续增长的业务流量迫使运营商不断增加带宽供应以适应新的市场增长需求，光纤通信系统的研究、发展、标准化和部署进程，在支撑日益增长的骨干网业务流量中始终发挥着重要作用。然而，光通信产业内部普遍预测，曾被喻为拥有“无限容量”的光纤通信系统在2025年前后将达到饱和，发展具有突破性的光纤通信技术与系统，以满足不断增长的带宽需求，具有现实迫切性。因此，下一代超高速光纤通信系统是国内外各大公司与科研机构的重大研究内容，未来前景依然广阔。

提高光传输系统容量的方式主要包括以下几种：通过增加光载波的数量提高WDM系统的总带宽，通过新型的高阶调制格式、偏振复用提高频谱效率以及通过模式复用进一步提高单根光纤的传输容量^[3-6]。

1 高频谱效率调制技术

实现太比特及更高速率传输系统的研究多基于提升符号速率、增加载波数量、提高调制格式阶数等技术手段，以尽可能地将光纤所能提供的带宽应用到极致，最大化地提升系统频谱效率。针对目前接收机数模转换器(DACs)等器件的速率瓶颈限制，一系列高频谱效率的调制技术发展开来，如Nyquist-WDM技术、光OFDM技术、高阶调制格式等^[7-12]。其中Nyquist-WDM及光OFDM被认为是下一代太比特传输系统中非常具有竞争力的两类解决方案。

1.1 Nyquist-WDM

如图3所示，奈奎斯特滤波的时域脉冲波形为sinc型，其对应频域是具有滚降系数的升余弦滤波。

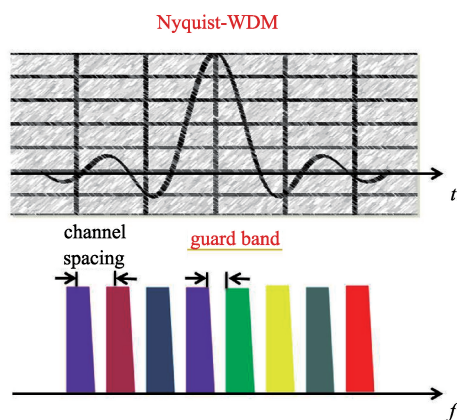


图3 Nyquist-WDM信号

Fig. 3 Nyquist-WDM signal

Nyquist-WDM技术依靠脉冲成型和频谱过滤技术滤除所有Nyquist频率以外的高频成分，使得传输信号频谱被强迫成矩形接近Nyquist极限，而仍然能通过信号的采样重建复原信号，从而保证了每个载波占用的频谱带宽与每个载波的符号速率一致，可以实现信道间无间隔的灵活排列，并且不需要频率同步^[13-14]。其主要优势在于最大限度地保证了WDM系统的频谱效率，理论上可以将系统频谱利用效率提高1倍。同时由于其较窄的频谱宽度，Nyquist-WDM技术对发射端和接收端电带宽的要求较低，还可以平衡传输系统中的信道间串扰(ICI)和码间干扰(ISI)，实现灵活栅格技术，较好地支持软定义(SDN)光网络，已经成为下一代太比特超信道系统中的最具竞争力的主要解决方案。

Nyquist-WDM技术自2010年在OFC上提出，作为除电光正交频分复用(electro-optical OFDM, e/o-OFDM)外达到1 Tbit/s信道速率技术的对应和补充，因其生成和接收方式简单而得到广泛研究和应用。目前应用Nyquist-WDM技术达到的单纤传输速率记录为32.5 Tbit/s，该实验由德国卡尔斯鲁厄技术研究所(Karlsruhe Institute of Technology, KIT)的Juerg Leuthold研究组(现瑞士苏黎世联邦理工学院, Eidgenössische Technische Hochschule, ETH)完成，Nyquist-WDM系统实验装置如图4所示，该系统包含4个部分：光梳源、2个Nyquist-WDM发射机、1个偏振复用模拟器和1个Nyquist-WDM相干接收机^[15]。其中光梳源模块产生325个光载波，波长范围为1533.47~1566.22 nm，信道间隔为12.5 GHz。在调制模块，信号速率为12.5 GHz，与光载波信道间隔相等，光载波被梳状滤波器分为奇载波和偶载波两组，分别进行调制，然后耦合形成Nyquist-WDM信号，送入偏振合束器模拟偏振复用^[16]。信号经过放大以后被送入光纤信道进行传输，信道光纤为SMF-28，整个信道只有掺铒光纤放大器(EDFA)，对整个Nyquist-WDM信号来说，最佳发射功率为18 dBm。在接收端进行16QAM解调之前，对接收信号进行DSP：色散补偿、数字砖墙滤波用来滤除邻近信道的残余，偏振跟踪算法用来进行偏振解复用、时钟相位恢复^[17]。从整体来看，该系统实现了单模光纤中32.5 Tbit/s 16QAM Nyquist-WDM传输，频谱效率达到6.4 bit/(s·Hz)，并且仅利用了单一脉冲激光器产生的相位锁定的光频梳作为各信道载波，相比传统WDM系统，不用激光器阵列，大大节约了能耗，降低了成本。

近年来，在Nyquist-WDM技术发展的基础上，Super-Nyquist-WDM技术成为新的研究热点，如图5所示，与Nyquist-WDM相比，其具有更小的信道间隔以更好地实现光纤系统扩容。目前应用Nyquist-WDM技术达到的最高传输记录为140.7 Tbit/s，由日本KDDI R&D实验室的相关研究人员实现，实验设置如图6所示，该传输系统使用七芯光纤，实现了140.7 Tbit/s、传输距离7326 km的信号传输，其中信号为30 Gbaud的DP-QPSK，频率间隔为25 GHz，整个系统的容量距离乘积可达到1.03 Exabit/(s·km)^[18-20]。

