

基于少模光纤的模分复用光传输技术

付松年, 于大伟

华中科技大学光学与电子信息学院, 下一代互联网接入系统国家工程实验室, 武汉 430074

摘要 基于少模光纤的模分复用技术可将现有单模光纤通信传输系统容量提高数倍乃至数十倍, 被公认为能够突破传统单模光纤通信系统传输容量瓶颈的有效技术手段。本文综述了用于对光纤中模式进行复用和解复用的模分复用器、传输用少模光纤、长距离传输提供中继的少模光放大器等方面的研究进展, 介绍了利用上述器件开展的模式复用光传输系统实验, 展望了模分复用光传输的未来研究方向。

关键词 模分复用; 少模光纤; 光纤通信; 大容量光传输

随着人们对基于互联网应用和服务的需求与日俱增, 光纤通信网络带宽每年以 20%~40% 的速率持续增长, 据保守估计, 目前铺设好的单模光纤传输系统在未来 10 年内将达到容量上限^[1]。光场的基本物理维度, 如时间(时分复用)、频率(波分复用)、偏振态(偏振复用)和正交性(正交振幅调制), 都已经得到了充分利用, 标准单模光纤的通信容量已经接近于其非线性香农极限(100 Tbit/s^[2]), 该上限将无法满足下一代互联网带宽持续增长的需求。空间维度是唯一尚未得到充分利用的物理维度。

因此, 基于多芯光纤的空分复用和基于少模光纤的模式复用引起了科研工作者的极大兴趣。目前, 基于少模光纤的模分复用光传输已经可以实现 41.6 Tbit/s^[3]和 73.6 Tbit/s^[4]的高速信号传输, 以少模光纤模分复用为基础的基于多芯少模光纤的多维复用成功将单纤光传输系统容量提升为 2.05 Pbit/s^[5]。本文综述基于少模光纤的模分复用光传输技术的研究进展。

1 模分复用器

模分复用的概念于 1982 年提出^[6],

但由于缺乏精确的模式激励与复用技术, 基于少模光纤的模分复用光传输技术发展得异常缓慢。近年来, 标准单模光纤的传输容量瓶颈问题促使模分复用技术再次成为研究焦点, 相关器件和理论研究进展迅速。模分复用光传输最关键的技术就是实现光纤中传导模式的精确控制, 将多路信息加载到少模光纤中的不同空间模式上, 并在接收端进行分离, 这项技术的关键就在于模分复用器的设计。经过几年的发展, 多种技术被成功应用到模分复用器设计中, 其中部分已经接近于商用。根据所用器件及工作原理, 模分复用器可以分为基于空间匹配类型和基于光波导结构两大类, 前者主要包括基于硅基液晶空间光调制器的相位调制和空间相位盘两类, 较早应用于模分复用光传输中。基于光纤绝热拉锥的光子灯笼是新发展起来的模分复用器, 通过光波导中相位匹配以实现模式耦合来进行模式的选择性激励, 可以通过光纤、硅基波导和平面光路的方法实现。各种模分复用器的工作原理和性能比较见表 1。

为了提高少模光纤中模式激励的灵活度和隔离度, 减小维护的难度, 本

研究组提出了一种基于硅基液晶(LCOS)空间光调制器的具有强鲁棒性的模分复用器, 其物理实现如图 1^[7]所示。用于模分复用光传输的模式信道是光纤中的线偏振模(LP 模式), 其光场的空间分布规律为(以 LP_{lm} 模式为例), 角向上亮斑数为 2l, 径向亮斑数为 m, 相邻的亮斑之间存在 π 的相位差。利用线偏振模的这一特点, 对单模光纤输出的光束空间施加相位调制, 改变光场等相位面的分布, 使其与光纤中对应的高阶模式匹配, 在向少模光纤耦合时就可以选择性激励起对应的高阶模式。以 LP₁₁ 模式的激励为例, LP₁₁ 模式的两瓣光场存在布 π 的相位差, 只需将基模光场的相位调制成具有 π 相位差的对称两瓣, 再耦合进光纤就可以产生 LP₁₁ 模式。硅基液晶空间光调制器可以实现逐像素点的相位调制, 很容易产生图 1(b) 所示的相位调制效果, 通过改变驱动电压, 像素点的相位调制深度相应改变, 图 1(c) 为利用该结构激励起少模光纤中 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的光场, 获得了超过 25 dB 的模式隔离度。鲁棒性是该结构的另一优势, 通过合理的光学系统的设计, 对入射端的单模光纤、LCOS 和接收端少模光纤在纵向的

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575071, 61275069)

作者简介: 付松年, 教授, 研究方向为光纤通信器件和系统, 电子信箱: songnian@hust.edu.cn; 于大伟(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为光纤通信器件和系统, 电子信箱: yudawei2012@hust.edu.cn

