

模式分集复用通信技术研究进展

胡贵军, 闫李, 常玉鑫, 韩悦羽

吉林大学通信工程学院, 长春 130012

摘要 模式分集复用技术是当前光纤通信领域的研究热点之一, 该技术以少模光纤中相互正交的独立模式为信道, 同时承载多路信号, 可以成倍提升光纤通信系统的容量, 近年来备受关注。从系统建模、信号均衡和实验进展等方面总结了模分复用通信领域近年来的主要研究成果, 重点分析了模分复用系统输出信号的主要均衡方法及其复杂度; 从系统结构的视角, 总结了模分复用系统的主要类型及其主要实验结果; 对模分复用技术的未来研究动向和发展前景进行了展望。

关键词 光纤通信; 模式分集复用; 少模光纤; 复用/解复用器

光纤通信技术自 20 世纪 70 年代诞生以来, 超长距离、超大容量传输一直是其不懈追逐的目标, 各种扩容技术层出不穷, 如时分复用(time division multiplexing, TDM)技术^[1-2]、波分复用(wavelength division multiplexing, WDM)技术^[3-4]、偏振复用(polarization division multiplexing, PDM)技术^[5]、高级调制技术^[6-7]等。然而, 由于 WDM 系统信道数目和信号调制阶数的提高, 单根光纤内的光功率也日益增大, 这加剧了单模光纤内固有的非线性效应和光纤放大器的自发辐射噪声, 使单模光纤通信系统的容量逐渐达到理论极限^[8-11]。这种带宽危机在现实中也有迹可循, 在 20 世纪 90 年代, WDM 系统的容量增长趋势迅猛, 其增长率达到每年 80%, 而自 2002 年以后, 这一数字迅速降为每年 20%^[12-13]。理论分析和实际系统的发展都预示“容量枯竭”即将到来。

在这一背景下, 科研工作者开始考虑光纤中尚未使用的物理维度, 模式分集复用(mode division multiplexing, MDM)这一技术开始在国内外引起广泛关注^[14-16]。所谓模式, 实际上是光作为电磁波在光纤中传输时形成的一种场型分布形式, 在理想情况下不同模式是相互正交的, 可以作为独立信

道来承载多路信号, 从而成倍提升光纤通信系统的容量。传统的多模光纤中模式过多, 模间色散限制了其通信性能, 使得多模光纤不适合长距离大容量信号传输^[17]。为了实现模分复用, 一种新型多模光纤——少模光纤应运而生。少模光纤中只有有限个稳定的传输模式, 将这些有限模式作为独立信道, 既减小了模间色散, 又可以成倍提升系统传输容量。近年来, 这种基于少模光纤的模分复用通信成为光纤通信领域的又一前沿热点技术^[18-21]。

1 模分复用系统的构成

典型的模分复用系统结构如图 1 所示。在发送端, 电信号经过信源编码等处理之后, 进入电光调制器转化为光信号。每路光信号由一个特定模式承载, 然后通过模分复用器将承载不同信号的各个模式复用到同一根少模光纤内进行传输。在接收端, 模分复用信号经模分解复用器分离, 然后分别由不同的探测器将不同模式的光信号转化为电信号。得到的电信号经数字信号处理模块进行模数转换、色散补偿、信号均衡、载波相位恢复等处理, 最后判决得到源信号。

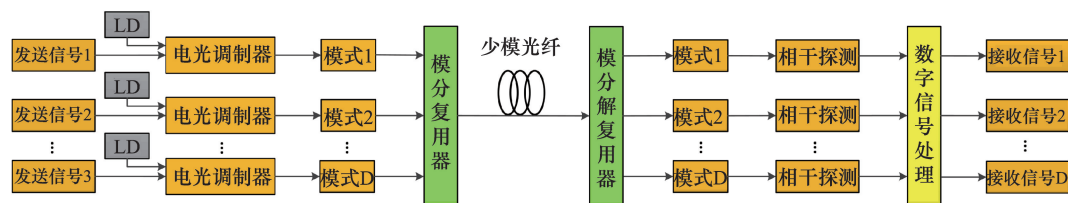


图 1 基于少模光纤的模分复用系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of few mode fiber based MDM system

收稿日期: 2016-06-30; 修回日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575078, 61177066); 吉林省科技发展计划项目(20140203009GX); 吉林省发改委产业技术研发专项(2014Y087)

作者简介: 胡贵军, 教授, 研究方向为光通信技术与器件, 电子信箱: hugj@jlu.edu.cn

引用格式: 胡贵军, 闫李, 常玉鑫, 等. 模式分集复用通信技术研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 54-61; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.16.005

2 模分复用系统的传输模型

模分复用系统的传输介质是少模光纤。少模光纤中影响信号质量的损伤除色度色散、损耗、非线性外,模式耦合、模式群时延(differential mode group delay, DMGD)和模式相关损耗(mode dependent loss, MDL)更为重要。因此,对MDM系统的建模,必须全面考虑这些因素的综合作用。在现有建模理论中,矩阵传输模型由于能够简便且完善地描述模式间的相互作用而被广泛应用^[22]。其核心思想是:将少模光纤MDM系统等效为多个独立段,并假设在段内每个模式独立传播,而模式耦合只发生在每个独立段的输入端和输出端。