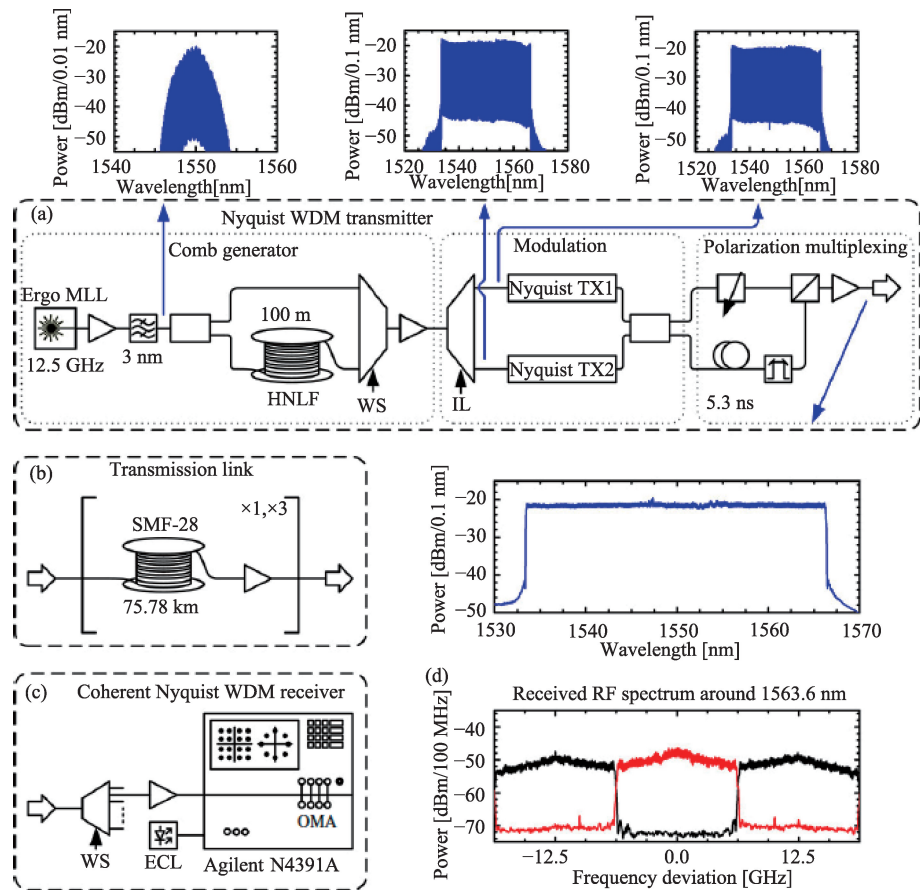


图4 Nyquist-WDM系统实验装置

Fig. 4 Experimental setup for Nyquist-WDM system

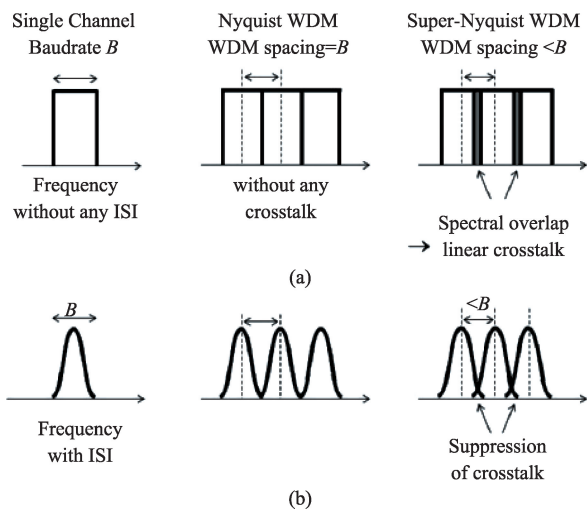


图5 WDM信道间隔与信号速率关系

Fig. 5 Relationship between WDM channel spacing and signal rate

1.2 光OFDM调制技术

光OFDM是多载波密集调制技术,利用载波间的正交性,可以在相邻载波频谱部分交叠的情况下保证每个载波间

无串扰,从而使传输系统可以达到更高频谱效率。此外,OFDM技术使用多路低速链路并行传输的方式替代单链路的高速传输,其调制解调是通过快速反傅里叶变换/快速傅里叶变换(IFFT/FFT)实现,使得其DSP实现起来更加简单,同时对色散(CD)和偏振模色散(PMD)的抵抗力更强^[21]。光OFDM技术受到了光通信领域的广泛关注,其中采用相干接收机进行检测的相干检测光OFDM(CO-OFDM)结合了两者的技术特点与优势,已成为下一代太比特相干光传输系统中至关重要的技术。2006年澳大利亚墨尔本大学(Melbourne University)的William Shieh教授提出将电的基带OFDM信号直接调制到光载波上,是首个将OFDM理论引入光纤通信系统的案例。

OFDM信号调制方式因将高速的串行信号转化成了低速的并行信号,波特率大大降低,因而更易与具有高频谱效率特性的高阶调制格式(如QAM调制)相结合。现在应用e/o-OFDM技术达到的单纤传输速率记录由NEC Lab保持,达101.7 Tbit/s(370×294 Gbit/s),传输距离165 km(3×55 km),这也是目前光纤通信的单芯-单模光纤的最高传输速率,其实验设置如图7所示,该系统首次将12000个OFDM子载波和PDM-128QAM结合,全部使用拉曼放大器,采用基于导频

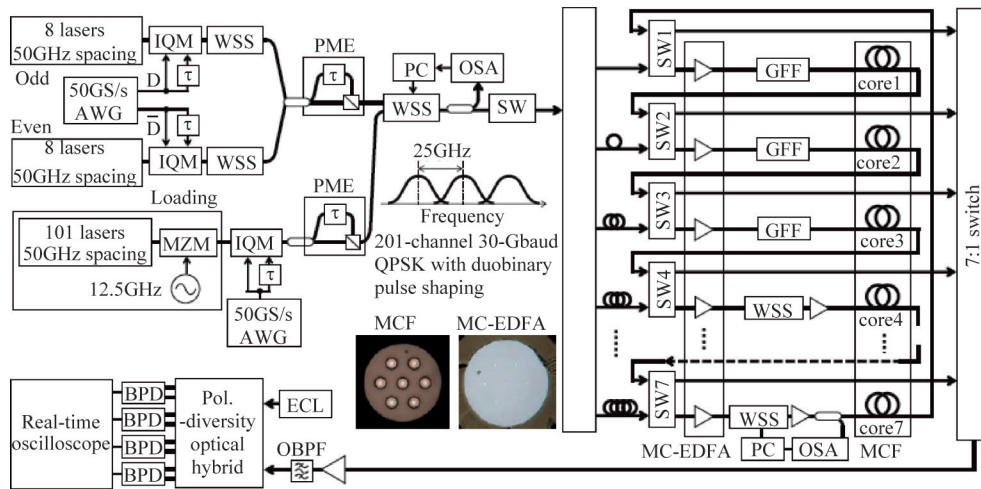


图6 Super-Nyquist-WDM 传输系统实验装置

Fig. 6 Experimental setup for Super-Nyquist-WDM transmission system

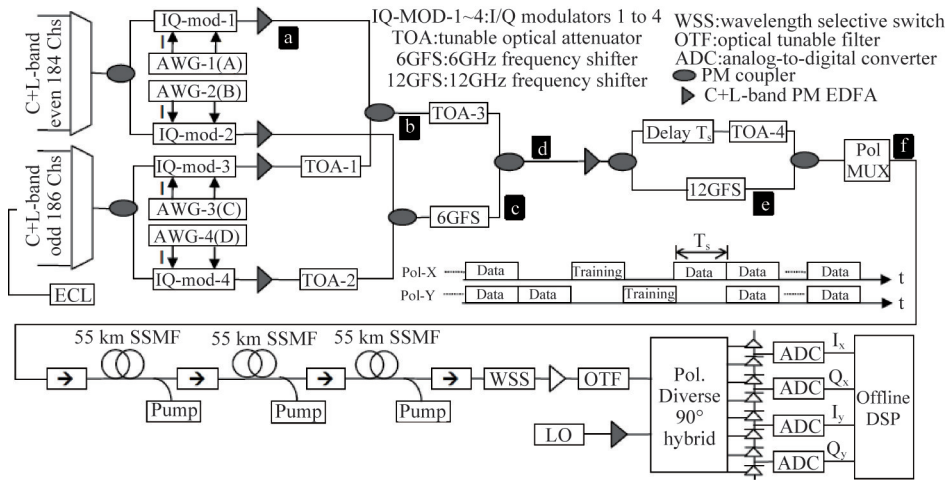


图7 PDM-128QAM OFDM 传输系统实验装置

Fig. 7 Experimental Setup for PDM-128QAM OFDM transmission system

的相位噪声消除方案和电域预均衡和去均衡技术,实现了频率效率高达 11 bit/(s·Hz)的 C+L 波段光纤系统传输^[22]。而应用 e/o-OFDM 技术的 1 Tbit/s 速率量级传输最远距离达到 7200 km,由 Alcatel-Lucent 贝尔实验室(Bell Labs)保持。

1.3 高阶调制格式

采用合适的调制格式是搭建低成本、大容量、高频谱效率光通信系统的关键。采用新型调制格式,例如正交幅度调制格式(QAM)可实现在符号速率不变的情况下,比特速率加倍,频谱利用率提高,传输容量成倍增长。新型调制格式作为提高传输速率的最有效途径,成为国际上光通信技术研究的一个热点。近年来,OFC、ECOC 等国际会议上也报道了许多研究成果。Tatsunori Omiya 等采用高阶调制信号 256-QAM 信号,结合 OFDM 和偏分复用(PDM)技术,子载波传输容量 400 Gbit/s,获得了 14 bit/(s·Hz)频谱利用率^[23,24]。系统框图如图 8 所示。

Mazurczyk 等搭建 16-QAM 相干传输系统,结合 PDM 技

术,利用 286 个激光器实现了 6630 km 的光纤传输实验,频率间隔为 17 GHz,频谱效率达 6.1 bit/(s·Hz),总速率达 30 Tbit/s^[25-26]。发射端装置如图 9 所示。

2014 年的光纤通信会议(Optical Fiber Communication, OFC)报道,2048 QAM 已经被日本东北大学(Tohoku University)Nakazawa 教授组做出了实验验证^[27]。2048 QAM 也是目前为止多级调制格式的世界纪录,其比特率为 66 Gbit/s,谱效率达到 15.3 bit/(s·Hz),传输距离 150 km。2048 QAM 相干光传输系统如图 10 所示。

近年来,将高阶调制格式应用到 Nyquist-WDM 或者 CO-OFDM 系统中进一步提升系统频谱效率的研究也在飞速发展。2012 年中兴通讯股份有限公司(ZTE)美国实验室的余建军等采用偏复用的正交幅度调制(PDM-16QAM)信号实现了 Nyquist-WDM 系统 1200 km 的传输,系统频谱利用效率可达 7.47 bit/(s·Hz)^[28]。该实验采用 DSP 预补偿方案在发射端进行补偿,方案如图 11 所示,整体传输实验设置如图 12 所示。

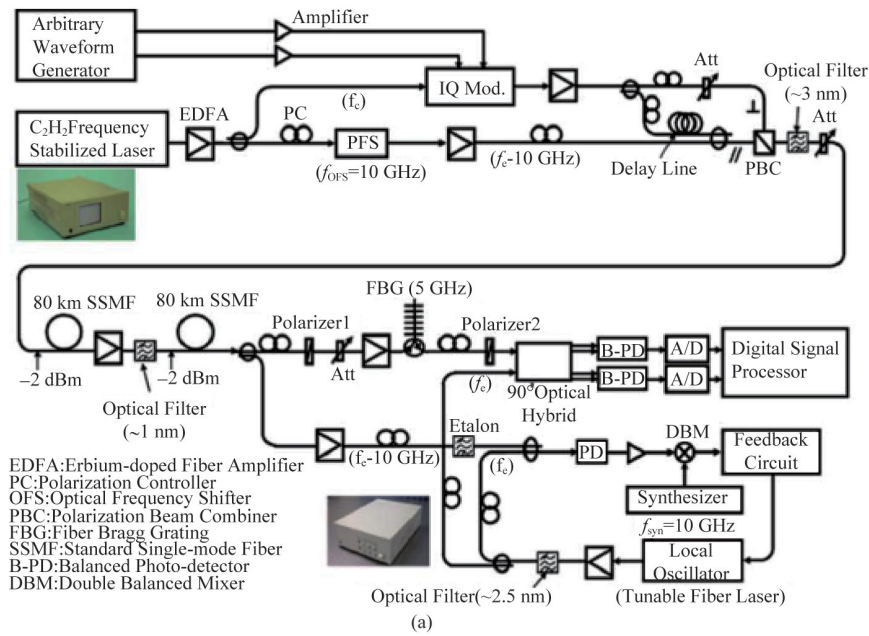


图 8 偏振复用 4-symbol/s 256-QAM 相干光传输实验设置

Fig. 8 Experimental setup for Pol-Mux, 4-Gsymbol/s, 256-QAM coherent optical transmission.