引用格式: 付松年, 于大伟. 基于少模光纤的模分复用光传输技术[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 62-68; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.006

表 1 几种典型的模式激励方式比较
Table 1 Comparison of several classical mode division multiplexers

| 模式 | 器件装置 | 激励 | 串扰 | 配置 | 多模式向光纤耦合 |
|----------------|---------------|-----|-------|----|-----------|
| 空间匹配 | 全息 | 选择性 | 小 | 复杂 | 直接 |
| | 相位片+分束器 | 选择性 | 大 | 简单 | 需要额外合成器件 |
| 绝热转换 | 光子灯笼 | 超模 | 大, 单一 | 简单 | 直接 |
| 相位匹配 (模式耦合) | 耦合器 | 选择性 | 很小 | 简单 | 简并模需要额外器件 |
| | 长周期光栅+耦合器 | 选择性 | 很小 | 简单 | 需要额外合成器件 |

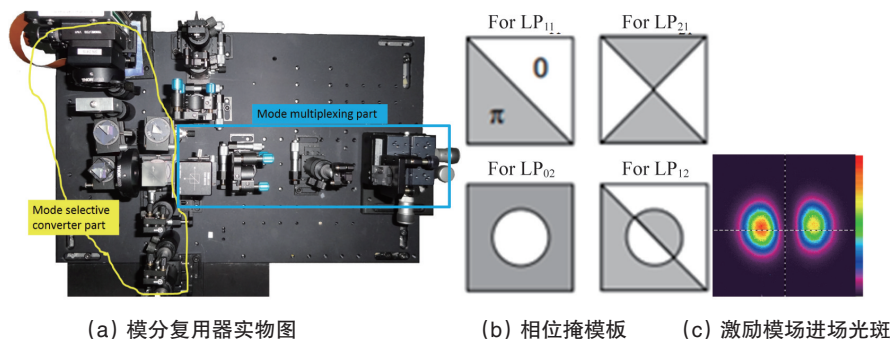


图 1 基于硅基液晶的模式复用器
Fig. 1 LCOS based mode division multiplexer

位置偏差具有很高的容忍度,从而降低了模式复用器的调节和维护的难度。为了实现偏振复用,并且降低插入损耗,在结构引入了偏振光学器件,如法拉第旋光器、半波片等,这些器件的工作性能具有波长相关性。故当系统的工作波长偏离光学器件的最佳工作波

长或者器件的角度调节偏离设定值时,模式转换效果也会受到影响,针对这一问题,本研究组通过理论分析,对LCOS的选取和器件调节误差进行了系统的分析^[8]。

基于LCOS的空间光调制器的优点是模式转换灵活性高,计算得到某个

高阶模式所对应的相位掩模板的分布,通过控制LCOS的每个像素的电压就可以得到相应的相位掩模板,而且可以通过优化空间光斑不同位置的相位延迟量来提高模式转换的精度,这是其他模式转化器无可比拟的。但是LCOS只能对一个方向的线偏振光实现相位调制,故为了与现有偏振复用系统兼容,必须通过增加偏振器件和改变光路结构来实现。另一方面,基于LCOS的空间光调制器利用的是自由空间的光传播,光在传输过程中没有限制,故传输过程中有一定的能量损失;尤其是在复用模式数目较多的系统中,能量损失会随着复用模式数目增长而急剧增加。

基于光子灯笼的模式复用器可以很好避免上述问题,将多根单模光纤经处理后堆叠在毛细管中,通过绝热拉锥,单模光纤的纤芯逐渐消失,单模光

纤的包层变成新的多模光纤纤芯,外面低折射率的毛细管变成新的多模光纤包层。在这个过程中,光子灯笼将 N 个单模光纤的模式入射到一根能支持 N 个模式的少模光纤中。根据少模光纤中激励模场的性质,可以将光子灯笼分为非模式选择性和模式选择性两种,前者的单模光纤是相同的,每一根单模光纤激励起多模光纤中多个模式的正交组合;后者的单模光纤具有不同结构,每一根光纤可以激励起单独的一个高阶模式^[9]。2015年,欧洲光通信会议(ECOC)上报道通过对单模光纤的设计以及特定的组合排列方式,分别实现了10个和15个空间模式的模式选择性激励^[10]。利用激光刻蚀3-D波导是制作光子灯笼型模式耦合器的另外一种思路^[11],优势在于可以精确控制耦合区域的折射率分布,具有高度可重复性和稳定性,但缺点在于激光刻蚀的折射率变化范围有限,增加复用的模式数目还有待探索。基于光子灯笼的模式复用器和单模光纤器件具有良好兼容性,耦合损耗低(<2 dB),模式相关损耗(MDL)低(最佳结果为1 dB),有利于在模分复用光传输系统中大量使用。

