

引用本文: 刘丰年, 翁艳彬, 刘志, 等. 基于模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统研究[J]. 光通信技术, 2022, 46(5): 64-69.

基于模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统研究

刘丰年¹, 翁艳彬^{1*}, 刘志², 刘春梅³, 果鑫¹, 黄鑫¹, 张威¹

(1. 湖南工业大学 计算机学院, 湖南 株洲 412007; 2. 湖南工业大学
研究生院, 湖南 株洲 412007; 3. 湖南汽车工程职业学院 机电工程学院, 湖南 株洲 412001)

摘要: 光纤中线性偏振模式的选择是影响模分复用系统传输质量的关键因素。为此首先设计了基于模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统; 其次, 基于光纤中线性偏振模式理论, 利用 Optisystem15.0 软件仿真研究 LP₀₁、LP₁₁、LP₀₂、LP₁₂、LP₂₁ 5 个模式在该光纤传输系统中的传输特性; 然后, 将 LP₀₁、LP₁₁、LP₀₂、LP₁₂ 四模式复用, 仿真得到了折射率渐变多模光纤纤芯半径在 19~25 μm 范围内变化时, 各通道 Q 因子均在 7 以上的纤芯半径最优值为 21~22 μm, 且此最优值不随传输距离而变化; 最后, 在八通道混合复用系统中采用直接检测方式实现了误码率在 10⁻⁹ 以下的 2.0 km 短距离传输。

关键词: 模分复用; 波分复用; 线性偏振模式; Q 因子与误码率; 多模光纤; 直接检测

中图分类号: TN913.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)05-0064-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on direct detection fiber transmission system based on hybrid multiplexing of mode division and wavelength division

LIU Fengnian¹, WENG Yanbin^{1*}, LIU Zhi², LIU Chunmei³, GUO Xin¹, HUANG Xin¹, ZHANG Wei¹

(1. School of Computer and Communications, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. The Graduate School, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 3. College of Mechanical and
Electrical Engineering, Hunan Automobile Engineering Vocational College, Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: The choice of linear polarization mode in optical fiber is a key factor affecting transmission quality of mode division multiplexing system. Firstly, a direct detection optical fiber transmission system based on hybrid multiplexing of mode division and wavelength division is designed. Secondly, based on the theory of linear polarization mode in fiber, the transmission characteristics of LP₀₁, LP₁₁, LP₀₂, LP₁₂ and LP₂₁ five modes in the optical fiber transmission system are simulated by Optisystem15.0 software. Then, four modes of LP₀₁, LP₁₁, LP₀₂ and LP₁₂ are multiplexed, and the simulation results show that when the core radius of graded-index multimode fiber changes in the range of 19~25 μm, the optimal core radius for each channel with Q factor above seven is 21~22 μm, and the optimal value does not change with the transmission distance. Finally, in the eight-channel hybrid multiplexing system, the direct detection method is used to realize the short distance transmission with bit error rate below 10⁻⁹ at 2.0 km.

Key words: mode division multiplexing, wavelength division multiplexing, linear polarization mode, Q factor and bit error rate, multimode fiber, direct detection.

收稿日期: 2021-12-13.

基金项目: 湖南自然科学基金项目(省市联合)(No. 2021JJ50049)资助;
湖南省教育厅科学研究一般项目(No. 21C0405、20C0589、19C0578)资助;
湖南省学位与研究生教育教学改革研究项目(No. 2020JGZD055)资助。

作者简介: 刘丰年(1974—), 女, 博士, 教授, 湖南工业大学计算机学院通信工程专业教师, 主要从事光纤激光技术、激光脉冲放大、光信号传输及光纤传感领域的研究工作, 主持省部级以上项目 3 项, 其它项目多项。

*** 通信作者:** 翁艳彬(1974—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为光信息处理及数据挖掘。



0 引言

基于多模或少模光纤的模分复用(MDM)技术能够在相同波长的不同传输模式上承载多个信道信息, 有效突破单模光纤传输容量的瓶颈, 从而满足日益增长的通信容量需求。因此, MDM 技术成为近年来光纤通信领域研究的热点之一^[1-3]。在长途干线传输中, MDM 系统常需采用复杂的数字信号处理(DSP)技术和相干检测方式来解决所面临的模式串扰和群时延问题, 致使系统趋于复杂化^[4-9], 所以常将 MDM 系统应