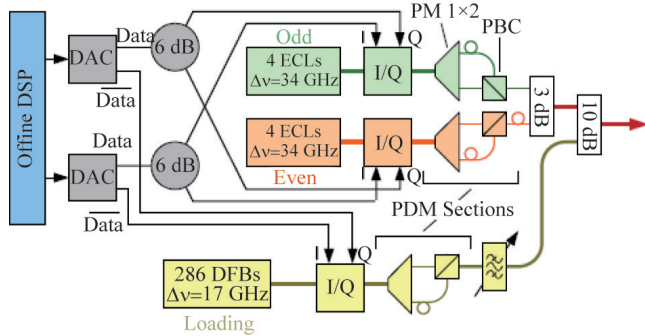


图 9 发射端装置

Fig. 9 Transmitter setup schematic

2012年,余建军等采用PDM-64QAM调制信号与Nyquist-WDM系统相结合实现了30 Tbit/s比特系统传输实验^[29]。系统设置如图13所示,采用三信道WDM进行传输,单个10 Tbit/s的超级信道包含100个Nyquist DWDM子信道,频谱效率可达7.9 bit/(s·Hz),系统传输320 km以后整个信道的误码率低于 2×10^{-2} 。

2013年日本电机有限责任公司(NEC)美国实验室报道了光OFDM系统中双偏振PDM-QPSK及PDM-8QAM信号1503 km的传输实验,实现了21.7 Tbit/s的大容量传输。2014年该机构又实现了Nyquist-WDM超信道系统太比特传输实现,分别进行了PDM-16QAM信号54.2 Tbit/s 634 km的传输和PDM-8QAM信号40.5 Tbit/s 1822 km的长距离传输。

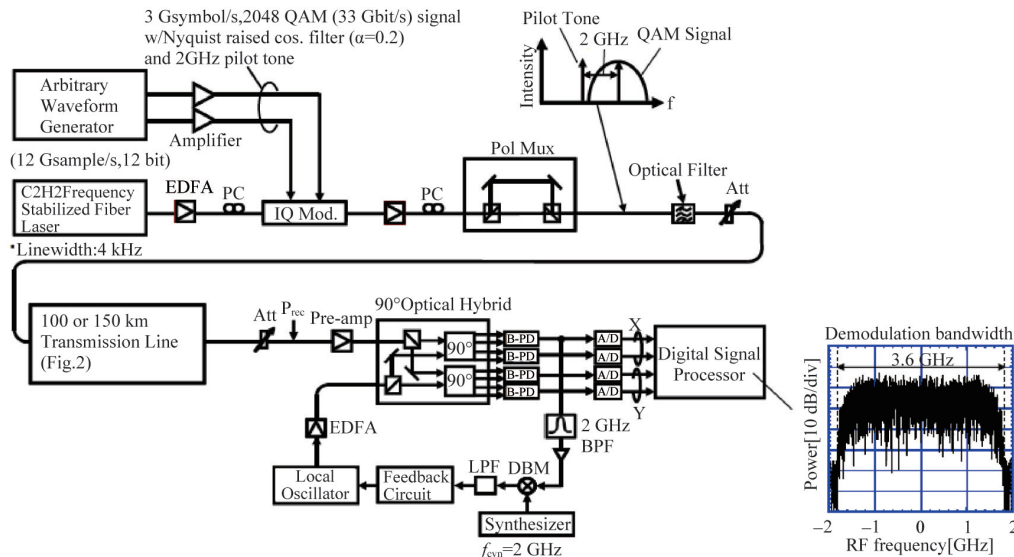


图 10 2048 QAM(66 Gbit/s)相干光传输系统

Fig. 10 Experimental setup for 2048 QAM (66 Gbit/s) coherent transmission

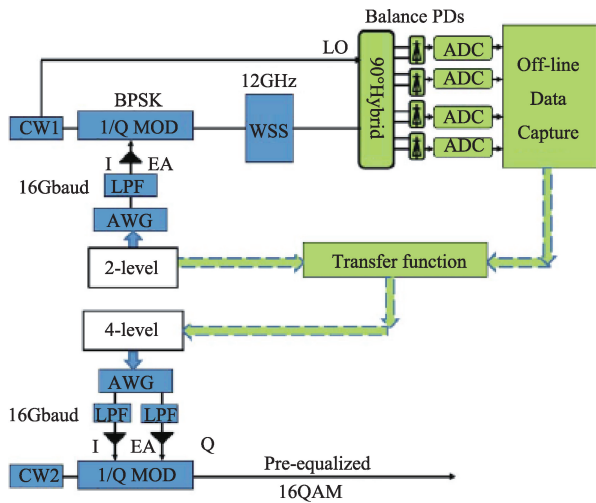


图 11 发射端 DSP 预补偿原理
Fig. 11 Principle of DSP pre-equalization in the transmitter

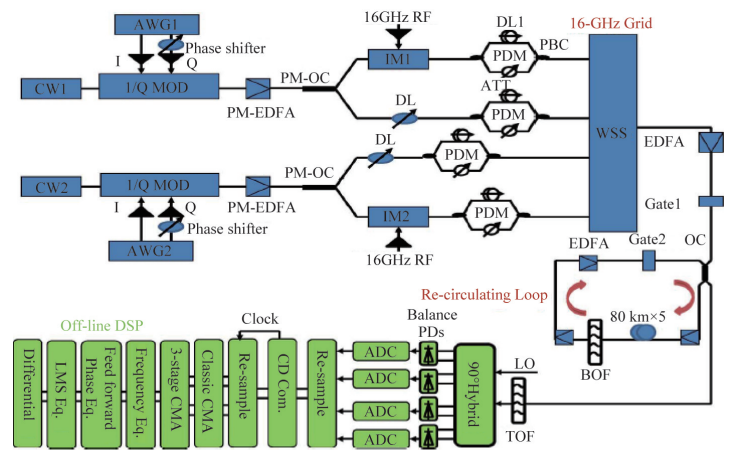


图 12 6x128 Gbit/s N-WDM PDM-16QAM 传输实验系统
Fig. 12 Experimental setup for the generation and transmission of a 6x128 Gbit/s N-WDM PDM-16QAM

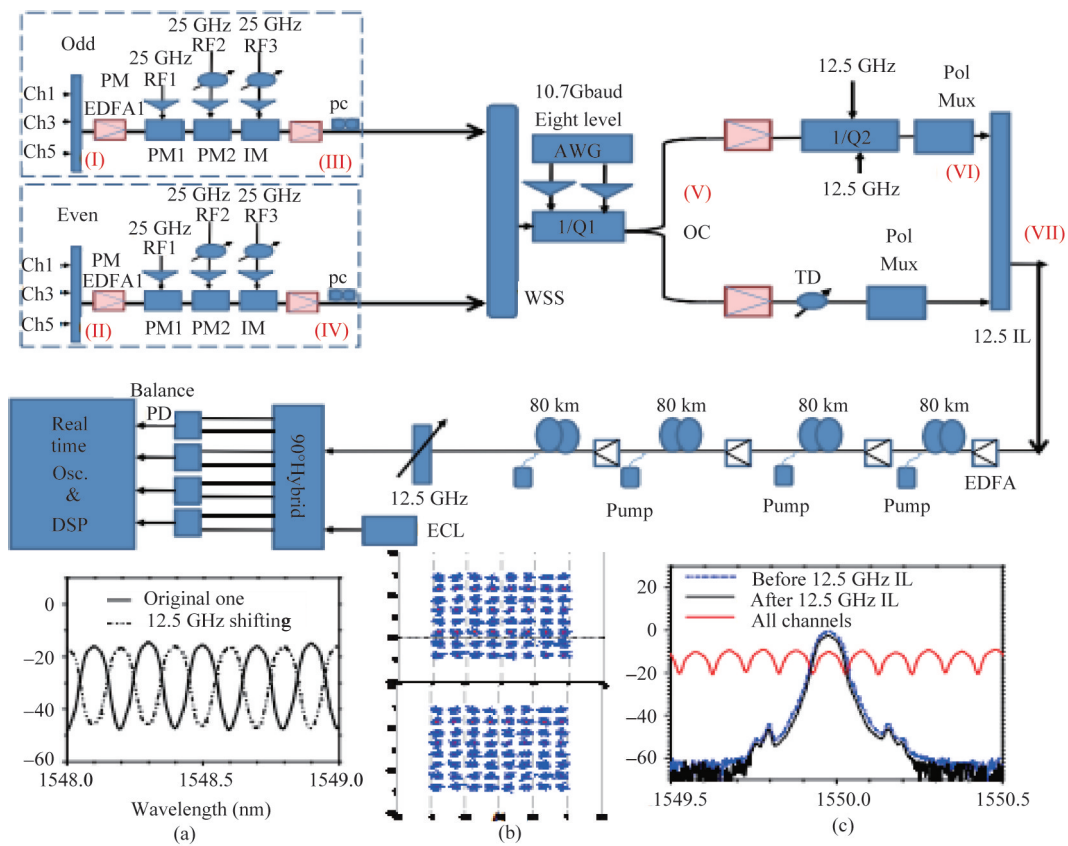


图 13 PDM-64QAM Nyquist-WDM 太比特传输系统
Fig. 13 Experimental setup for PDM-64QAM Nyquist-WDM Tbit transmission