2 少模光纤

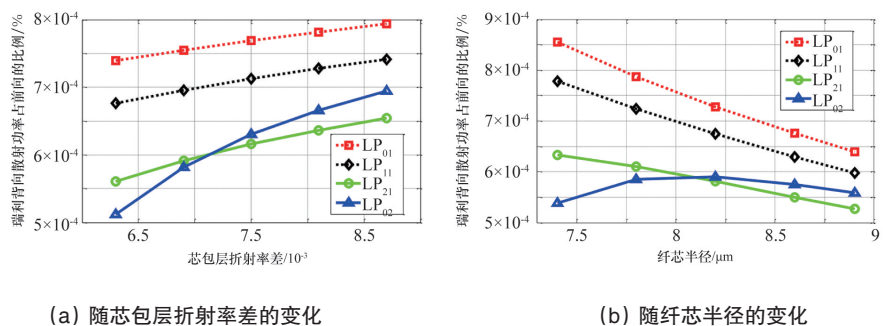
自Roland Ryf等2011年首次利用少模光纤和多输入多输出数字信号处理(MIMO-DSP)实现3个空间模式的复用传输^[12]以来,少模光纤的研究如雨后春笋在全球开展起来。早期应用在实验中的少模光纤只能容纳3个空间模式(LP₀₁、LP_{11a}、LP_{11b}),即2-LP光纤,相比于普通单模光纤系统,容量只能提升至原来的3倍,尚未达到大幅度提升光纤传输数据容量的目的,故应进一步提高少模光纤中传输的空间模式数目。2013年,日本NTT通信公司在美国光纤通信展会及研讨会(OFC)上报道了支持4个LP模式的少模光纤^[13],在C+L波段均具有较低的差分模式群时延;在2014年召开的OFC上,法国Prysmian公司提出了支持6个LP模式的少模光纤^[14],能够适用于强耦合的模

分复用光传输系统,可以将通信容量提升到10倍。2015年召开的OFC会议上,美国OFS公司^[15]和Prysmian公司^[16]分别提出了不同结构的支持9个LP模式的少模光纤,具有较低的差分模式时延,空间模式数目高达15个。作为复用模式的传输波导,少模光纤的性质对复用信号的传输质量影响很大,因此少模光纤的设计尤为重要,损耗是重要参数。为了能够应用于大容量模分复用光传输,少模光纤通常需要支持较多模式的低损耗传输;差分模式损耗(即不同的模式的损耗差,DMA)会给传输系统带来损伤,对基于多输入-多输出(MIMO)信号处理系统的传输容量构成限制,故应该降低DMA。为了获得更多的低损模式信道,必须增大光纤的归一化频率 V ,一种方法是增大芯径 a ,另一种方法是增大芯包层折射率差 Δn 。如果通过增大 Δn 来提高光纤的归一化频率 V ,由于芯区GeO₂的浓度变大,瑞利散射损耗增加,但模式间隔的增加有助于减小DMA;增大 a ,可以有效降低瑞利散射损耗,同时对于减小DMA也有良好效果^[17]。因此, a 和 Δn 以及折射率剖面的联合优化是实现更多模式低损和低DMA传输的必然选择。本研究组与长飞光纤光缆国家重点实验室联合设计并拉制了支持4个LP模式的少模光纤,所有模式的有效面积均处于137~158 μm^2 之间,DMGD小于6.6 ps/m。基于此种结构的少模光纤,本研究组针对瑞利散射的模式相关特性展开了理论研究^[17]。研究表明,少模光纤的结构参数和前向传导模式

对瑞利背向散射光场的功率和模场分布具有较大影响。如图2所示,增大芯径,瑞利散射功率逐渐减小;当保持芯径不变、增加芯包层折射率差时,瑞利散射功率逐渐增大;当前向光以不同模场分布形式传输时,瑞利散射光功率也有差异,前向传输为基模时瑞利散射光功率最大。不论前向光场以何种模式传输,瑞利背向散射光场在各种传导模式中均有能量分布,与前向相同的模场具有最大的功率比例;仿真结果显示,背向光场的模式功率比例几乎不受光纤结构参数的影响。

差分模式群时延(DMGD)是衡量少模光纤性能的另一个非常重要的参数,其表征了不同模式在光纤中传输速度的差异性。尽管大的DMGD有利于降低模式间串扰,但对于长距离的模分复用光传输系统而言,DMGD将对系统性能产生很大损伤。当携带相互独立的模分复用数据信道的模式具有不同的群速度时,同时入射进少模光纤的不同模式脉冲无法同时到达接收机,如果模式耦合和DMGD同时存在,模式间串扰将会扩展到多个比特周期;如果此时模式间累积DMGD变大,则模分复用接收机的MIMO数字信号处理将会变得非常复杂。从这一角度讲,长距离模分复用传输需要尽可能降低少模链路的DMGD,而优化DMGD的关键在于光纤芯区折射率剖面的设计。