假设一个MDM系统中有D个正交传播模式,依据矩阵传输模型可把整个系统划分为K个独立段。在忽略模式耦合的情况下,各个模式在第l段内独立传播时所遭受的损伤可由一对角阵 $\Lambda^{(l)}$ 来表征

$$\Lambda^{(l)}(\omega) = \begin{bmatrix} e^{\frac{1}{2}g_1^{(l)} - j\omega\tau_1^{(l)} - \frac{j}{2}\omega^2\Delta\beta_{2,1}t^{(l)}} & & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & & \dots & e^{\frac{1}{2}g_D^{(l)} - j\omega\tau_D^{(l)} - \frac{j}{2}\omega^2\Delta\beta_{2,D}t^{(l)}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ω 为角频率; g_i 为模式*i*的模式相关损耗; τ_i 为模式*i*的模式色散; β 为模式*i*的传播常数,而 $\Delta\beta_{2,i}$ 为经过量化后的模式相关色度色散。

为完整描述第*l*段的光传播行为,分别第*l*段的输入端和输出端加入线性耦合矩阵 $V^{(l)}$ 和 $U^{(l)}$,得到MDM系统第*l*段的 $D \times D$ 传输矩阵

$$H^{(l)}(\omega) = V^{(l)} \Lambda^{(l)}(\omega) U^{(l)*} \quad (2)$$

式中, $U^{(l)*}$ 为 $U^{(l)}$ 的Hermitian转置, $V^{(l)}$ 、 $U^{(l)}$ 为与频率无关的一对酉矩阵。

依据矩阵传输模型,把系统各段的传输矩阵级联,得到系统在频域内的 $D \times D$ 信道传输矩阵

$$H(\omega) = \prod_{l=1}^K H^{(l)}(\omega) \quad (3)$$

假定在频域内MDM系统的D路输入信号为 $S(\omega) = [s_1(\omega), s_2(\omega), \dots, s_D(\omega)]^T$,接收信号为 $X(\omega) = [x_1(\omega), x_2(\omega), \dots, x_D(\omega)]^T$,可得MDM系统输出输入关系为

$$X(\omega) = H(\omega)S(\omega) \quad (4)$$

经逆傅里叶变换后,得到MDM系统输出输入关系的时域形式

$$\mathbf{x}(t) = \bar{H} \mathbf{s}(t) \quad (5)$$

式中,向量 $\mathbf{x}(t)$ 、 $\mathbf{s}(t)$ 分别表示时域内的输出信号和输入信号。 \bar{H} 也是一个 $D \times D$ 矩阵,表示系统在时域内的信道传输矩阵。式(5)写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_D(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1D} \\ \vdots & & \vdots \\ h_{D1} & \dots & h_{DD} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1(t) \\ \vdots \\ s_D(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, h_{ij} 为第*j*个输入模式与第*i*个输出模式之间的信道冲激响应,其表达式为

$$h_{ij} = \sum_{k=0}^Q h_{ij}(k) \delta(t - \tau_k) \quad 0 \leq \tau_k \leq \tau_{DMGD} \quad (7)$$

式中, $h_{ij}(k)$ 为耦合强度; τ_k 为耦合发生时对应的时延, τ_{DMGD} 为光纤中总的差分模式群时延; Q 为滤波器阶数。

由式(6)和式(7)可知,模式耦合与模式群时延等因素共同作用导致模分复用信号在传输中既有空间上的相互串扰,又有时间上的混叠,形成了较为复杂的多信道卷积形式。

3 模分复用系统的信号均衡

MDM系统中的模式耦合会导致模式信道间发生串扰,DMGD所引起的模式时延扩展直接决定了系统信道冲击响应的长度,二者共同作用严格限制了MDM系统的传输距离及其容量扩展。为保证MDM系统的传输性能,在接收端必须利用信号均衡手段消除串扰,恢复出源信号。目前,用于模分复用系统解复用的均衡方法可分为数据辅助的均衡方法^[23-27]和无数据辅助的盲均衡方法^[28-32]。

3.1 数据辅助的均衡方法

数据辅助法通过在发送的每一个数据帧前插入一定长度且已知的训练码元来辅助滤波器实现可靠预收敛,是目前MDM系统多入多出(multiple-input multiple-output, MIMO)均衡中较为常用的方法^[33]。

在接收端,为了从不同模式信道中恢复出各路信号,首先需建立一个 $M \times M$ 的线性均衡器 $W(n)$,其中*M*表示MDM系统的信道个数,接着利用自适应滤波理论估计出信道传输矩阵 $H(n)$ 的逆,理想情况下 $W(n) = H(n)^{-1}$ 。最后,将接收信号 $\mathbf{x}(n) = [x_1(n), \dots, x_M(n)]^T$ 与滤波器矩阵 $W(n)$ 卷积得到源信号的估计信号 $\mathbf{y}(n) = [y_1(n), \dots, y_M(n)]^T$ 。具体表达式为

$$\mathbf{y}(n) = W(n) * \mathbf{x}(n) = H(n)^{-1} * \mathbf{x}(n) \quad (8)$$

式中,*为卷积; $W(n)$ 为一个 $M \times ML$ 的矩阵;*L*为子滤波器 $w_{ij}(n)$ 的长度。

在滤波器系数更新过程中,需首先利用数据辅助的方法实现均衡器预收敛,然后转向判决反馈模式,实现对信息码元的自适应均衡。同时,为消除相位噪声对梯度估计的干扰,需在自适应过程中联合载波相位恢复模块。均衡器的迭代更新算法有最小均方(least-mean-square, LMS)算法^[34]、递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法^[34]等,其中LMS算法简单且易于实现而得到广泛应用,而RLS算法虽然均衡性能更好,但计算复杂度相对较高。