2 多载波光源产生技术

在需要超大容量数据传输的压力及作用下, Tbit 光纤通信的理论和实验研究传输得到了长足发展和进步。

2009年, 武汉邮电科学研究院的杨奇等利用36个子载波

承载 OFDM 信号实现了 1 Tbit/s 的系统容量。2010年, 意大利都灵的 Gavioli 通过 DWDM 10 个子载波承载 PDM-QPSK 信号实现了 1 Tbit/s 的系统容量。墨尔本大学的 William Shieh 在 CO-OFDM 系统中采用 36 个子载波, 系统容量达到了 1.08

Tbit/s。复旦大学的余建军利用 21 个子载波承载 OFDM 信号,其系统容量达到了 1.96 Tbit/s。2011 年,贝尔实验室的刘翔用 20 个子载波实现了 1.12 Tbit/s 的传输容量。复旦大学的余建军采用多载波光源生成方案生成 112 个子载波承载光 OFDM 信号,首次完成了距离为 640 km 系统容量达 11.2 Tbit/s 的光通信系统。下一代 Tbit 级别光传输系统多采用频率锁定的多载波光源技术,同时将 DWDM 或 OFDM 技术与高阶调制格式相融合,实现大容量光传输。在一定误码率 (BER) 下,接收端所需载噪比 (CNR) 因调制格式的不同而存在差异,调制格式的阶数越高,需要的 CNR 越大。QPSK 需要的 CNR 仅为 16 dB 左右,但 PDM-16QAM 所需的 CNR 在 29 dB 以上,而 PDM-64QAM 背靠背系统所需的 CNR 就已达到 30 dB 以上。考虑到链路中的 CNR 代价,对发送端光信号的 CNR 要求会更高,则相应的光源 CNR 需求也随之提高。因此,研究适用于高阶调制格式太比特传输系统的频率锁定多载波光源至关重要。

目前多载波光源的生成方案主要分为光纤非线性产生超连续谱、锁模激光器、级联电光调制器和循环频移 4 类,其中利用光纤非线性产生超连续谱虽然能够生成大量的子载波,但是这种方案无法控制多载波光源的生成数量,并且在不同的波段的平坦度情况不理想;在锁模激光器产生多载波的方案中,需要改变光纤环路中的光纤长度来控制产生的多载波光源的数量,且输出的载波间隔和激光器的腔长有关,其可调谐性较差,并且具有多个纵模模式,稳定性较差;级联电光调制器的方案又可以分为基于强度调制器、基于相位调制器、基于强度和相位调制器级联等方案,虽然解决了前面所述的两个问题,但是随着载波数量的增加,调制深度也相应增加,通常采用提高射频驱动信号电压或者增加级联调制器数量的方式来提高调制深度,这需要器件性能大大提高,增加了方案成本;目前较为主流的多载波产生方案是基于循环频移构建光纤环路,并在环路中加入电光调制器或相位调制器^[30-31]。通过单次循环的输出作为下次循环的输入,这样可以解决级联电光调制器生成方案中调制深度不够的问题,从而促使载波数量大大增加,该方案可以产生数量更多,且其光谱的平坦度和 CNR 都有相当优秀的性能。故而循环频移方案成为了多载波光源生成技术的研究热点之一。

2.1 光纤循环频移产生多载波光源

目前主流的光纤循环频移 (RFS) 方案如图 14 所示,该方

案用两个幅度相同相位差 $\pi/2$ 的射频 (RF) 时钟信号通过 I 和 Q 口驱动单边带调制器 (SSB) 或 I/Q 调制器,诱导输入连续波“种子”的正 (或负) 频移。2 个 EDFA 用于补偿调制损失,而光学滤波器用来控制频率生成数量。实验证明,该方案可用于 1.2 Tbit/s 多载波光传输,在误码率为 1×10^{-3} 的条件下,所需的 OSNR 为 26 dB,比之前的报道提高了大约 0.9 dB。

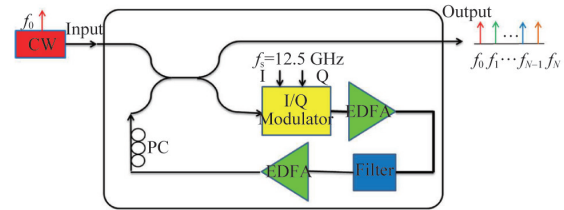


图 14 基于光纤循环频移的多载波光源产生

Fig. 14 Principle of multicarriers generation by using recirculating frequency shifter loop

目前国际上贝尔实验室、墨尔本大学等研究单位已利用循环频移器技术,产生 24、36 及 50 个载波并进行太比特数据速率传输实验。因此,产生高 CNR、高平坦及高稳定度的多载波光源,使其能够应用于 16QAM 等更高阶调制格式的大容量传输系统是未来多载波光源产生的主要研究目标。

2.2 离散模式半导体激光器进行增益切换生成和扩张光梳

传统的光梳源主要是基于锁模半导体和光纤激光器。两者提供的都是固定的自由光谱范围 (FSR), 前者的外延生长的复杂性及后者的长腔长度的稳定问题都会造成损失。另一个技术需要使用光电调节器,其可提供可调 FSR 的优势。然而,这需要使用昂贵的双驱动调制器或一系列的级联调节器,以达到广泛而相对平坦的光梳。2011 年,爱尔兰研究人员提出了利用离散模式半导体激光器 (DM-LD) 进行增益切换 (GS) 生成光梳的方案,其与光梳扩张技术结合使得成本高效、来源简单,提供了一个可调 FSR、高相干和稳定的输出。DM-LD 的直接调制产生的光梳,其频率间隔受到了调制带宽的限制,这使得其可在这个带宽内实现 FSR 可调,其生成的光梳如图 15 所示,其中图 15(a) 在 3 dB 带宽内包含 8 个频梳,FSR 为 10.7 GHz,消光比为 45 dB;图 15(b) 是在频率调制的情况下,维持原有的平坦度和消光比,得到的频率谱线加倍;图 15(c) 是在色散和非线性效应的影响下产生的光频梳,在 3 dB 带宽内产生了 50 个谱线^[32]。

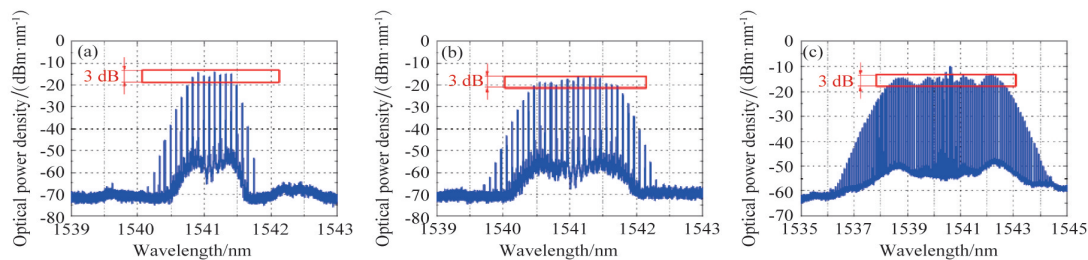


图 15 利用 GS DM-LD 技术产生的光频梳

Fig. 15 Optical comb produced by gain switched DM-LD

3 模式复用技术

空间维度上的复用技术,是光纤通信系统中最新出现的一大类提升容量的关键技术,具有非常大的潜力。如图 16 所示空分复用(space-division multiplexing, SDM)技术,包括模式复用(mode-division multiplexing, MDM)技术与多芯复用(multi-core multiplexing, MCM)技术,分别对应两种新型光纤,即少模光纤(few-mode fiber, FMF)和多芯光纤(multi-core fiber, MCF)^[33-34]。

