

基于模式分集的星地激光通信技术研究*

陈悦, 胡贵军[✉]

(吉林大學通信工程學院 長春 130012)

摘要: 针对星地激光通信的大气湍流导致信号光损伤这一问题, 实验搭建了一种能够补偿大气湍流的空间激光通信系统, 采用模式分集接收结合最大比合并方法对大气湍流进行补偿, 采用相干探测技术对高阶调制信号进行光电探测。在不同湍流强度下进行了传输实验, 结果表明: 模式分集空间激光通信系统的性能相比较于单模光纤接收系统有较大提升, 随着湍流强度的增加, 性能提升更加显著。在弱、中、强三种湍流强度以及相同目标误码率情况下, 模式分集系统相比单模光纤接收系统分别降低了约 4.2 dB、5.1 dB 和 5.5 dB 的链路损耗。在弱、中、强三种湍流强度以及相同目标中断概率下, 模式分集接收系统相比单模光纤接收系统分别降低了约 3 dB、5.9 dB 和 4.3 dB 的链路损耗。

关键词: 空间光通信; 大气湍流; 少模光纤; 模式分集技术

中图分类号: V443+1 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)04-0001-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211221001

引用格式: 陈悦, 胡贵军. 基于模式分集的星地激光通信技术研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(4): 1-8.

Research on satellite-to-ground laser communication based on mode diversity reception

CHEN Yue, HU Guijun

(College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Aiming at the problem that atmospheric turbulence causes optical signal damage in satellite-to-ground laser communication, we experimentally set up a kind of space laser communication system which can compensate for atmospheric turbulence. The system uses mode diversity reception combined with maximum ratio combining method to compensate for atmospheric turbulence, the coherent detection technique is adopted to detect high-order modulation signals. Transmission experiments are carried out under different turbulence intensities, and the results show that: Compared with a single-mode fiber receiving system, the performance of the mode diversity receiving system has large improvement, with the increase of turbulence intensity, performance improvement is more significant. Under the weak, moderate, and strong turbulence intensities, in the condition of the same target BER, compared with the single-mode fiber receiving system, the mode diversity receiving system reduces the link loss of about 4.2 dB, 5.1 dB, and 5.5 dB, respectively. Under the weak, moderate, and strong turbulence intensities, in the same target interruption probability, compared with the single-mode fiber receiving system, the mode diversity receiving system reduces the link loss of about 4.2 dB, 5.1 dB, and 5.5 dB, respectively.

Key words: Space optical communication; Atmospheric turbulence; Few-mode fiber; Mode diversity

DOI: 10.12347/j.ycyk.20211221001

Citation: CHEN Yue, HU Guijun. Research on satellite-to-ground laser communication based on mode diversity reception[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(4): 1-8.

引 言

空间激光通信具有无需频带许可、保密性好、带宽高等优点, 在地面通信、卫星通信、星际通信等领域都有广泛应用^[1]。2020 年 11 月, 日本宇航研发机构成功发射了一颗 JDRS-1 中继卫星^[2], 通过近红

*基金项目: 国家自然科学基金(62075080); 吉林省重点研发计划项目(20190302014GX)

✉通信作者: 胡贵军(hugj@jlu.edu.cn)

收稿日期: 2021-12-21 收修改稿日期: 2022-01-07

外激光束与遥感卫星连接, 从而实现最高速率为 1.8 Gbps 的高速数据传输, 用于光学中继卫星的激光终端直径仅为 14 cm。2019 年 8 月 6 日, 欧洲空间局 (ESA) 发射的 EDRS-C 激光终端入轨^[3], 使用激光与地球观测卫星通信, 通信速率为 1.8 Gbps, 并提供近乎实时的大数据回传地球, 建链次数超过 2.5×10^4 次。ESA 计划将于 2025 年发射 EDRS-D 卫星, 星上将配置 3 套激光终端, 从而实现全球数据中继服务, 链路距离 8×10^4 km, 速率 3.6 Gbps, 波长兼容 1 064 nm 和 1 550 nm。