信号的均衡过程可以在时域实现也可以在频域实现,图2和图3分别给出了单模式信道时域均衡(Time-Domain Equalization, TDE)^[23-25]和频域均衡(Frequency-Domain Equalization, FDE)^[26-27]的原理框图。

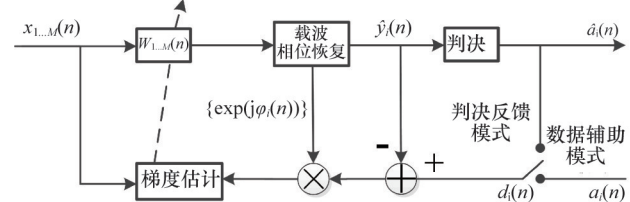


图2 单模式信道时域均衡原理

Fig. 2 Block diagram of TDE for one mode channel

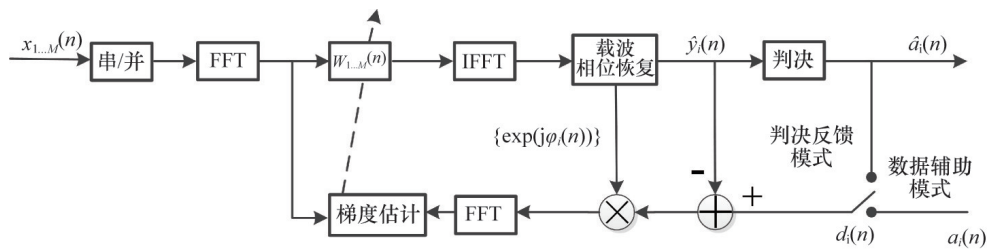


图3 单模式信道频域均衡原理

Fig. 3 Block diagram of FDE for one mode channel

从图2和图3可以看出,与TDE相比,FDE需首先对接收信号 $x(n)$ 进行串并变换,使其变为块状数据,然后利用快速傅里叶变换(FFT)将数据块变换到频域。将数据按照重叠保留法分块后,则可以通过块状信号与频域滤波器相乘来实现卷积运算。最后对均衡后得到的频域信号做离散傅里叶逆变换(IFFT)得到时域估计信号。相对于TDE中复杂的卷积运算来说,FDE利用高效的FFT/IFFT将信号变换至频域进行处理,从而将复杂的卷积运算变为简单的乘法运算。

为补偿DMGD的影响,均衡滤波器抽头长度必须能够覆盖整个系统的信道冲击响应,且MDM系统信道个数相对较多,因此,数字信号处理(digital signal processing, DSP)的复杂度是MDM系统实现必须考虑的问题。均衡方法的计算复杂度可以用输出每个模式的一个码元所需的乘法次数来衡量^[35]。假定MDM系统中总的DMGD长度为 τ_{DMGD} ,波特率为 B ,过采样率为 R ,则滤波器抽头长度 $L=R\tau_{\text{DMGD}}B$ 。以LMS算法为例,不包含载波相位恢复的时域均衡算法复杂度可表示为^[26]

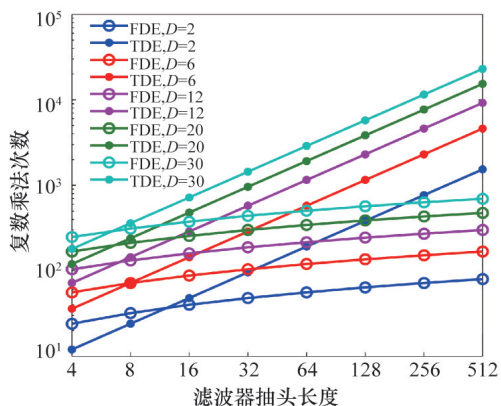
$$C_T = M(R+1)\tau_{\text{DMGD}}B \quad (9)$$

频域均衡复杂度的计算式为^[26]

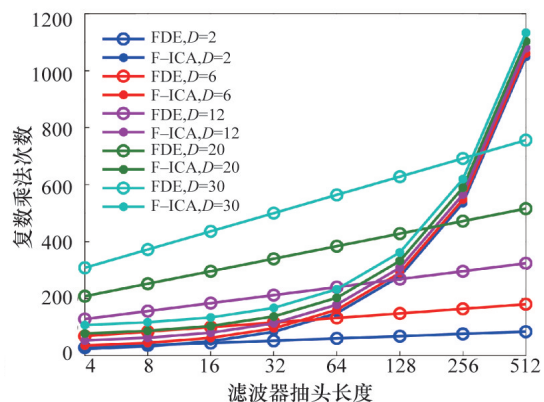
$$C_F = (4+2M)\text{lb}(R\tau_{\text{DMGD}}B) + 4M \quad (10)$$

图4(a)给出了TDE和FDE算法复杂度的对比曲线。从图4可以看出,时域均衡的算法复杂度与链路中总的DMGD值、模式数目和码元速率成正比。因此,当少模光纤承载模式数目增多、DMGD过大时,接收端DSP的计算复杂度是难以承受的,所以时域均衡并不是MDM系统解复用的理想选择。与TDE相比,FDE的算法复杂度有显著下降。因此,在长距离大容量的模分复用系统中,当所需滤波器抽头长度较大时,频域均衡在计算复杂度上的优势会更加明显。