用于短距离的数据交换中心及大容量客户端等场合,再配合采用大模场面积光纤(纤芯直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 左右)为传输介质^[10-14],信号端进行二进制幅移键控(OOK)调制和直接强度检测,可实现高质量的信号传输。已报道的关于短程MDM传输系统的研究多为其在光纤线性偏振模式(LP_{mn} , m 及 n 分别为方位角模数和径向模数)的几个低阶模式(LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 和 LP_{21})进行复用^[12,15-18],对不同模式组合进行复用传输的信号质量研究较少,且没有涉及光纤芯径对传输质量的影响问题。为解决以上问题,本文在单波长四模式模分复用系统的基础上设计模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统(下文简称混合复用光纤传输系统)。

1 弱导光纤中的线性偏振模式理论

当光纤的纤芯和包层折射率之比接近于1时,光纤称之为弱导光纤。光线在弱导光纤中传播时与轴线的夹角较小,且横向分量占优势而纵向分量较小,因此可将光纤的电磁场波动方程严格求解出的矢量解进行近似,称为标量近似或者弱导近似。经近似处理后,弱导光纤中的传输矢量模式近似为线性偏振模式,简称 LP_{mn} 模式。 LP_{mn} 模可看成是 $\text{HE}_{m+1,n}$ 模和 $\text{EH}_{m-1,n}$ 模的叠加。所有 LP_{mn} 对应的模数 m 和 n 如果满足

$$q=m+2n+1 \quad (1)$$

其中, q 为光纤中的主模数^[10]。则具有相同 q 值的 LP_{mn} 模具有相近的相位传播常数和群时延。 q 值所包含的 LP_{mn} 如表1^[10]所示。

本文将表1中具有相同 q 值的 LP_{mn} 看成同一模式群,利用模式群作为承载信息的单一通道单位。文献[10]中,每模式群承载10 Gb/s的速率,实现了5 km传输距离的高质量传输。但该设计在模式群复用与解复用过程中采用空间结构,致使结构不紧凑,且与现存的光纤通信系统兼容性差。文献[14]和文献[17]采用拉锥光纤耦合器,系统结构紧凑,与现行光纤通信系

统能够很好兼容,但该系统选择的4个模式中 LP_{02} 模式与 LP_{21} 模式因相近的传播常数导致模式串扰严重,在复用和解复用时需对耦合器排列顺序进行调配。为了避免同一模式群的模式之间串扰严重,本文设计混合复用光纤传输系统时,在 q 值为3~6的模式群中选择4个模式(LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 和 LP_{12})用于信道复用和解复用。

2 系统工作原理与设计

2.1 单波长四模式模分复用系统原理

单波长四模式模分复用系统原理图如图1所示。在发送端选择一台193.1 THz(发射波长为1552.52 nm)的连续激光器,通过1×4功率分束器分束,再进行开关键控(OOK)调制,每路独立调制速率为10 Gb/s。调制后得到4路单模光信号输出,通过模式转换器(MMG)分别转换成4个空间LP模式(LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 和 LP_{12})。利用波/模复用器将4个模式复用,并耦合进纤芯直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的折射率渐变多模光纤(GI-MMF)传输,再经波/模解复用器对模式解复用,通过空间光接收机(Rx)接收信号后利用直接检测方式恢复信号,并测试误码率和眼图。