然而, 由于空间激光通信的传输信道是大气, 所以光信号在自由空间传输过程中, 容易受大气湍流影响而严重劣化通信质量。因此, 如何补偿大气湍流对空间激光通信的不利影响是一项十分重要的工作。

目前存在多种大气湍流补偿技术, 例如孔径平均技术^[4]、空间分集技术^[5]、自适应光学技术^[6]等。孔径平均技术通过在接收端增大接收孔径来抑制大气湍流闪烁效应, 但大孔径接收同时意味着接收机尺寸和重量的增大, 在很多便携性要求高的应用中会受到限制。空间分集技术可以有效克服大气湍流造成的多径衰落现象, 但涉及多束发射和多路接收, 系统较复杂, 成本较高。自适应光学技术通过实时探测、控制、校正光束波前的相位畸变来实现大气湍流补偿, 但在强湍流情况下, 光强闪烁十分强烈, 光束强度很容易超出波前探测器的正常工作范围, 波前校正会产生比较大的误差。

近年来, 出现了一种基于模式分集接收的大气湍流补偿技术, 其基本思想是利用少模光纤^[7]中的模式正交性, 将不同模式作为独立的空间信道, 对经过大气信道传输的空间光进行模式分集接收, 使用相干探测技术对接收的多路光信号进行光电转换, 然后通过最大比合并算法 MRC (Maximum Ratio Combining) 将接收的多路信号恢复成一路信号, 实现对受损信号的接收。

本文实验搭建了模式分集接收系统以及没有湍流抑制能力的单模光纤接收^[8]系统作为对照系统。在不同湍流条件下, 对 4 Gbps 正交相移键控 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 信号进行了传输实验, 测量了系统的平均误码率与中断概率, 对比分析了模式分集接收系统的湍流补偿能力。实验结果表明: 在弱、中、强三种湍流强度以及相同目标误码率情况下, 模式分集接收系统相比较于单模光纤接收系统分别降低了约 4.2 dB、5.1 dB 和 5.5 dB 的链路损耗; 在弱、中、强三种湍流强度以及相同目标中断概率情况下, 模式分集接收系统相比较于单模光纤接收系统分别降低了约 3 dB、5.9 dB 和 4.3 dB 的链路损耗。综合对比平均误码率和中断概率, 在弱、中、强三种湍流强度下, 模式分集接收系统均能实现较大的性能增益。模式分集接收系统对大气湍流表现出明显补偿作用, 有效提升了空间激光通信的接收性能。

1 实验系统

模式分集接收系统由发送端、空间传输链路和接收端三部分构成, 结构框图如图 1 所示。

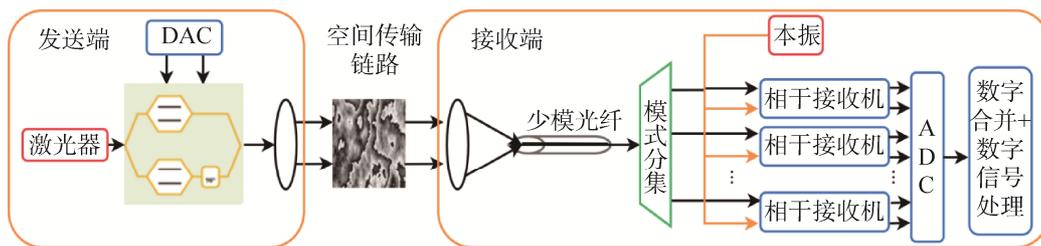


图 1 模式分集接收系统框图

Fig. 1 Block diagram of mode diversity receiving system

在发送端, 电信号通过电光调制器将信息加载到光载波上, 然后通过发射镜发射到自由空间。本文对 QPSK 信号进行了传输实验。激光光源波长为 1 550 nm, 线宽约为 100 kHz, 设定光功率后输入至 I/Q 调制器。传输信号为两路长度为 $2^{11}-1$ 的 PRBS 信号, QPSK 编码后再控制 DAC 开发板转换为模拟电信号。电信号由射频放大器放大后控制 I/Q 调制器产生 4 Gbps 的 QPSK 信号光。调制后的光信号经过偏振控制器后发射到自由空间。