此外,为进一步降低频域均衡的复杂度,Arnk等^[27]提出在发送端对信息码元进行分块并在块前插入循环前缀的方法实现接收端频域均衡。该算法包括梯度计算在内的整个自适应过程均在频域进行,简化了频域算法的实现方式。但是,为实现对于DMGD的补偿,循环前缀的长度至少要等于DMGD所引起的时延扩展的长度,这将影响整个MDM系统的输出效率。



(a) TDE与FDE算法复杂度对比



(b) 频域独立成分分析(F-ICA)与FDE算法复杂度对比

图4 不同模式个数情况下各均衡方法的复杂度对比

Fig. 4 Comparison of the computational complexities of the equalization methods under different number of modes

3.2 无数据辅助的盲均衡方法

不论是在时域均衡还是在频域均衡中,为了达到较好的解复用效果,通常需要发送训练序列和估计信道传递函数,这在一定程度上降低了频谱利用率,同时增加了硬件实现的复杂性。因此,无数据辅助的盲均衡方法被引入到MDM系统的解复用。

3.2.1 基于独立成分分析的盲均衡

从式(6)可以看出,在模式耦合和差分模时延同时存在时,模式分集复用系统每路输出信号都是多路输入信号与信

道冲激响应线性卷积的叠加,这与多通道卷积混合模型是一致的,据此,提出基于多通道盲解卷积的解复用方法^[28]。该方法既可以在时域实现也可以在频域实现,时域实现需要卷积运算,计算复杂度难以满足实际要求^[26];而频域实现通过时频变换将卷积运算转化为乘法运算^[28],从而将时域多通道卷积混合问题简化为频域瞬时混合问题,进而采用较为成熟的频域独立成分分析(Frequency-Domain Independent Component Analysis, F-ICA)算法对各频点信号进行解混,降低了算法实现的复杂度。图5为F-ICA算法流程图。

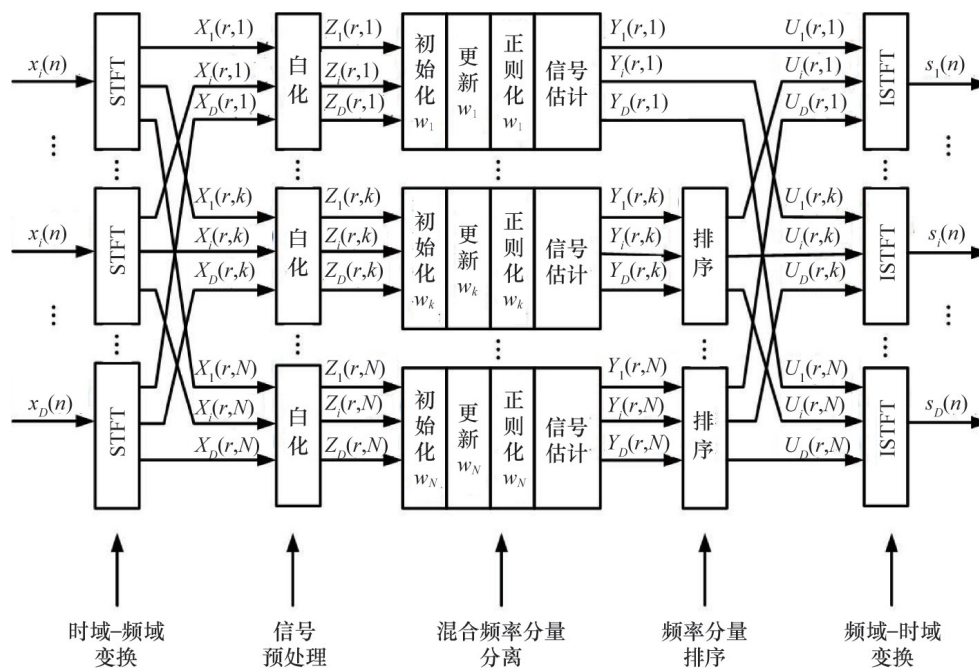


图5 F-ICA算法流程

Fig. 5 Algorithm flowchart of F-ICA

该算法的复杂度计算式为^[28]

$$C_{F-ICA} = 2 \text{lb}(2R\tau_{\text{DMGD}}B) + 3M + 5 + 2R\tau_{\text{DMGD}}B \quad (11)$$

不同模式数情况下算法复杂度随滤波器抽头长度的变化曲线如图4(b)所示。可以看出,模式数目相同的情况下,当滤波器抽头个数较少时F-ICA算法的复杂度低于FDE,而当滤波器抽头长度增加一定程度后,F-ICA算法复杂度上升较快,开始高于FDE。但是,随着模式数目的增加,FDE算法复杂度整体上升较快,而F-ICA算法复杂度的上升则不明显,且在模式数越大时,F-ICA算法在复杂度上的优势更加明显。而未来MDM的发展方向是趋向于更多的模式数目^[37]和更低的DMGD^[38],所以,F-ICA算法在未来模分复用系统的实际应用中极具潜力。