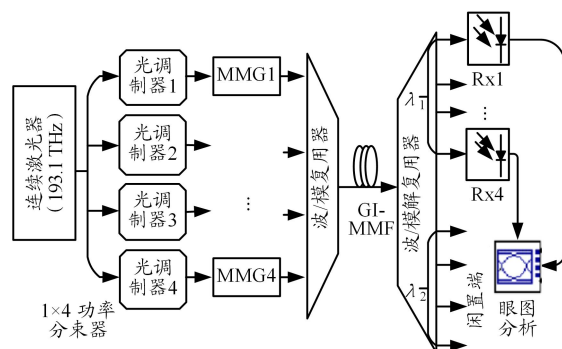


图1 单波长四模式模分复用系统原理图

2.2 双波长四模式八通道混合复用光纤传输系统原理

双波长四模式(LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 和 LP_{12})八通道的混合复用光纤传输系统原理图如图2所示,因所采用的模式解复用器能对不同波长和不同模式进行解复用,所以可以顺利还原每个信道的信息。仿真实验中在发送端选择一个193.4 THz(发射波长为1550.12 nm)的连续激光器,在1550.12 nm波长上分4路调制后进行模式转换,转换为4个空间LP模式(LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 和 LP_{12})。波/模复用器采用8个端口,8个LP模式耦合进GI-MMF中传输;在波/模解复用器输出端,8个LP模式按波长解复用分2组,上部4个端口为193.1 THz的4个模式,下部4个端口为193.4 THz的4个模式;

表1 LP_{mn} 的 q 值及光斑图

q 值	包含的 LP_{mn} 模式
3	LP_{01}
4	LP_{11a} , LP_{11b}
5	LP_{02} , LP_{21a} , LP_{21b}
6	LP_{12a} , LP_{12b} , LP_{31a} , LP_{31b}
7	LP_{03} , LP_{22a} , LP_{22b} , LP_{41a} , LP_{41b}
8	LP_{13a} , LP_{13b} , LP_{32a} , LP_{32b} , LP_{51a} , LP_{51b}
9	LP_{04} , LP_{23a} , LP_{23b} , LP_{42a} , LP_{42b} , LP_{61a} , LP_{61b}
10	LP_{14a} , LP_{14b} , LP_{33a} , LP_{33b} , LP_{52a} , LP_{52b} , LP_{71a} , LP_{71b}

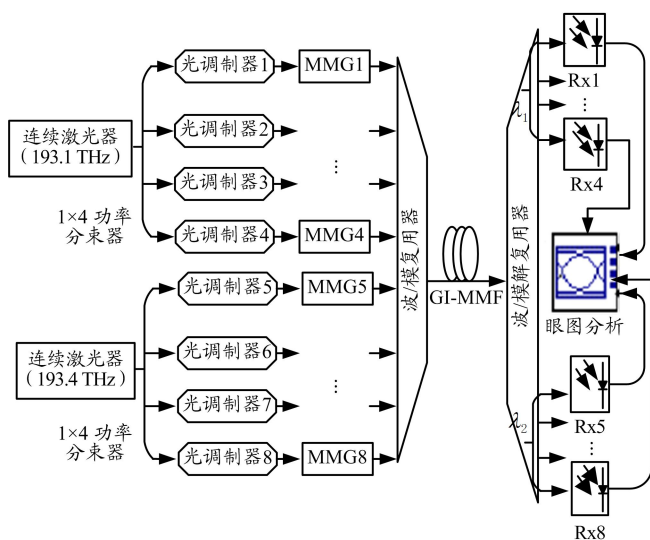


图2 双波长四模式八通道的混合复用光纤传输系统原理图

通过光谱仪监测光谱,同时采用直接检测后测量误码率和眼图。

3 仿真和结果分析

本文采用 Optisystem15.0 软件搭建了图 1 和图 2 所示的系统图,仿真中主要包含器件有:连续激光光源、光外调制器、MMG、波/模复用器、GI-MMF、波/模解复用器、Rx 以及眼图分析仪等,各器件仿真参数设置如下:

①2 个连续激光器的波长分别为 1552.52 nm (193.1 THz)和 1550.12 nm(193.4 THz),输入功率均为 0 dBm,激光束线宽均为 10 MHz;

②光外调制器的消光比为 30 dB;

③MMG 的光纤 LP 参数中,折射率呈抛物线分布,纤芯半径为 25 μm ;

④波/模复用器的输入端数量为 4 或 8;

⑤GI-MMF 的长度为 1~2.5 km,波长为 1552 nm,纤芯半径为 25 μm ;