通常根据芯区折射率剖面的形状可以将光纤分为阶跃型和渐变型两种类型。研究表明,阶跃型折射率分布的少模光纤具有较大的DMGD,但可以实



(a) 随芯包层折射率差的变化

(b) 随纤芯半径的变化

图2 瑞利背向散射光功率占入射光功率的比例

Fig. 2 Ratio of Rayleigh backscattering power to the launching power

现较低的模间串扰。而渐变型折射率分布的少模光纤可以实现很低的DMGD, 尤其是在纤芯高折射率外围区域增加一个低折射率的辅助沟道时, 可以明显降低光线的DMGD, 如图3(a)所示。图3(b)展示了带辅助沟道的2-LP模光纤的DMGD随工作波长的变化^[18], 小于0.004 ps/m的低DMGD在1460~1610 nm波段得到了实现, 尤其是在1530~1565 nm的C波段, DMGD低于0.001 ps/m。当光纤所能支持的模式数目增加时, 所有模式间的DMGD都可以得到很好的减小, 如最近报道的6-LP和9-LP模光纤, 均采用带辅助沟道的渐变折射率剖面结构^[14-16]。以最新的9-LP模光纤为例^[16], 归一化频率 V 设为只传导9个LP模式的最大值11.8, 通过优化芯径(芯包层折射率差 Δn 可由 V 推导得到)、 α (渐变折射率形状的指数)和辅助沟道来获得最小的DMGD值; 沟道的体积(沟道和薄层折射率差在沟道区域的积分)也需要优化以降低对9个传导模式的宏弯损耗(10 mm弯曲半径下损耗小于10 dB/圈), 同时满足更高阶模式具有足够高的损耗以实现有效的截止(2圈40 mm直径弯曲和1圈半径超过140 mm弯曲下损耗均大于19.34 dB)。芯径为14 μm 、芯包层折射率差 14.9×10^{-3} 、 α 为1.94、在距纤芯0.91 μm 处体积为0.38 μm^2 的沟道实现了最佳优化结果, 当工作波长为1550 nm时, 最大DMGD只有24 ps/km, 色散在19~21 ps/(nm·km), 基模的有效

面积最小(104 μm^2), LP₀₃模式的有效面积最大(311 μm^2)。

3 少模光纤放大器

少模光纤放大技术是确保模式复用系统能够进行长距离传输的关键技术。根据现阶段的研究与分类标准来看, 模式相关增益(differential modal gain, DMG)是少模光纤放大技术的重要参数, 主要由离子的掺杂浓度、泵浦光的模场分布及信号光的模场分布3个方面决定。通常泵浦光的模场分布与信号光的模场分布匹配度越高, 则该信号模式获得的增益也就越大。因此需要通过调整多模泵浦的模式分布来控制模式增益。根据光纤放大的物理过程不同可将放大主要分为3类: Raman放大、参量放大及掺铒光纤放大, 前两者属于分布式放大, 第3种属于集总式放大。

基于现有的制造少模掺铒光纤的技术, 少模掺铒光纤放大器(FM-EDFA)已实现。2011年, 南安普顿大学Jung和Alam^[19]等首次实现了FM-EDFA, 通过优化折射率剖面、铒离子掺杂以及泵浦光的模场分布控制差分模式增益, LP₀₁和LP₁₁两种模式的放大增益超过22 dB。2012年召开的ECOC会议上, 贝尔实验室的Salsi和Ryf等提出了同时放大6个空间模式的EDFA实验系统^[20], 如图4所示, 使用两段具有不同模式相关增益的掺铒光纤作为增益介质, 并通过改变泵浦光入射模场分布

来实现模式增益的均衡, 得到模式间增益差不超过4 dB, 噪声指数小于7 dB。

2014年召开的OFC会议上, 南安普顿大学的Lim和Jung等报道实现了支持4个模式群(LP₀₁、LP₁₁、LP₂₁和LP₀₂)的包层泵浦少模掺铒光纤放大器^[21], 通过将掺铒光纤的长度从9 m减少至5 m可以使FM-EDFA的工作窗口从15 nm扩展到30 nm, 在波长1540~1570 nm的范围内, 模式增益大于20 dB, 模式群间的差分模式增益约为4 dB, 通过优化掺铒光纤纤芯与包层的面积比可以更进一步减少DMG。2014年, 南安普顿大学的Jain和Jung团队第一次实验验证了一种支持3个模式, 包层泵浦的多元素光纤放大器(3-moded multi-element fiber amplifier, 3M-MEFA)^[22]。共包含5个光纤元素, 分别为4根共同掺铒或镱的单模光纤和1根中心多模泵浦光纤, 将这些光纤放在同一个涂覆层内即形成了实验所用光纤, 每根单模光纤都可以对3个空间模式(LP₀₁、LP_{11a}和LP_{11b})进行放大, 获得了12重(3个模式×4根单模光纤)空间模式多样性。在每个通道的输入泵浦功率-12.5 dBm, 1542~1560 nm的波长范围下, 得到平均信号增益18.3 dB, DMG约为1~6 dB的结果。2015年, 日本NTT通信公司实验室设计了一个使用环形纤芯掺铒光纤(ring-core erbium-doped fiber, RC-EDF)支持2个LP模式的光纤放大器^[23], LP₀₁、LP₁₁和LP₂₁模式泵浦的DMG约为1 dB, 在保证获得最大泵浦效率的前提下, 优化设计了少模光纤的中间纤芯与圆环纤芯两个部分, 以此得到最小的DMG。RC-EDFA已经被成功应用到了多芯-少模光纤的传输系统中, 也必将会成为将来的空分复用系统中不可或缺的放大器。2015年召开的ECOC会议中, 贝尔实验室的Ryf和Fontaine等介绍了一个全光双包层泵浦少模掺铒光纤放大的传输系统^[24]。放大光纤包括3部分: 渐变折射率光纤、双包层泵浦少模光纤以及在光纤尾端都有模式选择光子灯笼, 所有的部分熔接起来, 形成一个少模输入输出的系统, 该实验的泵浦功率是通过侧面