基于F-ICA的均衡方法通过时频变换规避了时域解卷积算法的高计算复杂度,且在解复用性能方面与FDE相

当^[28]。同时,F-ICA算法仅利用接收信号即可实现解复用,无需训练序列和信道估计,简单易行。

3.2.2 基于恒模算法和多模算法的盲均衡

恒模算法(constant modulus algorithm, CMA)^[29]适用于所有具有恒定包络(简称恒模)信号的均衡,算法利用输出信号模值与理想信号恒定模值的偏差构建代价函数,然后采用自适应算法寻找代价函数的极值点,当代价函数最小时算法收敛。基于CMA的盲均衡无需其他任何先验知识且计算复杂度低、对相位信息不敏感、易于实现,因此,在MDM系统解复用的前期研究中也受到了研究者的青睐^[29,32]。但由于CMA本身可能会导致误收敛,造成有用信息丢失,且在滤波器抽头长度较大时收敛速度变慢、稳定性下降^[39],因此基于CMA的盲均衡并不是MDM系统的最佳选择。

与CMA类似但又有所不同,多模算法(multimodulus al-

gorithm, MMA)^[30-31]的代价函数是两个一维代价函数的和,这两个一维代价函数分别用来计算输出码元的实、虚部模值与理想星座点实、虚部模值的偏差。因此,相比于CMA来说,MMA更加灵活,更适合对高阶调制信号进行均衡。课题组分别在时域和频域利用MMA实现了MDM系统的解复用^[30-31],结果表明:MMA能够实现采用16QAM、64QAM等高级调制格式的MDM系统的解复用,且收敛性能稳定;同时MMA算法能纠正一定程度的相位误差。在计算复杂度方面,频域MMA略高于频域LMS算法,但二者仍在同一量级^[31],在DSP可接受范围之内。

4 模分复用通信的实验进展

自从模分复用思想提出以来,实验验证的脚步一直没有停止。目前模分复用通信系统主要有基于全息型复用器的模分复用系统、基于光纤模式耦合型复用器的模分复用系统、基于光波导型复用器的模分复用系统、基于自由空间光学型复用器的模分复用系统及基于“光子灯笼”型复用器的模分复用系统。

全息型模分复用器是通过控制光束的空间强度和相位分布,从而获得期望的空间模式。全息型模分复用器具有模式选择性,但结构较为复杂,模式转换错误率高。Wakayama等^[40]在2013年提出了一种体全息型模分复用器(volume holographic demultiplexer, VHDM),并实验验证了3模VHDM的性能。同年,Von Hoyningen-Huene等将空间光调制器(spatial Light Modulator, SLM)应用于模分复用系统中,实现了模式选择性激发^[41]。

光纤耦合型模分复用器是全光纤化的,插入损耗低,但波长相关性高。2011年,日本NTT实验室Hanzawa等应用长周期布拉格光栅和光纤模式耦合器相结合的模式复用器,进行了2×10 Gbit/s信号的10 km传输实验^[42]。2015年,韩国电子通信研究院与贝尔实验室联合,应用光纤耦合型模分复用器,成功实现了32λ×3×120 Gbit/s信号的560 km传输实验^[43]。

平面光波导型模分复用器由于其较为成熟的工艺技术也被广泛使用。目前用于模分复用器的平面光波导技术主要包括非对称平行波导、非对称Y型波导、T型耦合器、多模干涉仪、锥形耦合器等。基于平面光波导的模分复用器具有体积小、结构紧凑、便于大规模生产等优点,但如何低损耗地与光纤链路耦合仍需要进一步研究。2013年,日本NTT实验室Hanzawa等采用非对称平行波导的模分复用器,实现了9 km、2模式×4波长×10 Gbit/s信号的传输实验^[44]。

自由空间光学型模分复用器利用相位盘、透镜组和分束器的组合来改变光相位的分布,从而实现空间模式的复用。由于其结构简单、高模式选择性等优点,近年来被广泛使用在模分复用实验传输系统中。目前,采用该种复用器进行模分复用通信的实验报道较多。2012年,荷兰埃因霍温大学的Sleiffer和南安普敦大学光电子研究中心的Jung等在OFC会

议上报道了DP-16QAM信号传输总量为73.7 Tbit/s的实验传输系统,传输距离达到119 km,谱效率高达12 bit/(s·Hz),并在该模分复用系统中,首次使用了多模放大器^[45]。2014年,美国NEC公司的Ip与康宁公司的Li等通过将WDM和MDM结合,实现了146λ×6×19-GBaud信号的500 km传输,实验系统中加入少模光纤放大器,当波长数量为16时,传输距离可以达到1000 km^[46]。2015年,Igarashi等将相位盘与马赫增德尔干涉仪(Mach-Zehnderinterferometer, MZI)结合,进行了2×32 Gbit/s QPSK信号传输实验^[47]。另外,Genevaux等采用基于多平面光转换(multi-plane Light Conversion, MPLC)的6模空分复用器,进行了6×128 Gbit/s PDM-QPSK信号20 km的无误码传输^[48]。此外,据2015年OFC会议报道,Koji Igarashi等将模分复用、空分复用和波分复用等有机结合,实现了8λ×6模×19芯×10-Gbaud的DP-QPSK信号的9.8 km的传输实验^[49],总的频谱效率高达345 bit/(s·Hz)(6 modes×19 cores×3.03 bit/(s·Hz))。

近年来,“光子灯笼”(photonic lantern, PL)型模分复用器受到了广泛关注,这种结构的模分复用器利用波导上的锥形绝热区,将输入端的基模转换成高阶模式并耦合到输出端的少模光纤中,同时实现了模式转换和复用。2014年,Ryf等利用“光子灯笼”型模分复用器进行了MDM与WDM结合的大容量传输实验,实现了32λ×3×30 Gbit/s的QPSK信号的900 km传输^[50]。此外,Leon-Saval等也利用“光子灯笼”设计了具有模式选择性的模分复用器^[51],所设计的模分复用器的插入损耗小于2 dB,模式相关损耗仅为0.5 dB。