⑥波/模解复用器的 2 种波长分别为 1552.52 nm (193.1 THz)、1550.12 nm (193.4 THz),空间模式数为 4,带宽为 10 GHz;

⑦Rx 的中心频率为 1552.52 nm(193.1 THz);

⑧系统调制速率为 5~15 Gb/s,编码类型为非归零(NRZ)编码,模式类型为 LP_{mm} 。

3.1 2 组模式复用结果比较

基于图 1 所示的系统原理图,本文用 LP_{21} 模式代替 LP_{12} 模式,共选择 2 组模式(LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 、 LP_{12} , LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 、 LP_{21}) 仿真研究各模式解复用后的传输

质量,结果如图 3 所示。其中,与 LP_{21} 模式复用时的 LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} 3 个模式通道分别被标识为 LP_{01}' 、 LP_{02}' 和 LP_{11}' 。从图 3 可以看出,对于 3 个模式 LP_{01} 、 LP_{02} 和 LP_{11} ,在调制速率为 10 Gb/s 以内,无论与 LP_{12} 复用还是与 LP_{21} 复用,传输后 Q 因子值都在 6 以上,但是对于 LP_{12} 和 LP_{21} 2 个模式 Q 因子值存在很大区别。当调制速率在 10 Gb/s 以下时, LP_{12} 模式仍能获得 5 以上的 Q 因子值;而对于 LP_{21} 模式,无论在何种调制速率下, Q 因子值都为零,检测不到传输信号。当调制速率高于 10 Gb/s 时,各模式传输后信号 Q 因子值均较低,但 LP_{12} 模式复用后传输的质量仍旧优于 LP_{21} 模式。 LP_{12} 和 LP_{21} 2 个模式在调制速率为 10 Gb/s 时的眼图分别如图 3 中 a、b 所示,从眼图张开角度可看出, LP_{12} 模式通道具有良好的传输质量,而 LP_{21} 模式通道基本检测不到信号。因此,下文的仿真研究选择 LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 、 LP_{12} 这 4 个模式进行。

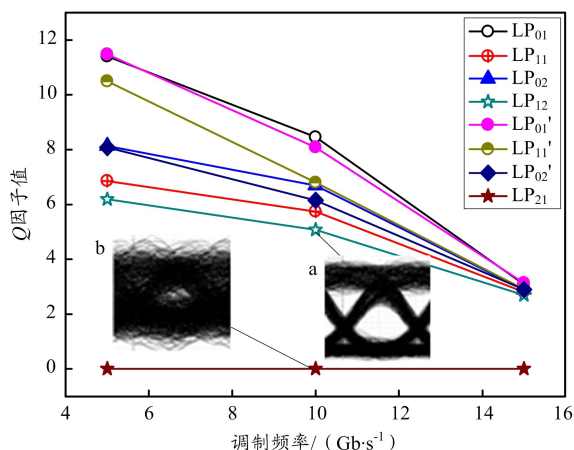


图3 2组模式在MDM系统中传输结果比较

3.2 同一波长的4个模式在2个系统的传输质量分析

为了研究波分复用过程对模分复用的影响,首先将4个模式(LP_{01} 、 LP_{02} 、 LP_{11} 和 LP_{12})分别工作于图1和图2中的系统,并在同一波长(1552.52 nm)下进行研究,结果如图4所示。其中, $\text{LP}_{\text{mm}}-4\text{M}$ 和 $\text{LP}_{\text{mm}}-8\text{M}$ 分别表示各模式在图1、图2所示系统中的 Q 因子值变化曲线。从图4可以看出,同一波长相同模式在2个系统中承载的信号传输后检测出的 Q 因子值无明显差异,说明系统的波分复用结构对模分复用传输结果无影响; LP_{01} 模式传输信号的 Q 因子值最高, LP_{02} 与 LP_{11} 模式的次之, LP_{12} 模式的最低,这与文献[10]报道的结果相吻合;随着调制速率的提高,系统在同样的参数设定下,传输质量在下降,尤其是各通道在调制速率为 15 Gb/s 的情况下, Q 因子值都很低(小于 3),这是