在空间传输链路部分, 大气湍流^[9]会使信道的折射率产生随机波动, 并进一步导致光斑闪烁、光束

漂移、光束扩展、相位抖动等问题。实验中，在光束路径上放置液晶空间光调制器作为湍流模拟器，由电脑终端控制空间光调制器加载特定湍流强度下的相位分布图。利用液晶的双折射效应调制光载波，从而实现相位的调制，用来模拟大气湍流。本文使用相位屏上光斑尺寸 D 和大气相干长度 r_0 的比值，即 D/r_0 ，表征大气湍流对传输光斑的影响。 $D/r_0=0$ 对应无湍流的理想高斯光传输情况， $D/r_0=3,9,16$ 分别对应传输光斑受到弱、中、强大气湍流的影响，不同湍流强度下空间光调制器加载的相位分布示意图如图 2 所示。 D/r_0 越大，光束的空间相干性就越低，光阑内功率减小，焦点分散，相位波动更剧烈。本文在 $D/r_0=3,9,16$ 对应的三种湍流强度下，分别随机生成 100 张湍流相位图来模拟大气信道。

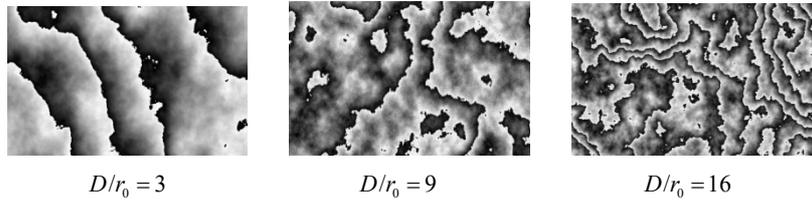
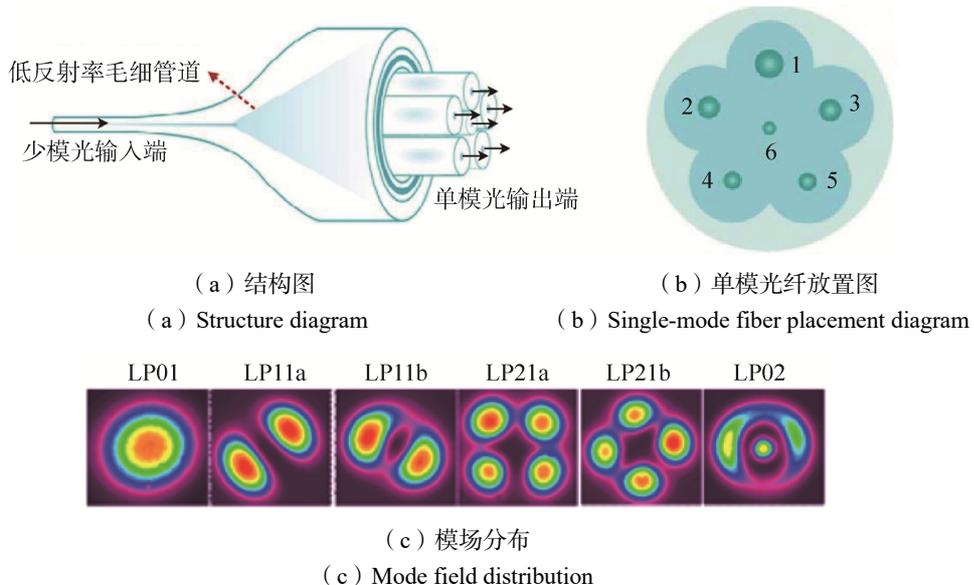


图 2 不同湍流强度下的相位分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phase distribution under different turbulence intensities

在接收端，通过接收镜将空间光耦合进入少模光纤。在耦合过程中，由于光波受到大气湍流的散射和多径效应等因素影响，光能量会分散到少模光纤中的不同模式。不同模式的光都携带相同的信息，同时又彼此正交，可以作为不同的空间信道实现分集接收。