本课题组设计了一种基于少模光纤光栅和光纤环形器的新型模分复用/解复用器(MUX/DEMUX),其结构如图6所示,利用所设计的模分复用/解复用器进行了两路伪随机信号的传输实验^[52-55],其中2×10 Gbit/s伪随机信号的传输实验结果如图7所示^[55]。

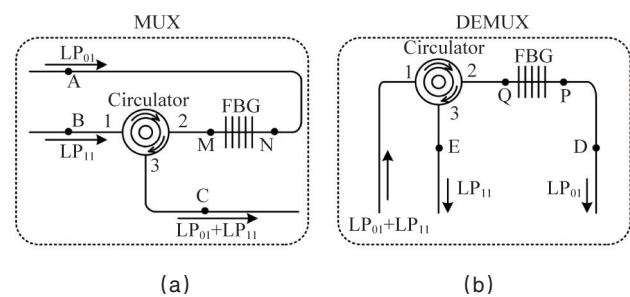


图6 基于少模光纤布拉格光栅的模分复用/解复用器结构
Fig. 6 Structure diagram of the few-mode fiber Bragg Gratings based mode multiplexer/demultiplexer

从图7可以看出,当接收机的灵敏度分别为-14 dBm和-10 dBm时,背对背(B2B)和10 km少模光纤传输的误码率均能达到 10^{-3} ,此时接收信号眼图如图7中插图所示。若采用FEC校验后,可以实现误码率为 10^{-9} 的信号传输。

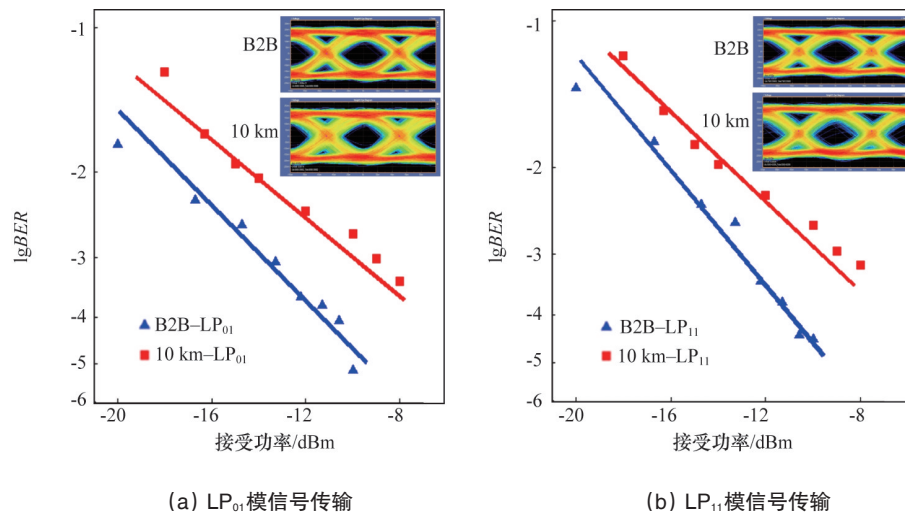


图7 误码率(BER)与接收功率的关系曲线

Fig. 7 BER versus Received power for LP₀₁ mode and LP₁₁ mode

5 展望

基于少模光纤的模分复用通信是一种新的通信技术,面临着很多单模光纤通信所不曾遇到的技术挑战,还有许多问题需要进一步深入研究。

1) 低差分模式时延的光域实现技术研究。少模光纤链路中差分模式时延的大小直接决定了接收端DSP的复杂度。通过光学手段降低传输链路中差分模式时延的大小,可以简化DSP模块并降低其计算负担,这对于MDM系统是至关重要的。现有低差分模式时延的光域实现方法主要有以下3种:(1)设计并制备具有超低差分模群时延的少模光纤;(2)使用具有相反DMGD特性的少模光纤进行系统链路的DMGD补偿;(3)引入强模式耦合,降低系统的DMGD。前2种方法的报道主要集中在2模光纤,向更多模式的扩展还有待进一步研究。引入强耦合的方法主要有偏芯熔接和引入光栅耦合器2种,但偏芯熔接会引入模式相关损耗,而光栅耦合器会带来额外损耗,下一步可以考虑采用多种方法联合降低DMGD的影响。

2) MIMO均衡技术研究。MIMO均衡技术是模分复用通信实用化的关键问题之一。从算法复杂度看,目前使用的方法都存在一定不足。时域均衡的复杂度过高而无法实际应用;频域MMA和频域自适应滤波的均衡技术在模式数量增多时复杂度上升明显,无法适应模式数量较多的模分复用系统;频域独立成分分析的均衡方法在差分模群时延较大时也表现得力不从心。可以考虑结合MDM系统的模式传输特性,寻找和开发新的均衡方法,进一步降低均衡方法的复杂度。此外,为提升自适应均衡器的信道跟踪特性,可以结合自适应步长控制算法,提升均衡器对于信道动态变化的鲁棒性。

3) 模分复用/解复用器。MDM技术不断发展,系统对模分复用/解复用器的要求也在不断提高。未来MDM系统的复

用模式将不断增多,模分复用/解复用器能否支持更多模式将成为MDM实现的关键所在。同时,如何降低模分复用/解复用器的波长依赖性、插入损耗及模间串扰等损伤因素,提升其复用/解复用性能,将成为下一步研究的关键问题。