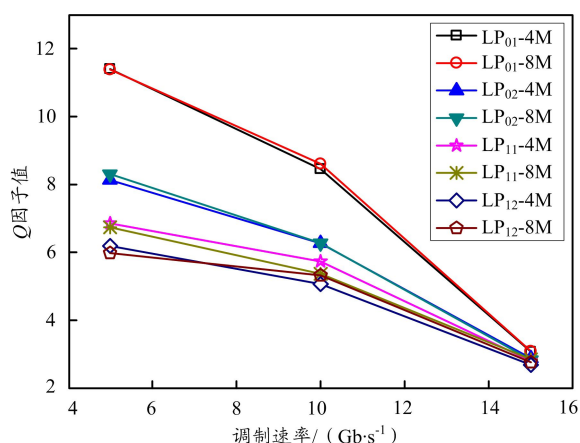


图4 四模式在2个系统的同一波长通道复用传输的传输质量比较

波/模解复用器的带宽(10 GHz)限制导致的。

3.3 双波长八通道传输质量分析

本文基于图2所示系统,在改变调制速率情况下,研究了分别工作于2个波长(1550.12 nm和1552.52 nm)的四模式八通道的传输质量,仿真结果如图5所示。可以看出,LP₀₁模式和LP₀₂模式承载信息后分别在调制速率为10 Gb/s和5 Gb/s处,其1550.12 nm波长的Q因子值略低于1552.52 nm波长。这是因为GI-MMF的工作波长设为1552 nm,1550.12 nm波长偏离了光纤的工作波长,因此Q因子值稍有降低。如果考虑误差允许范围,则可认为没有明显差异(Q因子值最大差异为0.5)。其它模式在2个波长下传输质量没有明显差异。同样,在15 Gb/s的调制速率下,各模式的Q因子值小于3。仿真结果说明在波/模解复用器的带宽范围内所设计的混合复用光纤传输系统具有优良的传输性能。

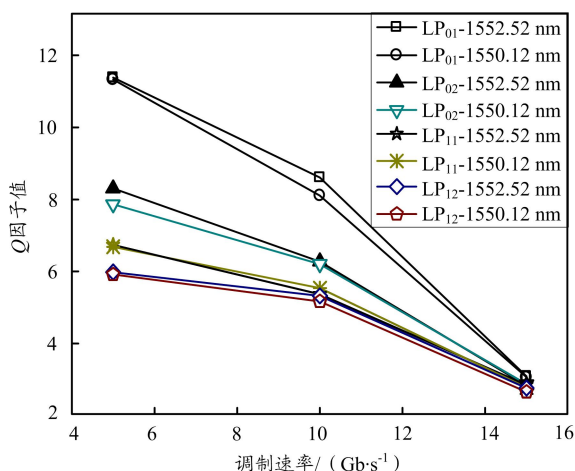
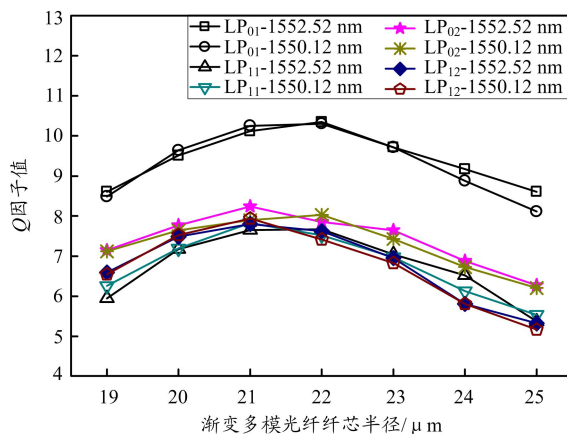