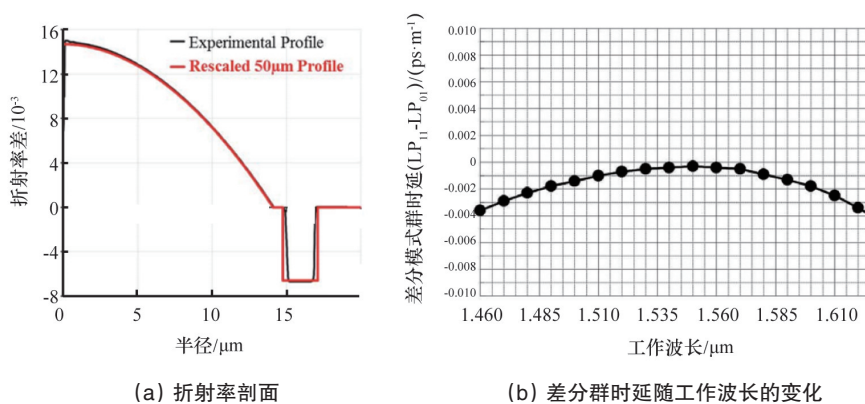


图3 光纤的折射率分布和差分群时延

Fig. 3 Refractive index profile and DMGD variation of the FMF

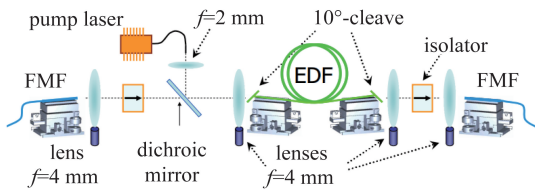


图 4 少模掺铒光纤放大器结构图
Fig. 4 Schematic of FM-EDFA

泵浦进行传送,泵浦的耦合效率为 69.2%,与之前报道的在多芯光纤中实施包层泵浦的效率类似。侧面泵浦的放大效果与端面泵浦放大效果类似:C波段的平均模式增益大于 20 dB,DMG 约 3 dB,噪声指数为 6~7 dB。从实际应用的角度来说这是一个重要的提升,为全光纤化的泵浦设计结构提供了可能。

在 Raman 光纤放大方面,在 2011 年召开的 OFC 会议上,贝尔实验室的 Ryf 等报道使用后向泵浦技术,首次在少模光纤中实现了模式均衡的光放大^[25],得到了 8 dB 的信号增益。在 2012 年召开的 ECOC 会议上,Ryf 研究小组介绍了一个使用混合少模光纤 Raman 放大的实验^[26],在 5 个波长通道中使用 6 个空间偏振模式,共传输了 209 km。在 2015 年召开的 ECOC 会议上,美国贝尔实验室的 Ryf 研究小组报道了一个在支持 3 个模式的少模光纤中实现双向泵浦的 Raman 放大器的传输实验结果^[27],使用低损耗的光子灯笼作为模式复用器,通过将 Raman 泵浦激光器选择性地耦合进少模光纤 LP₁₁ 模式获得模式增益均衡,得到 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式分别有 8 dB 的增益,双向泵浦的组合增益大于 16 dB 的实验结果。关于少模光纤参量放大近期只提出了理论的解释,并没有实际的实验结果。在 2013 年召开的 OFC 会议上,美国中佛罗里达大学设计出了一种中央折射率凹陷的少模光纤用于实现少模光纤参量放大^[28],此设计使得 LP₀₁ 和 LP₁₁ 模式的零色散波长转移到了 C 波段中间,因此在单根光纤中,这两个模式都可以在大带宽的情况下同时获得高增益参量放大。