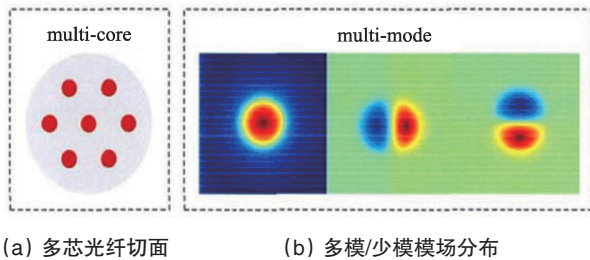


图 16 空分复用技术

Fig. 16 Space division multiplexing schematic

3.1 多芯复用技术

SDM 技术是近年来为了应对不断增长的光通信业务需求而从光通信基础理论上进行研究突破的结果。其最早来源是 2008 年日本研究人员开始合作的 EXAT(Extremely Advanced Transmission)项目,当时将 multi-core, multi-mode 以及多电平调制方式(multi-level modulation)合称为“3M”技术。2009 年,法国阿尔卡特公司(Alcatel)开展基于多模光纤、器件、发送机和接收机的光传输系统的研究,提出空分复用(SDM);2010 年,在多芯光纤领域则报道了具有低耦合效应的 12 芯环状多芯光纤;2011 年,空分复用的关键器件——少模光纤放大器的研究取得了惊人的进展;2012 年,《Optics Express》发表了 1 篇论文,报道了总传输容量为 73.7 Tbit/s (96×3×256 Gbit/s)、使用多模 EDFA 放大的模分复用传输的研究成果^[35-38]。

2011 年 OFC 会议上, NEC 的 Qian 等报道,采用 128QAM-PDM-OFDM 结合的方案,实现了 101.7 Tbit/s 的信号传输,实验装置如图 17 所示。

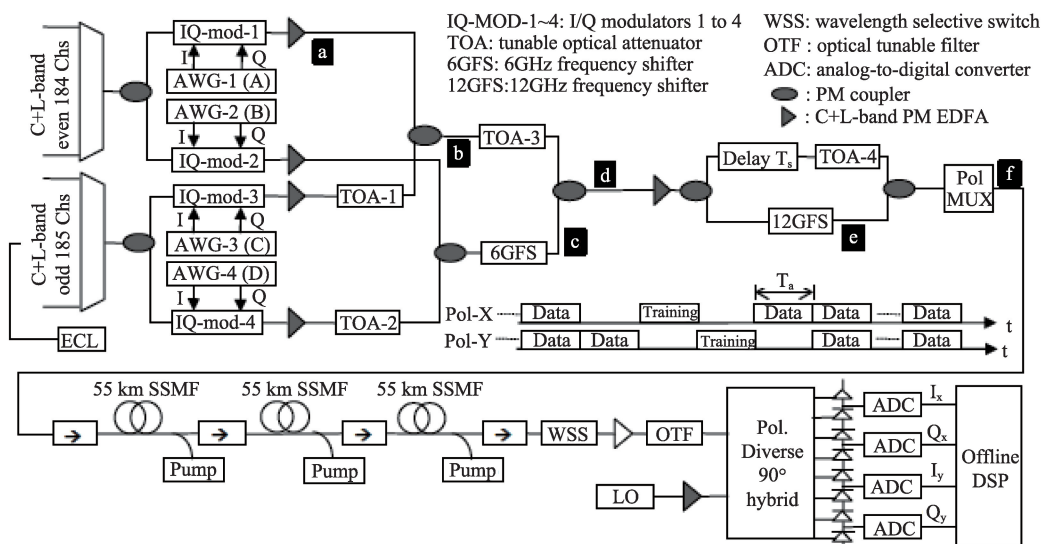


图 17 101.7 Tbit/s (370×294 Gbit/s) PDM-128QAM-OFDM 传输实验装置

Fig. 17 Experimental setup for 101.7-Tbit/s (370×294 Gbit/s) PDM-128QAM-OFDM transmission

2012 OFC 会议上日本国家信息与通信技术研究所(NICT Japan)的 Puttnam 等报道,利用 19 芯光纤,结合 WDM、PDM 技术及 QPSK 调制码型,实现了 305 Tbit/s (19×100×172 Gbit/s)的单纤最高传输容量的实验,该实验中所用的 19 芯光纤参数如表 1 所示,纤芯横截面如图 18 所示,每一个纤芯参数如表 2 所示^[39-40]。

利用该光纤进行 WDM 光纤传输实验(波长范围为 1533.45~1615.24 nm,包含 50 个奇数波和 50 个偶数波),实验装置如图 19 所示,传输距离为 10.1 km,误码率低于 2×10^{-3} , FEC 开销为 7%。该实验总谱效率为 30.5 bit/(s·Hz),纤芯单模谱效率约为 1.6 bit/(s·Hz),该结果是目目前芯数最多的多芯光纤 SDM 传输实验。

表 1 大容量 SDM 光传输实验中的多芯光纤参数

Table 1 Multi-core fibers used in large-capacity SDM transmission experiments

光纤芯数 N	包层直径 $D_{clad}/\mu\text{m}$	$N/(D_{clad})^2$ (与标准单模光纤相比)	核心间距/ μm	串扰/长度(1.55 μm)	实现的数据速率/(Tbit·s ⁻¹)	距离/km
7	150	4.9	45	-92 dB/km(平均)	109	16.8
7	186.5	3.1	46.8	-59 dB/km(平均)	112	76.8
19	200	7.4	35	-42 dB/km(特征值)	305	10.1

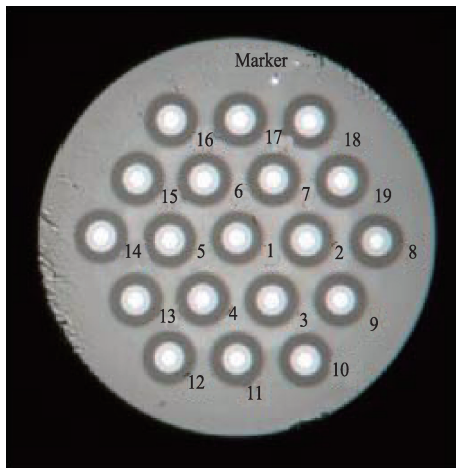


图 18 19 芯光纤横截面示意

Fig. 18 Cross section of 19-core MCF

2012年欧洲光通信会议(ECOC)上,日本电信公司NTT的研究人员报道,采用SDM技术成功将单纤容量提升到1.01 Pbit/s,系统设置如图20所示,其结合WDM、PDM技术,SDM及32QAM调制码型,采用12芯光纤,每个纤芯内传输了222路WDM信号,总的频谱效率为91.4 bit/(s·Hz),单芯单模频谱效率为7.61 bit/(s·Hz),这是首次实现Pbit/s级的传输实验^[41-44]。

在美国光学协会(OSA)的年会——光学前沿会议上, NEC公司报道了基于14芯多芯光纤单模多模混合传输实验,实验装置如图21所示,利用该装置,成功实现了1.05 Pbit/s (12SDM/SM/385WDM/PDM- 32QAM- OFDM, 2SDM/FM/354WDM/PDM-QPSK)的传输速率,频谱效率高达109 bit/(s·Hz),传输距离为3 km,该实验是目前为止传输速率最高的研究成果^[45]。

表2 19-core MCF 纤芯参数(1550 nm)

Table 2 Average optical properties of each core groups (1550 nm)

项目	衰减损耗/ (dB·km ⁻¹)	多芯导线截 止波长/mm	有效横截 面积/μm ²	色散/(ps·nm ⁻¹ ·km ⁻¹)	色散斜率/(ps·nm ⁻² ·km ⁻¹)	偏振模色散/ (ps·km ^{-1/2})	宏弯损耗/ (dB·turn ⁻¹)
中心	0.225	1459	71.8	19.7	0.062	0.08	0.5
内部	0.232	1463	72.3	19.6	0.063	0.06	0.4
外部	0.225	1350	71.1	19.5	0.063	0.06	0.4
综合	0.227	1392	71.5	19.5	0.063	0.06	0.4

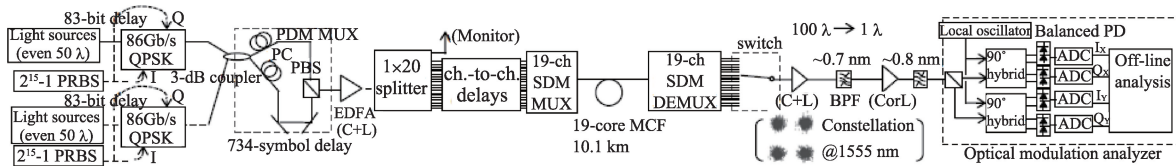


图 19 19-core 100-WDM 172 Gbit/s PDM-QPSK 传输实验

Fig. 19 Set-up for 19-core, 100-WDM, 172 Gbit/s PDM-QPSK transmission experiment

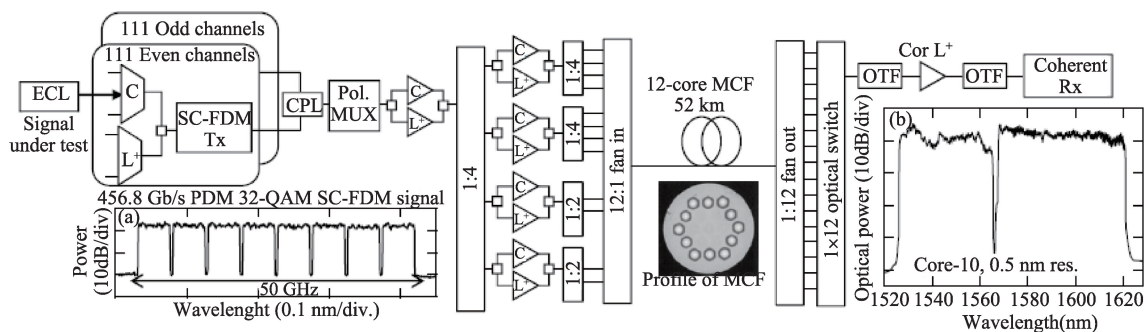


图 20 12-core 222-WDM 456 Gbit/s 光纤传输实验设置

Fig. 20 Experimental setup for 12-core 222-WDM 456 Gbit/s optical fiber transmission