系统中由光子灯笼型模式解复用器实现模式分集功能^[10]，光子灯笼的结构如图 3 所示。光子灯笼的一端为少模光纤，中间为锥形过渡区，通过光纤拉锥技术使其与另一端的 6 根单模光纤相连接，能够实现从一段多模波导到复数单模波导的低损耗传输。6 根单模光纤中的基模在低折射率毛细管中演变成“超模”，演变后的“超模”的光场分布与少模光纤中的高阶模式的光场分布具有一致性，从而实现模式转换。出射端由 6 根包层或纤芯半径不同的单模光纤呈五边形放置，如图 3 (b) 所示，光信号从少模端口入射，从 1 到 6 号端口射出，分别对应少模光纤中 LP01、LP11a、LP11b、LP21a、LP21b 以及 LP02 模转化成成的基模信号光，从而完成对入射少模信号光的模式解复用。



(a) 结构图
(a) Structure diagram

(b) 单模光纤放置图
(b) Single-mode fiber placement diagram

(c) 模场分布
(c) Mode field distribution

图 3 光子灯笼型模式解复用器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of photon lantern mode demultiplexer

从 1 到 6 号端口射出的基模信号光分别接入相干接收机中，采用平衡探测技术^[11]进行光电转换。信号光和本振光在 90° 光混频器中完成混频，混频后的信号通过光电探测器实现光电转换，然后由模数转

换器采样,最后在数字信号处理单元 DSP (Digital Signal Processing) 中完成信号的补偿和合并。模式分集接收系统的 DSP 流程图如图 4 所示。

采集到的电信号首先进行预处理,主要包括归一化和正交不平衡补偿,为后续处理作准备。完成预处理后,分别补偿每路采样数据的信号损伤,然后对所有采样信号进行信号同步后,执行合并运算,最后直接判决得到解调信息。

信号的补偿和恢复^[12]包括时钟同步、频偏补偿和相偏补偿等多个步骤,从而恢复出各个模式的接收信号。本文采用 Gardner 时钟恢复算法、基于环形分圈的四次方频偏补偿及 Viterbi-Viterbi 载波相位恢复算法对实验传输 QPSK 信号进行补偿和恢复。

对多路信道的接收信号完成补偿和恢复处理以及信号同步之后,本文采用最大比合并算法将接收的多路信号恢复成一路信号^[13]。模式分集接收到 6 个模式支路信号,将支路 i 接收的信号表示为 $x_i(t)$,而模式分集合并后的信号 $y(t)$ 表示为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^6 w_i x_i(t) \tag{1}$$

式中, w_i 代表着赋予 i 支路的加权系数。最大比合并算法给不同模式信号赋予不同的权重,以提高合并输出信号的质量。系统在采用最大比合并算法后,第 i 条支路的权重系数 w_i 为:

$$w_i = \frac{a_i}{N_i} e^{j\theta_i} \tag{2}$$

式中, a_i 代表信号的幅值, θ_i 代表信号的相位, N_i 代表信号中噪声的功率谱密度。最大比合并算法中,信噪比较高的支路有着更高的权重系数,信噪比较低的支路权重系数也会低一些,因此能很好地适用于模式分集后各模式支路间信噪比水平分布不均匀的情况。

为了对比分析模式分集接收系统对大气湍流的补偿性能,实验搭建了单模光纤接收的空间激光通信系统,如图 5 所示。

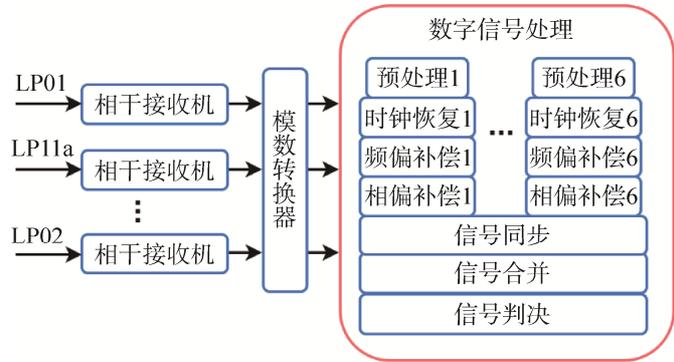


图 4 模式分集接收系统的 DSP 流程图
Fig. 4 Digital signal processing diagram of mode diversity receiving system