4 模分复用光传输

模分复用器和少模光纤的发展促进了模分复用光传输的实现,典型的模分复用传输系统如图 5 所示(以 10 个空间模式复用为例)。激光器输出光首先经过调制器加载信号,然后实现偏振复用,再经过可调光衰减器和 EDFA 组成的噪声加载模块调节光信噪比(OSNR),通过窄带光滤波器后进行功率的放大;接下来将光均分为 10 路,每路光信号通过不同长度的单模光纤完成去相关后进入模分复用器,实现多种模式在少模光纤的复用传输;接收端通过模式解复用器将模式信道分离,经过前置低噪声放大后利用相干接收机接收,实时示波器可以完成信号的采样;通过后续的 MIMO 数字信号处理算法可以完成数据恢复。

模分复用发展的早期只利用 LP₀₁、LP_{11a} 和 LP_{11b} 这 3 个空间模式进行复用传输。2012 年荷兰埃因霍温理工大学报道了 3 个空间模式、96 个波长的双偏振态 16QAM 传输,实现了 73.7 Tbit/s 的大容量模分复用光传输^[4]。随着模式复用器和解复用器的发展以及 MIMO 算法的不断进步,模分复用传输系统可支持传输的模式数目不断增加,传输的速率不断上升,频谱效率越来越高。2012 年,贝尔实验室首次实现了采用 LP₀₁、LP_{11a}、LP_{11b}、LP_{21a}、LP_{21b} 和 LP₀₂ 的 6 个空间模式的光传输^[29],实验中复用了 8 个波长,最终实现 96×40 Gbit/s,即 3.8 Tbit/s 的 QPSK 信号在 130 km 少模

光纤的传输。2015 年,贝尔实验室的采用多模光纤复用了 LP₀₁、LP₁₁、LP₀₂、LP₂₁、LP₁₂、LP₃₁、LP₀₃、LP₂₂ 和 LP₄₁ 这 9 个线偏振模的 15 个模式,结合偏振复用,波分复用 12 个波长,在接收端采用 30×30 的 MIMO 处理算法,最终实现了 43.63 bit/(s·Hz) 频谱效率 22.8 km 的传输^[30]。

为了验证长距离模分复用光传输系统的性能,环路实验在实验室中环境下广泛采用。2012 年,贝尔实验室利用 DGD 补偿的 25+5 km 两段少模光纤开展了 40 次环路传输实验,创造了传输 1200 km 的长距离传输记录^[31],复用了 6 个空间偏振模,每个模式调制 20 Gbaud 的 QPSK 信号。2013 年,荷兰埃因霍温理工大学采用 80 km 三模光纤环路传了 6 个环路共 480 km,实现了 3×192 Gbit/s 的 DP-8QAM 信号传输,这是世界上首次采用全光纤环路高阶调制码型的少模传输实验。除了增加传输系统中的复用波长和模式数目,采用高级调制格式可以进一步提高传输容量。模分复用光传输中比较常用的调制格式是 QPSK,高级调制格式如 16QAM^[4]、32QAM^[32] 都可以进一步提高频谱效率。文献[32]报道实现了 3MDM×8WDM×320 Gbit/s DP-32QAM 信号的 120 km 少模光纤传输,总的传输速率为 7.68 Tbit/s。2013 年,贝尔实验室报道了复用 32 个波长、12 个空间和偏振模式,利用 59 km 的 DGD 补偿少模光纤开展了 3 次环路传输实验,总传输距离 177 km,采用 16QAM 的调制格式和 3D 波导结构的模分复用器/解复用器,创造了在 800 GHz 带宽内 32 bit/(s·Hz) 频谱效率纪录^[33]。当增加光

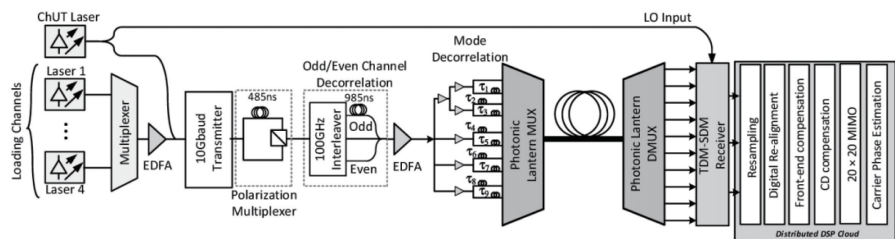


图 5 典型模分复用光传输实验系统
Fig. 5 Schematic of MDM transmission system

纤中的模式数目时候,可以线性增加单根光纤的传输容量,但提高信号的调制阶数却不能达到这种线性增加的效果。当增加调制阶数时,系统的光信噪比(OSNR)更为敏感,也就是如果想要达到同样的长距离传输性能需要更高的OSNR,但是少模光纤仍然还是由石英制成,它的损耗和单模光纤近似,所以每80 km后要放大一次,这样就会大大降低接收端的OSNR。