4) MDM传输在光网络上的应用。目前MDM技术在光网络上的应用大致可分为长距离通信和短距离通信两类。MDM的长距离通信主要通过PDM、WDM等较成熟的组网技术协同通信,实现长距离骨干光传输网的进一步扩容;而短距离通信则通过利用新的模式自由度进行选择模式光传输,提升了现有短距离无源光网络的性能。但现有的大多数光网络器件,如波长选择性开关、光分叉复用器等,均为单模器件。因此,为实现MDM技术在光网络上的实际应用,将单模器件扩展为多模器件是一项重要的研究课题。

参考文献(References)

- [1] Xia C, Velázquez-Benítez A M, Lopez J E A, et al. TDMA few-mode passive optical network[C]//Asia Communications and Photonics Conference. Shanghai: OSA, 2014: ATh2F. 2.
- [2] 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.
- [3] Zhu B, Liu X, Chandrasekhar S, et al. 112-Tb/s (7×160×107 Gb/s) space-division multiplexed DWDM transmission over a 76.8 km multi-core fiber[C]//European Conference and Exposition on Optical Communications. Geneva, Switzerland: OSA, 2011: Tu.5.B.5.
- [4] Bosco G, Carena A, Curri V, et al. Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(15): 1129-1131.
- [5] 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. Los Angeles: OSA, 2011: PDPB5.
- [6] Kikuchi K. Phase-diversity homodyne detection of multilevel optical

- modulation with digital carrier phase estimation[J]. *IEEE Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(4): 563–570.
- [7] Zhou X, Yu J. Advanced coherent modulation formats and algorithms: Higher-order multi-level coding for high-capacity system based on 100 Gbps channel[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. California: OSA, 2010: OMJ3.
- [8] Essiambre R J, Kramer G, Winzer P J, et al. Capacity limits of optical fiber networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 662–701.
- [9] Tkach R W. Scaling optical communications for the next decade and beyond[J]. *Bell Labs Technical Journal*, 2010, 14(4): 3–9.
- [10] Essiambre R J, Tkach R W. Capacity trends and limits of optical communication networks[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(5): 1035–1055.
- [11] Yan L S, Liu X, Shieh W. Toward the Shannon limit of spectral efficiency[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(2): 325–330.
- [12] Ip E, Ji P, Mateo E, et al. 100 G and beyond transmission technologies for evolving optical networks and relevant physical-layer issues [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(5): 1065–1078.
- [13] 韩佳巍. 大容量模分复用光传输系统的若干关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
Han Jiawei. Research of the key technologies for large-capacity mode-division multiplexed optical transmission systems[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.
- [14] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E. Space-division multiplexing in optical fibers[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(5): 354–362.
- [15] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345–348.
- [16] Li G F, Bai N, Zhao N B, et al. Space-division multiplexing: the next frontier in optical communication[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2014, 6(4): 413–487.
- [17] Pepeljugin P, Hackert M J, Abbott J S, et al. Development of system specification for laser-optimized 50 μm multimode fiber for multigigabit short-wavelength LANs[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(5): 1256.
- [18] 姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调[J]. *物理学报*, 2013, 62(14): 144215.
Yao Shuchang, Fu Songnian, Zhang Minming, et al. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*. 2013, 62(14): 144215.
- [19] Hu T, Li J, Zhu P, et al. Experimental demonstration of passive optical network based on mode-division-multiplexing[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles, CA: IEEE, 2015: Th2A.63.
- [20] Sleiffer V, Leoni P, Jung Y, et al. 20 \times 960 Gb/s Space-division-multiplexed 32QAM transmission over 60 km few-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 749–755.
- [21] Li J H, Hu G J, Yan L, et al. De-multiplexing based on complex ICA for mode group diversity multiplexing system[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2015, 47(2): 217–224.
- [22] Ho K P, Kahn J M. *Optical fiber telecommunications*[M], 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 492–568.
- [23] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6 \times 56 Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33 km few-mode fiber enabled by 6 \times 6 MIMO equalization[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16697–16707.
- [24] Bai N, Ip E, Huang Y K, et al. Mode-division multiplexed transmission with inline few-mode fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 2668–2680.
- [25] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing Over 96 km of few-mode fiber using coherent 6 \times 6 MIMO processing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(4): 521–531.
- [26] Bai N, Li G F. Adaptive frequency-domain equalization for mode-division multiplexed transmission[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(21): 1918–1921.
- [27] Arik S Ö, Askarov D, Kahn J M. Adaptive frequency-domain equalization in mode-division multiplexing systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(10): 1841–1852.
- [28] Zhao L, Hu G J, Yan L, et al. Mode demultiplexing based on frequency-domain independent component analysis[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(2): 185–188.
- [29] 胡贵军, 王艳萍, 闫李, 等. 差分群时延条件下基于恒模算法的模式解复用技术[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2015 (3): 961–965.
Hu Guijun, Wang Yanping, Yan Li, et al. Mode demultiplexing based on CMA under the condition of differential group delay[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2015 (3): 961–965.
- [30] Chang Y X, Hu G J, Yan L, et al. Mode demultiplexing based on multimodulus blind equalization algorithm[J]. *Optics Communications*, 2014, 324(1): 311–317.
- [31] Wang B R, Hu G J. Demultiplexing based on frequency-domain multimodulus blind equalization for mode division multiplexing system[J]. *Optical and Quantum Electronics*. (accepted)
- [32] Koebele C, Salsi M, Milord L, et al. 40 km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100 Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]//*European Conference and Exposition on Optical Communications*. Geneva, Switzerland: OSA, 2011: Th.13.C.3.
- [33] Winzer P J, Ryf R, Randel S. *Optical Fiber Telecommunications*[M], 6th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013: 433–490.
- [34] Haykin S. *Adaptive filter theory*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [35] Faruk M S, Kikuchi K. Adaptive frequency-domain equalization in digital coherent optical receivers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12789–12798.
- [36] Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. 独立成分分析[M]. 周宗潭, 董国华, 徐昕, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2007.
Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. *Independent component analysis*[M]. Zhou Zongtan, Dong Guohua, Xu Xin, et al, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [37] Fontaine N K, Ryf R, Chen H S, et al. 30 \times 30 MIMO transmission over 15 Spatial Modes[C]//*Optical Fiber Communication Conference*. Los Angeles, California: OSA, 2015: Th5C.1.
- [38] Ferreira F M, Fonseca D, Silva H J A. Design of few-mode fiber with M-modes and low differential mode delay[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(3): 353–360.
- [39] Kuschnerov M, Chouayakh M, Piyawanno K, et al. Data-aided versus blind single-carrier coherent receivers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2010, 2(3): 387–403.
- [40] Wakayama Yuta, Okamoto Atsushi, Kawabata Kento, et al. Mode demultiplexer using angularly multiplexed volume holograms[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12920–33.
- [41] Von Hoyningen-Huene J, Ryf R, Winzer P. LCoS-based mode shaper for few-mode fiber[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18097–18110.