2013年,OFC会议上,贝尔实验室的R. Ryf和S. Randel等报道,利用12个空间和偏振相结合模式和32个波分复用信道,采用20GBaud的16QAM调制格式,实现了177 km的长距离少模传输,并利用MIMO均衡器恢复了强耦合的信号,创

造了32 bit/(s·Hz)的单芯频谱效率记录,总速率为800 Gbit/s。2013年,OFC会议上报道的另一篇文章则是使用146λ、6-mode以及QPSK验证了500 km具有增益均衡的少模光纤EDFA的传输。

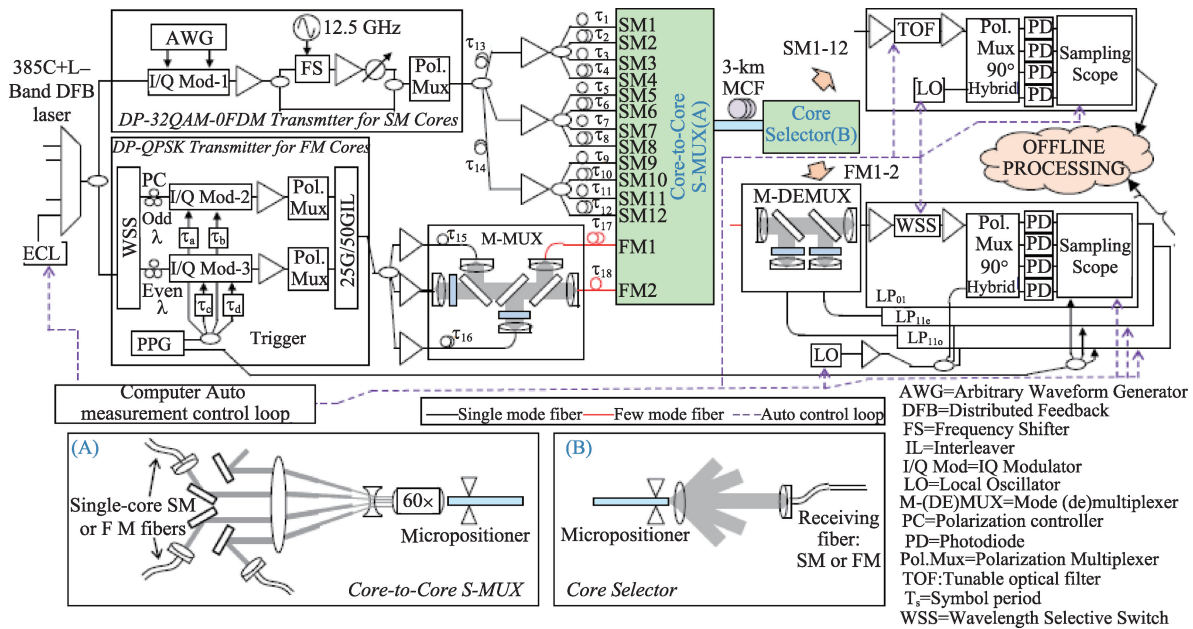
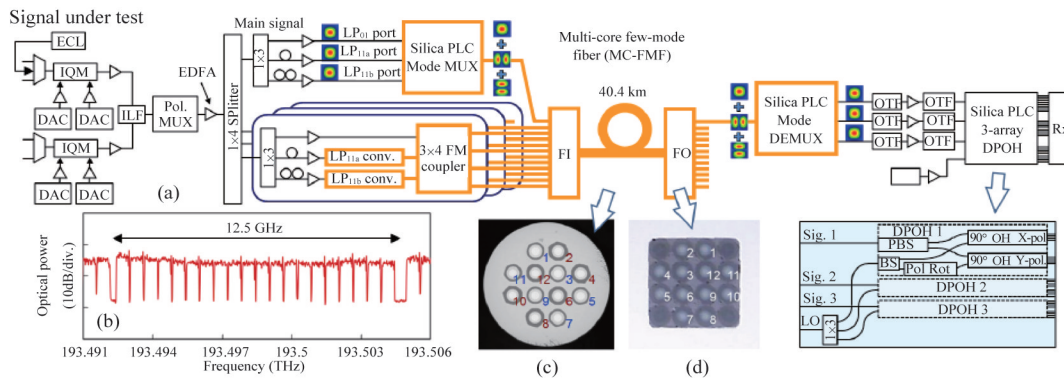


图 21 14 芯多芯光纤单模多模混合传输实验装置

Fig. 21 Experimental setup for hybrid single- and few-mode 14-core transmission

2014 年 OFC 会议上, 日本电信公司 NTT 研究人员再次报道了利用 12 芯光纤、每芯 3 模式的传输实验, 实验装置如图 22 所示, 该实验成功实现了密集空分复用(DSDM)信号的传

输, 传输距离为 40.4 km, 并且利用 20-WDM PDM-32QAM 使得谱效率达到 247.9 bit/(s·Hz), 这也是目前谱效率最高的研究成果^[46]。



(a) 多芯传输实验装置; (b) 低波特率多载波信号; (c) 12-core x 3-mode DSDM 光纤横截面; (d) 多芯少模光纤 FI/FO 装置

图 22 12 芯光纤、每芯 3 模式的传输实验装置

Fig. 22 Experimental setup for 12-core x 3-mode transmission

3.2 正交性轨道角动量复用(OAM)技术

MDM 作为时分复用(TDM)、WDM、OFDM 和 PDM 之外的新的复用方式, 增加了单根线芯的传输容量, 从而大大提高了频谱的利用率。人们已经将光束的强度、相位、频率和模式等维度都应用在了光通信当中, 但光子的轨道角动量(OAM)却一直没有被用来作为新的维度来传输信息。直到 1992 年, Allen 等发现有 $exp(i\ell\phi)$ (ℓ 为 OAM 值) 相位结构的光束可携带 OAM。有异于自旋角动量每个光子携带 $\pm\hbar$ 的角动量, OAM 可携带随意的角动量 $\pm\ell\hbar$, 即 OAM 光束的阶数(拓扑荷 ℓ) 可以是任何整数, 并且其模式之间的正交性使得

OAM 模式在理论上可以被无限复用, 扩充信道容量和频谱的利用率。具有正交性的轨道角动量复用(OAM)技术作为新的模式复用(MDM)方式, 克服了模式间串扰、模式数有限等问题, 并迅速成为光通信领域的研究热点。

2013 年, 美国南加州大学的 Yang Yue 等采用 10 个波长的 WDM 和 2 个 OAM-MDM 的传输技术, 在 1.1 km 的涡旋光纤中实现了 1.6 Tbit/s 的传输实验^[47-48]。整个传输实验的原理如图 23 所示, 整体实验装置如图 24 所示, 该实验的下一步研究计划是利用其他调制格式(例如 QPSK)及 LDPC 编码, 进一步扩展 WDM 信道和系统的总容量。

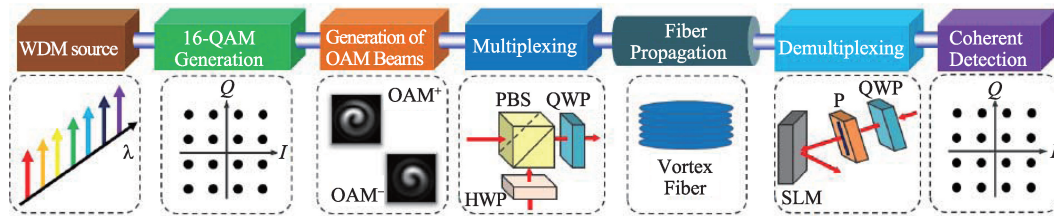


图 23 涡旋光纤中 16QAM 2-OAM 复用、传输、解复用原理

Fig. 23 Conceptual diagram of muxing, transmission and demuxing of 16-QAM signals over wavelength-division channels carrying 2 OAM beams through vortex fiber