由于信号在少模光纤内传输过程中存在模间串扰,模分复用光传输系统中必须采用基于MIMO的数字信号处理技术^[34]。MIMO的DSP均衡算法主要有时域和频域两种。时域算法复杂度会随整个链路的DMGD增加而线性增长,因此不适用于长距离传输的模

分复用系统。通常使用的频域算法会有最低的复杂度,但是对于DMGD的补偿效果会受到循环前缀长度的限制。

5 展望

基于少模光纤的模分复用光传输技术已经取得了重要研究进展,在提升单纤通信系统传输容量方面展示了巨大潜力,数十倍的容量提升已经成为可能,为解决未来光纤通信系统容量瓶颈问题提供了有效途径。

未来研究中,有待进一步解决以下关键技术和问题:

1) 多模式数目、低成本、集成化的模式复用器和解复用器是进一步提升

模分复用系统容量的关键技术,在一定程度上成为模分复用光传输走向实际商用的决定因素。

2) 少模光纤结构参数的优化,提高传导的模式数目,降低DMGD和DMA,从而提高复用的模式信道数目,为进一步提升容量提供物理链路基础。

3) 少模光纤放大器性能的提升,降低差分模式增益,实现多种模式的均匀放大,是模分复用超长距离光传输的根本保证。

4) MIMO数字信号处理算法的优化,降低计算复杂度,提高信号处理效率,降低对数字滤波器抽头数,全面降低硬件电路的功耗。

参考文献(References)

- [1] Weerdenburg J, Velazquez-Benitez A, Uden R, et al. 10 spatial mode transmission using low differential mode delay 6-LP fiber using all-fiber photonic lanterns[J]. *Optics Express*, 2015, 23(19): 24759-24769.
- [2] Ellis A D, Zhao J, Cotter D. Approaching the non-linear shannon limit[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 423-433.
- [3] Chen Y, Lobato A, Jung Y, et al. 41.6 Tbit/s C-band SDM OFDM transmission through 12 spatial and polarization modes over 74.17 km few mode fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(7): 1440-1444.
- [4] Sleiffer VAJM, 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): B428-B438.
- [5] Soma D, Igarashi K, Wakayama Y, et al. 2.05 peta-bit/s super-nyquist-WDM SDM transmission using 9.8 km 6 mode 19 core fiber in full C band[C]// *Proceedings of European Conference on Optical Communication 2015*. Valencia, Spain: IEEE, 2015: PDP5A.1-3.
- [6] Berdagué S, Facq P. Mode division multiplexing in optical fibers[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(11): 1950-1955.
- [7] Yu D, Fu S, Tang M, et al. A robust mode converter based on liquid crystal on silicon (LCOS) with off-focus operation[J]. *Photonics Journal*, 2015, 7(3): 1-8.
- [8] Wang Y, Liang L, Yu D, et al. Optoelectronic optimization of mode selective converter based on liquid crystal on silicon[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 77: 198-202.
- [9] Birks T A, Gris-Sánchez I, Yerolatsitis S, et al. The photonic lantern[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 107-167.
- [10] Velázquez-Benítez A M, Antonio-López J E, Alvarado-Zacarias J C, et al. Scaling the Fabrication of higher order photonic lanterns using microstructured preforms[C]// *Proceedings of European Conference on Optical Communication 2015*. Valencia, Spain: IEEE, 2015: Tu3.3.2.
- [11] Chen H, Fontaine N K, Ryf R, et al. Design constraints of photonic-lantern spatial multiplexer based on laser-inscribed 3-D waveguide technology[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(6): 1147-1154.
- [12] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Space-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2011*. Los Angeles, USA: Optical Society of America, 2011: PDPB10.
- [13] Mori T, Sakamoto T, Wada M, et al. Low DMD four LP mode transmission fiber for wide-band WDM-MIMO system[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2013*. Anaheim, USA: Optical Society of America, 2013: OTh3K.1.
- [14] Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, et al. Low-DMGD 6-LP-mode fiber[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2014*. San Francisco, USA: Optical Society of America, 2014: M3f.2.
- [15] Jensen RV, Gruner-Nielsen L, Wong N H L, et al. Demonstration of a 9 LP-mode transmission fiber with low DMD and loss[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2015*. Los Angeles, USA: Optical Society of America, 2015: W2A.34.
- [16] Sillard P, Molin D, Bigot-Astruc M, et al. Low-differential-mode-group-delay 9-LP-mode fiber[C]// *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2015*. Los Angeles, USA: Optical Society of America, 2015: M2C.2.
- [17] Yu D, Fu S, Tang M, et al. Mode dependent characteristics of Rayleigh backscattering in weakly-coupled few-mode fiber[J]. *Optics Communications*, 2015, 346: 15-20.