- [42] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Demonstration of mode-division multiplexing transmission over 10 km two-mode fiber with mode coupler[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California: OSA, 2011: 1-3.
- [43] Chang S H, Chung H S, Ryf R, et al. Mode- and wavelength-division multiplexed transmission using all-fiber mode multiplexer based on mode selective couplers[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7164-7172.
- [44] Hanzawa N, Saitoh K, Sakamoto T, et al. Two-mode PLC-based mode multi/demultiplexer for mode and wavelength division multiplexed transmission[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 25752-25760.
- [45] Sleiffer V, 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): 428-438.
- [46] Ip E, Li M J, Bennett K, et al. 146λ×6×19 Gbaud wavelength- and mode-division multiplexed transmission over 10×50-km spans of few-mode fiber with a gain-equalized few-mode EDFA[J]. Journal of Light-wave Technology, 2014, 32(4): 790-797.
- [47] Koji I, Daiki S, Takehiro T, et al. Performance evaluation of selective mode conversion based on phase plates for a 10-mode fiber[J]. Optics Express, 2014, 22(17): 20881-20893.
- [48] Genevaux P, Simonneau C, Labroille G, et al. 6-mode spatial multiplexer with low loss and high selectivity for transmission over few mode fiber[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, California: OSA, 2015: W1A. 5.
- [49] Igarashi K, Souma D, Wakayama Y, et al. 114 space-division-multiplexed transmission over 9.8 km weakly-coupled-6-mode uncoupled-19-core fibers[C]//Optical Fiber Communication Conference. California: OSA, 2015: Th5C. 4.
- [50] Ryf R, Fontaine N K, Montoliu M, et al. Photonic-lantern-based mode multiplexers for few-mode-fiber transmission[C]//Optical Fiber Communications Conference and Exhibition. San Francisco, California: IEEE, 2014: 1-3.
- [51] Leon-Saval S G, Fontaine N K, Salazar-Gil J R, et al. Mode-selective photonic lanterns for space division multiplexing[J]. Optics Express, 2014, 22(1): 1036-1044.
- [52] Yan L, Hu G J, Xiao J, et al. Characteristic analysis of two-mode fiber Bragg grating[J]. Applied Physics B, 2014, 117(4): 1221-1228.
- [53] Hu G J, Han Y Y, Xiao J, et al. Experimental demonstration of LP₁₁ mode filtering based on two-mode fiber Bragg grating[J]. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47(7): 1973-1982.
- [54] 胡贵军, 常玉鑫, 韩悦羽, 等. 基于少模光纤布拉格光栅的模式复用系统实验研究[J]. 电子学报, (已接收).
Hu Guijun, Chang Yuxin, Han Yueyu, et al. Experimental research of mode division multiplexing system based on few-mode FBG[J]. Acta Electronica Sinica, (accepted).
- [55] Han Y Y, Hu G J. A novel MUX/DEMUX based on few-mode FBG for mode division multiplexing system[J]. Optics Communications, 2016, 367: 161-166.

Research progress of mode division multiplexing communication technology

HU Guijun, YAN Li, CHANG Yuxin, HAN Yueyu

College of Communication Engineerings, Jilin University, Changchun 130012, China

Abstract Mode division multiplexing (MDM) is becoming a hot topic in the field of optical fiber communication. It can increase the capacity of optical fiber communication exponentially by using the limited and orthogonal spatial modes of few-mode fiber to transmit information in parallel. In this paper, we present a thorough review of recent progress in MDM in terms of system modeling, equalization, and development of system experiment. Firstly, we give a detailed description of the equalization method used for demultiplexing and analyze its computational complexity. Then, we summarize some recent experimental demonstrations of MDM, including the particular structure of the system and main results. Finally, we give some possible research directions for MDM.

Keywords fiber communication; mode division multiplexing; few-mode fiber; multiplexer/demultiplexer

(编辑 王志敏)