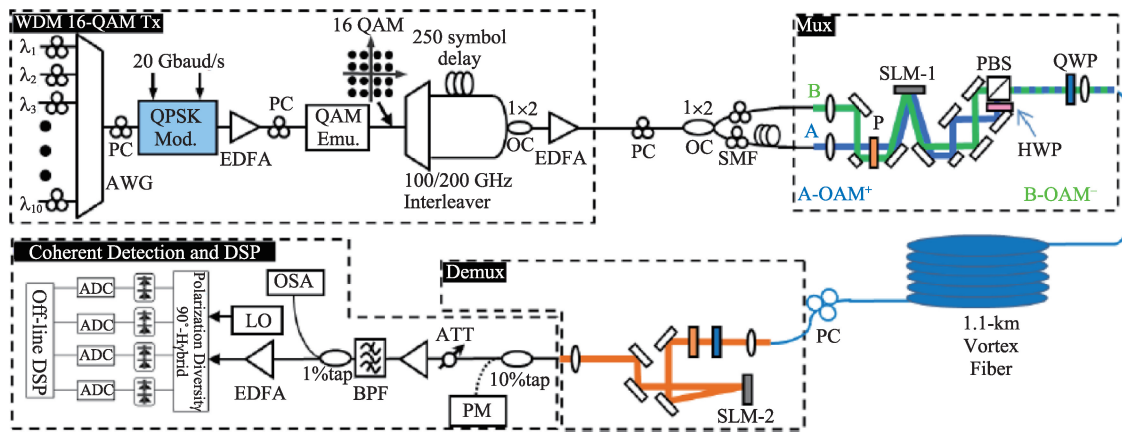


图 24 涡旋光纤中 16QAM 2-OAM 光传输系统装置

Fig. 24 Experimental setup for 16-QAM signals carrying 2 OAM beams through vortex fiber

2013年,OFC会议上也报道了 Hao Huang 等的 100 Tbit/s 的自由空间数据传输实验,系统装置如图 25 所示,该实验中采用了 42 个波分复用和 24 个 OAM 模式的复用技术,每个波

长传输 100 Gbit/s 的 QPSK 信号,总信道数为 1008(24×42),成功实现了总容量 100 Tbit/s 的大容量光传输,所有信道的误码率小于 3.8×10^{-3} ,FEC 开销为 7%^[49]。

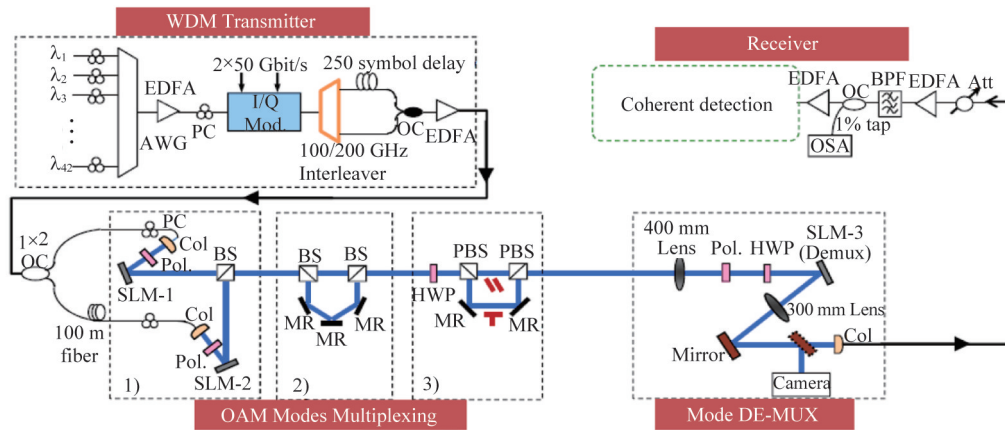


图 25 自由空间数据传输实验装置

Fig. 25 Experimental setup

4 结论

自 20 世纪 70 年代光纤诞生以来,光纤通信技术一直在发展迅猛,主要包括光纤本身的不断改良及光纤传输系统的

不断升级。单模光纤的通信容量已从最初的 100 Mbit/s 发展到 Tbit/s 乃至 Pbit/s。与此同时,随着互联网业务的飞速发展,宽带业务的日益普及,网络通信的数据量呈爆炸性的增

长,这使得传输信道容量面临着越来越大的压力。因此,市场需求的急剧增长势必将持续推动光纤通信向大容量、超高速和超长距离方向发展。

理论和实验研究表明,由于光纤的非线性及放大器的带宽等限制,通信容量已经接近了单模光纤的传输极限。因此,光纤通信的发展一方面需要克服单载波传输中的高速电子器件的限制瓶颈,研究多载波技术的产生方案,利用OFDM或Nyquist-WDM提高频谱利用率,增加信道容量实现P比特甚至更高传输速率。另一方面需要从研究光纤本身的角度出发,在考虑成本效益和能源效率的前提下充分利用光纤的空间维度。空分复用技术(多模、多芯)及角动量复用技术(OAM)将成为未来超越单模光纤的容量极限、大幅度提高光纤传输容量的研究重点。

参考文献(References)

- [1] Cisco. 思科 VNI 调研报告预测从 2014 到 2019 年 IP 流量将增至三倍; 主要增长驱动因素包括日益增加的移动访问和对视频服务的需求 [EB/OL]. [2016-04-28]. http://www.cisco.com/web/CN/aboutcisco/news_info/china_news/2015/05_28.html.
CISCO. The CISCO VNI research report predicts that from 2014 to 2019 IP traffic will be increased to three times; the major growth drivers include increasing mobile access and demand for video services [EB/OL]. [2016-04-28]. http://www.cisco.com/web/CN/aboutcisco/news_info/china_news/2015/05_28.html.
- [2] 鲁义轩. 超高速传输时代逼近——明年有望启动 100 G 现网试验[J]. 通信世界, 2012(17): 17.
Lu Yixuan. Ultra high speed transmission times approaching next year is expected to start 100 G network testing[J]. Communications World Weekly, 2012(17): 17.
- [3] Renaudier J, Rios-Muller R, Schmalen L, et al. 1 Tb/s transceiver spanning over just three 50 GHz frequency slots for long-haul systems[C]// 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013). London: IET, 2013: 242-1244.
- [4] Renaudier J, Ghazisaeidi A, Tran P, et al. Long-haul transmission of 1 Tb/s superchannels, 175 GHz spaced, over SSMF using Nyquist pulse shaping and flex-grid WDM architecture[C]// European Conference and Exhibition on Optical Communication. London: IET, 2013: 819-821.
- [5] Renaudier J, Muller R R, Schmalen L, et al. 1 Tb/s PDM-32QAM superchannel transmission at 6.7 b/s/Hz over SSMF and 150 GHz-grid ROADMs[C]// 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes: IEEE, 2014. Doi: 10.1109/ECOC.2014.6963854.
- [6] Yu J, Zhou X. 16, 107 Gb/s 12.5 GHz-spaced PDM-36QAM transmission over 400 km of standard single-mode fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(17): 1312-1314.
- [7] Yao J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3):314-335.
- [8] Laurencio P, Vargues H, Avó R, et al. Generation and transmission of millimeter wave signals employing optical frequency quadrupling[C]// 2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks. Munich: IEEE, 2010. Doi: 10.1109/ICTON.2010.5548961.
- [9] Taher K A, Majumder S P. Minimizing the effect of cross phase modulation in WDM optical transmission system[C]// Proceedings of the 12th International Conference on Advanced Communication Technology. Phoenix Park: IEEE, 2010: 708-711.
- [10] Charbonnier B, Saliou F, Guyader B L, et al. Versatile customers, do we have FTTH solutions?[C]// 2014 The European Conference on Optical Communication (ECOC). Cannes: IEEE, 2014. Doi: 10.1109/ECOC.2014.6964208.
- [11] Kachris C, Tomkos I. A survey on optical Interconnects for data centers[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, PP(99): 1-16.
- [12] Vlasov Y A. Silicon CMOS-integrated nano-photonics for computer and data communications beyond 100 G[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(2): s67-s72.
- [13] Zhou J, Yan Y, Cai Z, et al. A cost-effective and efficient scheme for optical OFDM in short-range IM/DD systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(13): 1372-1374.
- [14] Yan W, Li L, Liu B, et al. 80 km IM-DD Transmission for 100 Gb/s per lane enabled by DMT and nonlinearity management[C]// Optical Fiber Communication Conference. San Francisco, CA: IEEE, 2014. Doi: 10.1364/OFC.2014.M2I.4.
- [15] Zhu J, Ingham J D, Von Lindeiner J B, et al. MIMO DWDM system using uncooled DFB lasers with adaptive laser bias control and post-photodetection crosstalk cancellation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(21): 3974-3981.
- [16] Vujicic V, Anandarajah P M, Browning C, et al. Optical multicarrier based IM/DD DWDM-SSB-OFDM access networks with SOAs for power budget extension[C]// European Conference on Optical Communication. Cannes: IEEE, 2014. Doi: 10.1109/ECOC.2014.6964030.
- [17] Zhou R, Anandarajah P M, Pascual D G, et al. Monolithically integrated 2-section lasers for injection locked gain switched comb generation [C]// Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), 2014. San Francisco, CA: IEEE, 2014: 1-3.
- [18] Martin E, Shao T, Anandarajah P, et al. Impact and reduction of fibre nonlinearities in a 25 Gb/s OFDM 60 GHz radio over fibre system[C]// International Topical Meeting on Microwave Photonics. Sendai: IEEE, 2014: 446-449.
- [19] Shao T, Zhou R, Pascual M D G, et al. Integrated gain switched comb source for 100 Gb/s WDM-SSB-DD-OFDM system[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(17): 1.
- [20] Igarashi K, Tsuritani T, Morita I, et al. Super-Nyquist-WDM transmission over 7,326 km seven-core fiber with capacity-distance product of 1.03 Exabit/s·km[J]. Optics Express, 2014, 22(2): 1220-1228.
- [21] Sui C, Hraimel B, Zhang X, et al. Performance evaluation of MB-OFDM Ultra-Wideband over fiber transmission using a low cost Electro-Absorption Modulator integrated laser[C]// Microwave Photonics. Montreal, QC: IEEE, 2010: 70-73.
- [22] Qian D, Huang M F, Ip E, et al. 101.7 Tb/s (370×294 Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3×55 km SSMF using pilot-based phase noise mitigation[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition. Los Angeles, CA: IEEE, 2011: 1-3.
- [23] Xia T J, Wellbrock G A, Tanaka A, et al. High capacity field trials of 40.5 Tb/s for LH distance of 1,822 km and 54.2 Tb/s for regional distance of 634 km[C]// Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2013: 1-3.
- [24] Nakazawa M, Okamoto S, Omiya T, et al. 256-QAM (64 Gb/s) coherent optical transmission over 160 km with an optical bandwidth of 5.4 GHz[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(3):185-187.