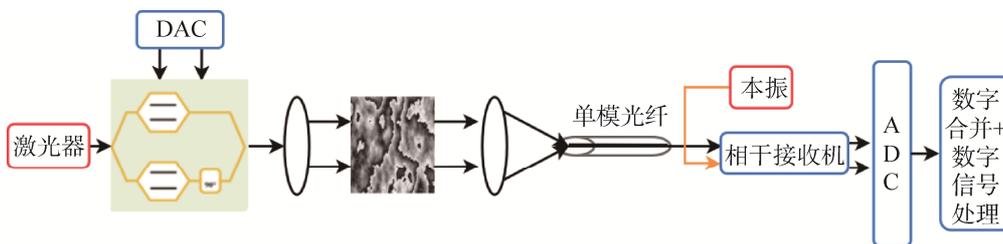


图 5 单模光纤接收系统框图
Fig. 5 Block diagram of single-mode fiber receiving system

2 实验结果及分析

在弱湍流 $D/r_0 = 3$ 情况下的某一典型时刻,分别测试了模式分集接收系统和单模光纤接收系统进行 4 Gbps QPSK 信号传输的实验结果。信号发射功率为 -20 dBm 时,模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图如图 6 所示,图中分别展示了模式分集接收系统 6 个模式支路信号的星座图、MRC 合

并后的星座图，以及单模光纤接收系统的星座图。

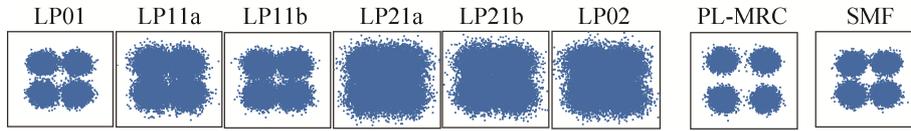


图 6 模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图
 Fig. 6 Receiving constellation of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system

观察图 6 可以发现，在弱湍流强度的这一时刻下，模式分集接收系统的 MRC 合并信号比单模光纤接收系统的接收信号质量更好。模式分集接收系统的 LP01 接收信号与单模光纤接收系统的接收信号性能近似，信号光在不同模式中功率占比各不相同，其中 LP11a、LP11b 中有较多的信号光，总的来讲还是 LP01 中光信号占比最大。当湍流强度较弱时，光束在传输过程中虽然产生了一定的畸变和扩散，但光场分布还能基本维持高斯分布的形态，中心强度较为稳定，信号传输质量尚佳。然而大气湍流导致信号光在传播过程中出现时间和空间上的偏移、发散问题，同时又会使得光信号在耦合入光纤后的能量从基模向其他模式扩散。因此，采用少模光纤接收经大气信道传输的空间光，一部分信号光会耦合进高阶模式。模式分集接收系统对多个模式进行分集接收避免了这部分信号光的损失，从而对大气湍流带来的信号损伤起到了补偿作用。

实验进一步测量了模式分集接收系统的平均误码率和中断概率，并与同样条件下单模光纤接收系统进行比较。

图 7 给出两个系统在弱湍流 $D/r_0 = 3$ 情况下的传输性能曲线。红色线表示模式分集接收系统，蓝色线表示单模光纤接收系统。平均误码率随发射光功率变化的曲线如图 7 (a) 所示，在误码率等于 1×10^{-3} 条件下，模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 4.2 dB 的链路损耗。中断概率随发射功率变化的曲线如图 7 (b) 所示，观察中断概率为 3×10^{-2} 的情况下，模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 3 dB 的链路损耗。