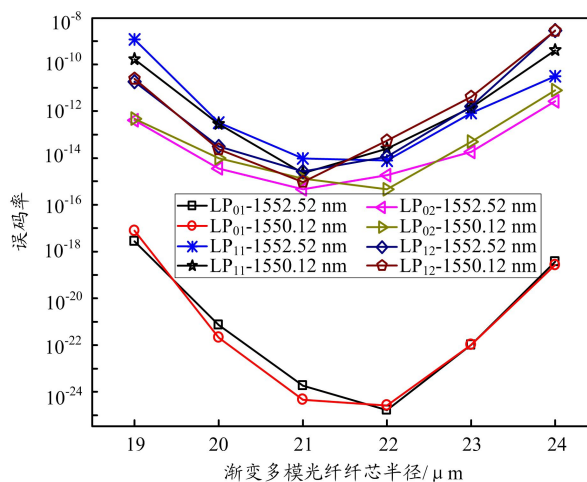
图5 四模式八通道工作在2个波长下的传输质量比较

3.4 光纤纤芯半径的优化

本文基于图2所示系统,设各通道调制速率均为10 Gb/s,为确保各模式在不同芯径的GI-MMF中传输后信号质量Q因子值均为5以上,先将GI-MMF的长度设为1 km,仿真研究了各通道在光纤纤芯半径改变,其它参数不变时的信号传输质量,结果如图6所示。可以看出,当GI-MMF的纤芯半径在21~22 μm范围时,各模式通道传输的Q因子值达到峰值(均在7以上),误码率最低,因此芯径最优化值为21~22 μm。为进一步分析传输距离对芯径优化值的影响,本文在1.5 km、2 km的传输距离下通过软件仿真,也得到了同样的结果。由此可知,在实际的MDM传输系统中,若GI-MMF只改变芯径值而其它参数不变,则常用的4个复用模式(LP₀₁、LP₀₂、LP₁₁和LP₁₂)都存在一个最佳的纤芯半径值,且传输距离的变化不影响最优值。如果能根据最优化值拉制光纤,将最大限度提高信号传输质量。



(a) Q因子与GI-MMF半径的关系



(b) 误码率与GI-MMF半径的关系

图6 图2所示系统的传输质量与MMF半径的关系

3.5 传输距离对传输质量的影响

在基本参数不变的条件下, 设各通道调制速率为 10 Gb/s, GI-MMF 的半径为 22 μm , 研究 4 个模式工作于 1552.52 nm 波长时传输质量与传输距离的关系, 结果如图 7 所示。可以看出, 随着传输距离增大, 误码率升高, 但 LP_{01} 模式通道的误码率一直在 10^{-15} 以下, 其它 3 个模式通道的误码率都高于 LP_{01} 模式通道的误码率。在保证误码率在 10^{-9} 以下时, 图 2 所示系统能够传输 2.0 km, 此距离满足短程大容量数据交换中心需求。仿真实验还测得 2 个波长传输前后的光谱, 如图 8 所示。可以看出, GI-MMF 中产生了布里渊散射, 激

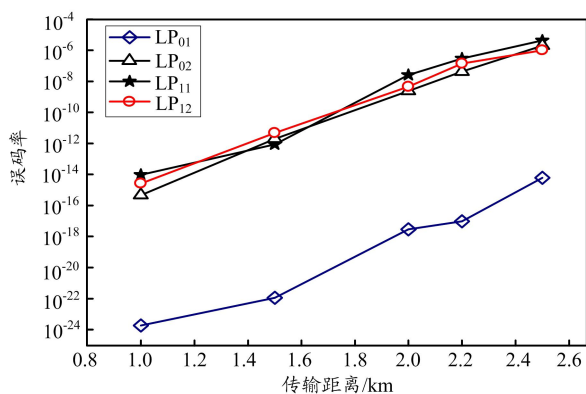
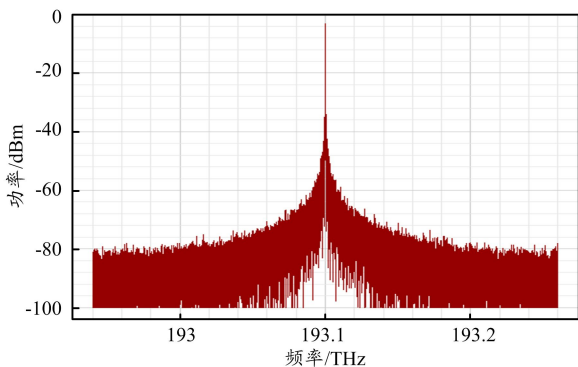
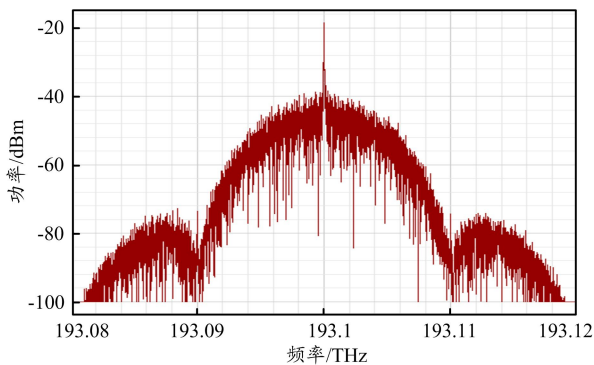