- [18] Peckham D W, Sun Y, Mc C A, et al. Few-mode fiber technology for spatial multiplexing[M]//Ivan Kaminow, Tingye Li, Alan E W. Optical Fiber Telecommunications VI A, Manhattan: Elsevier, 2013: 283–319.
- [19] Jung Y, Alam S, Li Z, et al. First demonstration and detailed characterization of a multimode amplifier for space division multiplexed transmission systems[J]. Optics Express, 2011, 19(26): B952–B957.
- [20] Salsi M, Ryf R, Cocq G L, et al. A six-mode erbium-doped fiber amplifier[C]//Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012. Amsterdam, Netherlands: Optical Society of America, 2012: Th.3.A.6.
- [21] Lim E L, Jung Y, Kang Q, et al. First demonstration of cladding pumped few-mode EDFA for mode division multiplexed transmission[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2014, San Francisco, USA: Optical Society of America, 2014: M2J. 2.
- [22] Jain S, Jung Y, May-Smith T C, et al. Few-mode multi-element fiber amplifier for mode division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 29031–29036.
- [23] Ono H, Hosokawa T, Ichii K, et al. 2-LP mode few-mode fiber amplifier employing ring-core erbium-doped fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27405–27418.
- [24] Ryf R, Fontaine N K, Chen H, et al. 72 Tb/s transmission over 179 km all-fiber 6-mode span with two cladding pumped in-line amplifiers[C]//Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication 2015. Valencia, Spain: IEEE, 2015: Tu.3.2.2.
- [25] Ryf R, Sierra A, Essiambre R J, et al. Mode-equalized distributed Raman amplification in 137 km few-mode fiber[C]//Proceedings of European Conference and Exposition on Optical Communications 2011. Geneva, Switzerland: Optical Society of America, 2011: Th.13.K.5.
- [26] Ryf R, Randel S, Mestre M A, et al. 209 km single-span mode- and wavelength-multiplexed transmission over hybrid few-mode fiber[C]//Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication 2012. Amsterdam, Netherlands: Optical Society of America, 2012: Tu.1.C.1.
- [27] Ryf R, Esmaelpour M, Fontaine N K, et al. Distributed raman amplification based transmission over 1050 km few-mode fiber[C]//Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communication 2015. Valencia, Spain: IEEE, 2015: Tu.3.2.3.
- [28] Zhao N, Huang B, Amezcua-Correa R, et al. Few-mode fiber optical parametric amplifier[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2013. Anaheim, USA: Optical Society of America, 2013: OTu2D.5.
- [29] Ryf R, Fontaine N K, Mestre M A, et al. 12×12 MIMO transmission over 130 km few-mode fiber[C]//Proceedings of Frontiers in Optics 2012. Rochester, USA: Optical Society of America (OSA), 2012: FW6C.4.
- [30] Fontaine N K, Ryf R, Chen H, et al. 30×30 MIMO transmission over 15 spatial modes[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2015. Los Angeles, USA: Optical Society of America, 2015: Th5C.1.
- [31] Randel S, Ryf R, Gnauck A H, et al. Mode-Multiplexed 6×20 GBd QPSK transmission over 1200 km DGD-compensated few-mode fiber[C]//Proceedings of Optical Fiber Communication Conference 2012. Los Angeles, USA: Optical Society of America, 2012: PDP5C.5.
- [32] Chen H, Sleiffer V, Uden R, et al. 3 MDM×8 WDM×320 Gb/s DP-32QAM transmission over a 120 km few-mode fiber span employing 3-spot mode couplers[C]//Proceedings of Opto Electronics and Communications Conference and Photonics in Switching 2013. Kyoto, Japan: Optical Society of America (OSA), 2013: PD3_6.
- [33] Ryf R, Randel S, Fontaine N K, et al. 32 bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177 km few-mode fiber[C]//Proceedings of National Fiber Optic Engineers Conference 2013. Anaheim, USA: Optical Society of America, 2013: PDP5A. 1.
- [34] Uden R G H, Okonkwo C M, Sleiffer V A J M. et al. MIMO equalization with adaptive step size for few-mode fiber transmission systems[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 119–126.

Mode division multiplexing transmission over few-mode fiber

FU Songnian, YU Dawei

National Engineering Laboratory for Next Generation Internet Access System; School of Optics and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract The growing Internet traffic has imposed strong demands on current fiber optical communications. Mode division multiplexing (MDM) transmission based on few mode fiber (FMF) has attracted worldwide research interests, due to the potential for overcoming the capacity crunch of standard single mode fiber (SSMF). It is expected that N spatial modes in the FMF can achieve a capacity N times higher than that of the SSMF. We review the recent progress of MDM techniques including mode division multiplexer/demultiplexer, FMF design and fabrication, few-mode fiber amplifiers for long-haul transmission, and the latest outstanding transmission demonstrations. Finally, we outline the prospects and future challenges in this research topic.

Keywords mode division multiplexing; few-mode fiber; optical fiber communication; high capacity optical transmission

(编辑 傅雪)