- [25] Cai J X, Batshon H G, Zhang H, et al. 25 Tb/s transmission over 5530 km using 16QAM at 5.2 b/s/Hz spectral efficiency[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1555-1560.
- [26] Zhang H, Batshon H G, Foursa D, et al. 30.58 Tb/s transmission over 7,230 km using PDM half 4D-16QAM coded modulation with 6.1 b/s/Hz spectral efficiency[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2013. Doi: 10.1364/OFC.2013.OTu2B.3.
- [27] Beppu S, Yoshida M, Kasai K, et al. 2048 QAM (66 Gbit/s) single-carrier coherent optical transmission over 150 km with a potential SE of 15.3 bit/s/Hz[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4960-4969.
- [28] Dong Z, Li X, Yu J, et al. 6×128 Gb/s Nyquist-WDM PDM-16QAM generation and transmission over 1200 km SMF-28 with SE of 7.47 b/s/Hz[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(24): 4000-4005.
- [29] Yu J, Dong Z, Chi N. 30 Tb/s (3×12.84 Tb/s) signal transmission over 320 km using PDM 64-QAM modulation[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition. Los Angeles, CA: IEEE, 2012: 1-3.
- [30] Shams H, Perry P, Anandarajah P, et al. Electro-optical generation and distribution of ultrawideband signals based on the gain switching technique[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2010, 2(3): 122-130.
- [31] Wu R, Supradeepa V R, Long C M, et al. Generation of very flat frequency combs from continuous-wave lasers using cascaded intensity and phase modulators driven by tailored radio frequency waveforms[J]. Optics Letters, 2010, 35(19): 3234-3236.
- [32] Latkowski S, Xu Y, Murdoch S, et al. Optical comb generation and expansion by gain switched discrete mode laser diode[C]//The European Conference on Lasers and Electro-Optics. Munich: IEEE, 2011. Doi: 10.1109/CLEOE.2011.5942982.
- [33] Igarashi K, Takeshima K, Tsuritani T, et al. 110.9 Tbit/s SDM transmission over 6 370 km using a full C-band seven-core EDFA[J]. Optics Express, 2013, 21(15): 18053-18060.
- [34] Takahashi H, Tsuritani T, de Gabory E L, et al. First demonstration of MC-EDFA-repeated SDM transmission of 40×128 Gbit/s PDM-QPSK signals per core over 6,160 km 7-core MCF[J]. Optics Express, 2013, 21(1): 789-795.
- [35] Mizuno T, Takara H, Sano A, et al. Dense space division multiplexed transmission over multi-core and multi-mode fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference, 2015. Los Angeles, CA: IEEE. Doi: 10.1364/OFC.2015.Th1D.2.
- [36] Cvijetic N, Ip E, Prasad N, et al. Experimental time and frequency domain MIMO channel matrix characterization versus distance for 6×28Gbaud QPSK transmission over 40×25 km few mode fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. Doi: 10.1364/OFC.2014.Th1J.3.
- [37] Sano A, Takara H, Kobayashi T, et al. Petabit/s transmission using multicore fibers[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. San Francisco, CA: IEEE, 2014. Doi: 10.1364/OFC.2014.Tu2J.1.
- [38] Sleiffer V A, Jung Y, Veljanovski V, et al. 73.7 Tb/s (96×3×256 Gb/s) mode-division-multiplexed DP-16QAM transmission with inline MM-EDFA[J]. Optics Express, 2012, 20(26): 428-38.
- [39] van Uden R G H, Amezcua-Correa R, Antonio-Lopez E, et al. 1 km hole-assisted few-mode multi-core fiber 32QAM WDM transmission [C]//ECOC'14. Cannes, France: IEEE, 2014.
- [40] Sakaguchi J, Puttnam B J, Klaus W, et al. 19-core fiber transmission of 19×100×Optical Fiber Communication Conference. Optical Society of America, Los Angeles, California United States, March 4 - 8, 2012.
- [41] Asif R, Ye F, Morioka T. λ-selection strategy in C+L band 1-Pbit/s (448 WDM/19-core/128 Gbit/s/channel) flex-grid space division multiplexed transmission[C]//European Conference on Networks and Communications. Paris: IEEE, 2015.
- [42] Ye F, Tu J, Saitoh K, et al. Simple analytical expression for crosstalk estimation in homogeneous trench-assisted multi-core fibers[J]. Optics Express, 2014, 22(19): 23007-23018.
- [43] Asif R, Ye F, Morioka T. Dynamics of 1.12 Tbit/s wdm flex-coherent super-channels in multi-core fiber transmission[C]. Asia Communications and Photonics Conference 2014, Shanghai China, November 11 - 14, 2014.
- [44] Takara H, Sano A, Kobayashi T, et al. 1.01 Pb/s (12 SDM/222 WDM/456 Gb/s) crosstalk-managed transmission with 91.4 b/s/Hz aggregate spectral efficiency[C]. European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012, Amsterdam Netherlands, September 16- 20, 2012.
- [45] Huang Y K, Zhang Y, Cheng X, et al. 1.05 Pb/s transmission with 109b/s/Hz spectral efficiency using hybrid single- and few-mode cores [C]. Frontiers in Optics, 2012, Rochester, NY, October 14-18, 2012.
- [46] Mizuno T, Kobayashi T, Takara H, et al. 12-core × 3-mode dense space division multiplexed transmission over 40 km employing multi-carrier signals with parallel MIMO equalization[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. San Francisco, CA: IEEE, 2014. Doi: 10.1364/OFC.2014.Th5B.2.
- [47] Wang J, Li S, Luo M, et al. N-dimensional multiplexing link with 1.036 Pbit/s transmission capacity and 112.6 bit/s/Hz spectral efficiency using OFDM-8QAM signals over 368 WDM pol-muxed 26 OAM modes[C]//Optical Communication (ECOC), 2014 European Conference on. Cannes: IEEE, 2014. Doi: 10.1109/ECOC.2014.6963934
- [48] Yue Y, Bozinovic N, Ren Y, et al. 1.6 Tbit/s muxing, transmission and demuxing through 1.1 km of vortex fiber carrying 2 OAM beams each with 10 wavelength channels[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2013: 1-3.
- [49] Huang H, Xie G, Yan Y, et al. 100 Tbit/s free-space data link using orbital angular momentum mode division multiplexing combined with wavelength division multiplexing[C]//Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference. Anaheim, CA: IEEE, 2013. Doi:10.1364/OFC.2013.OTh4G.5.

Development status of large-capacity optical transmission systems

LIU Bo, LI Linan

State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract This paper reviews the development and latest research progress of large-capacity optical transmission systems. Theoretical and experimental studies have shown that due to the limitations of the fiber nonlinear effect and the amplifier bandwidth, communication capacity is close to the limit of single-mode fiber transmission. Therefore, on the one hand, the development of optical fiber communication needs to overcome the bottleneck of high-speed electrical devices in single carrier transmission. So this paper investigates the multi-carrier generation schemes like orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology or Nyquist wavelength division multiplexing (Nyquist-WDM) technology, which can improve spectrum efficiency and increase channel capacity to achieve Pbit/s rate or even higher. On the other hand, we study from the perspective of the optical fiber itself how to take full advantage of the spatial dimension of the fiber in consideration of cost-effectiveness and energy efficiency. It is shown that space division multiplexing (multi-mode, multi-core) and angular momentum multiplexing (OAM) will be the focus of future research to overcome the limit of the capacity of single-mode fiber and greatly improve optical transmission capacity.

Keywords large capacity optical transmission systems; high spectral efficiency modulation; multicarrier; mode-division multiplexing

(责任编辑 刘志远)