图 7 传输距离对传输质量的影响

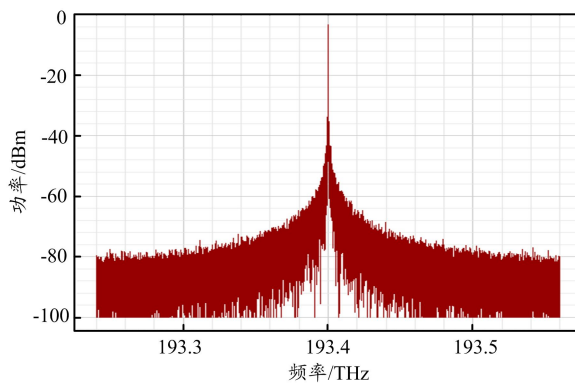


(a) 193.1 THz 传输前的光谱

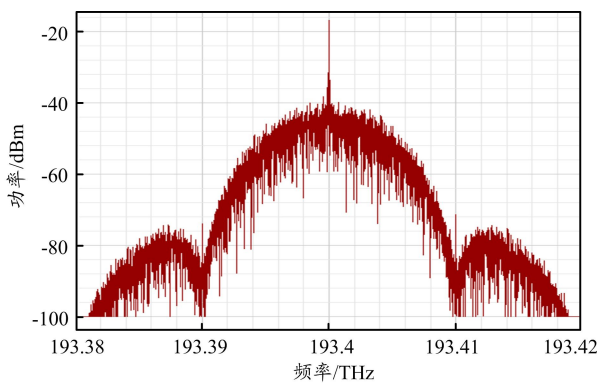


(b) 193.1 THz 传输后的光谱

发的布里渊散射光谱具有对称性, 通过分析光谱得出布里渊散射峰与信号中心波长差约为 ± 0.1 nm, 相应频移约为 ± 12 GHz。



(c) 193.4 THz 传输前的光谱



(d) 193.4 THz 传输后的光谱

图 8 2 个波长传输前后的光谱

4 结束语

本文采用直接检测的方式, 利用半径为 25 μm 的 GI-MMF 设计了基于模分与波分混合复用的直接检测光纤传输系统。基于光纤线性偏振模式理论, 在 Optisystem15.0 软件中仿真比较了 LP_{12} 模式、 LP_{21} 模式分别与 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 3 个模式的复用传输特性, 结果表明, LP_{12} 模式通道在四模式传输时 Q 因子值远高于 LP_{21} 模式通道。另外, 基于 LP_{01} 、 LP_{11} 、 LP_{02} 、 LP_{12} 四模式复用, 仿真研究了 GI-MMF 的光纤纤芯半径对传输质量的影响, 仿真结果表明: 当其它参数不变, 纤芯半径在 19~25 μm 内改变, 保证传输质量 Q 因子值在 7 以上时的光纤纤芯半径最优化值为 21~22 μm , 且这个最优值不受传输距离的影响。最后, 验证了所设计的混合复用光纤传输系统能够实现误码率在 10^{-9} 以下的 2.0 km 短距离传输。本文的研究对于现阶段短程 MDM 系统中复用模式选择、混合复用系统中 GI-MMF 的纤芯半

径优化等方面具有指导价值。另外, 以上仿真研究都是基于波/模解复用器带宽为 10 GHz 展开的, 后续将在波/模解复用器的带宽变化对系统传输质量的影响和芯径最优值的影响因素(如光纤的折射率、损耗系数等)方面进行深入研究。

参考文献:

- [1] RICHARDSON D J, FINI J M, NELSON L E. Space-division multiplexing in optical fibres[J]. Nature photonics, 2013, 7(5): 354–362.
- [2] 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.
- [3] SU Y, HE Y, CHEN H, et al. Perspective on mode-division multiplexing [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(20): 200502-1–200502-9.
- [4] KOEBELE C, SALS I M, MILORD L, et al. 40km transmission of five mode division multiplexed data streams at 100Gb/s with low MIMO-DSP complexity[C]//IEEE. Proceedings of European Conference and Exposition on Optical Communications. Geneva: IEEE, 2011: 1–3.
- [5] 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.
- [6] SIEFFER V, LENONI P, JUNG Y, et al. 20×960-Gb/s Space-division-multiplexed 32QAM transmission over 60 km few-mode fiber [J]. Optics express, 2014, 22(1): 749–755.
- [7] RANDEL S, RYF R, SIERRA A, et al. 6×56Gb/s mode-division multiplexed transmission over 33-km few-mode fiber enabled by 6×6 MIMO equalization[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16697–16707.
- [8] RYF R, FONTAINE N K, CHEN H S, et al. 72-Tb/s transmission over 179-km all-fiber 6-mode span with two cladding pumped in-line amplifiers [C]//IEEE. 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC). Valencia. Spain: IEEE, 2015: 1–3.
- [9] CHEN H S, RYF R, FONTAINE N K, et al. High spectral efficiency mode-multiplexed transmission over 87-km 10-mode fiber [C]//IEEE. Proceedings of 2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Anaheim: IEEE, 2016: 1–3.
- [10] FRANZ B, BÜLOW H. Mode group division multiplexing in graded-index multimode fibers [J]. Bell Labs Technical Journal, 2013, 18(3): 153–172.
- [11] SILLARD P, MOLIN D, BIGOT-ASTRUC M, et al. 50 μm multimode fibers for mode division multiplexing [J]. Journal of lightwave technology, 2016, 34(8): 1672–1677.
- [12] SIMONNEAU C, D'AMATO A, JIAN PU, et al. 4×50 Gb/s transmission over 4.4 km of multimode OM2 fiber with direct detection using mode group multiplexing[C]//IEEE. Proceedings of Optical Fiber Communication Conference. Anaheim: IEEE, 2016: 1–3.
- [13] LENGLIÉ K, INSOU X, JIAN P, et al. 4×10 Gbit/s bidirectional transmission over 2 km of conventional graded-index OM1 multimode fiber using mode group division multiplexing [J]. Optics express, 2016, 24(25): 28594–28605.
- [14] LI J, WU Z, GE D, et al. Weakly-coupled mode division multiplexing over conventional multi-mode fiber with intensity modulation and direct detection[J]. Frontiers of Optoelectronics, 2019, 12(1): 31–40.
- [15] LI J, HU J, ZOU D, et al. Terabit mode division multiplexing discrete multitone signal transmission over OM2 multimode fiber [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2020, 26(4): 1–8.
- [16] REN F, LI J H, WU Z Y, et al. Three-mode mode-division-multiplexing passive optical network over 12-km low mode-crosstalk FMF using all-fiber mode MUX/DEMUX[J]. Optics Communications, 2017, 383: 525–530.
- [17] GASULLA I, KAHN J M. Performance of direct-detection mode-group-division multiplexing using fused fiber couplers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(9): 1748–1760.
- [18] GRÜNER-NIELSEN L, MATHEW N M, Nymann M H, et al. Mode division multiplexing on standard 50/125 μm multi mode fiber using photonic lanterns [C]//IEEE. Proceedings of 2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Francisco: IEEE, 2021: 1–3.