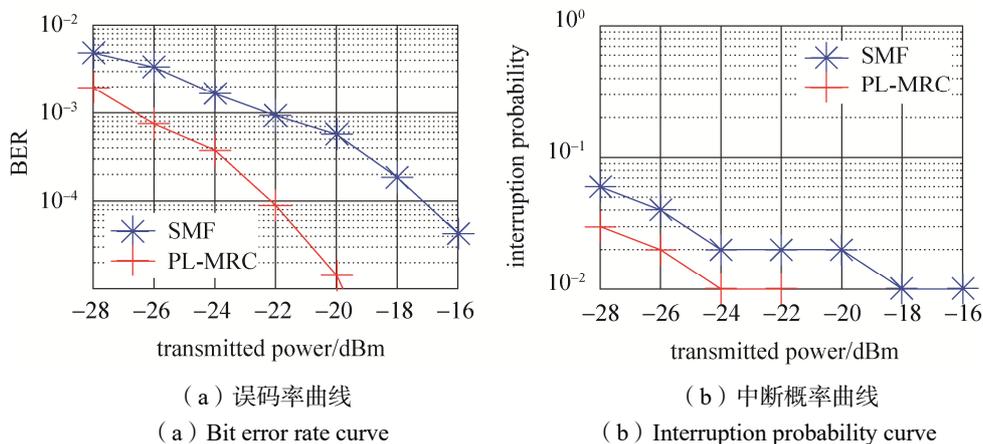


图 7 弱湍流条件下模式分集接收系统和单模光纤接收系统的传输性能曲线
 Fig. 7 Transmission performance curves of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system under weak turbulence conditions

随着发射功率的逐渐减小，模式分集接收系统性能始终优于单模光纤接收系统，对大气湍流有明显的补偿作用，有效提升了空间光通信接收性能。大气湍流的干扰使信号产生了波前畸变，由于存在高阶模式，畸变信号在少模光纤中的耦合效率高于在单模光纤中。耦合效率的提高导致模式分集接收系统具有更好的系统性能。

实验进一步在中等湍流和强湍流情况下对两种系统进行了传输实验。在中等湍流 $D/r_0 = 9$ 情况下的某一典型时刻, 发射功率为 -20 dBm 时, 模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图如图 8 所示。

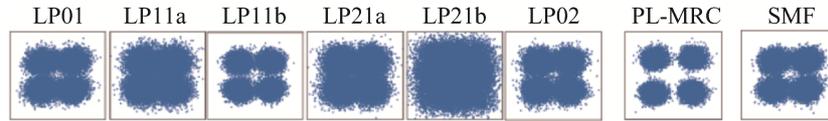
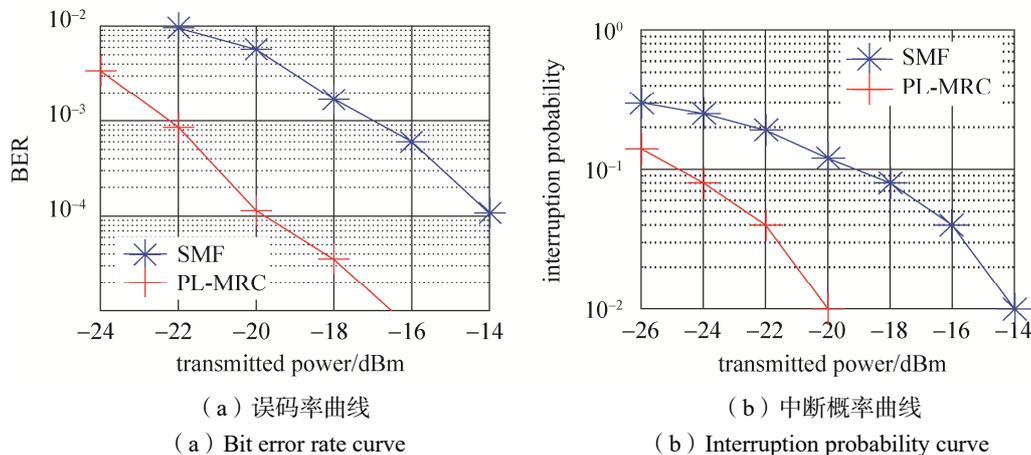


图 8 模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图

Fig. 8 Receiving constellation of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system

观察图 8 可以发现, 在中等湍流强度条件下, 相较于单模光纤接收系统, 模式分集接收系统的 MRC 合并信号质量更好。相较于弱湍流情况, 接收系统的星座图总体上更加发散。湍流强度的增大使光束产生了严重的波前畸变, 包括光束展宽、光束漂移等, 使得在大气湍流作用下, 接收端光斑的中心位置会发生随机变化, 并且接收端光斑几何尺寸也会随湍流波动变大。随着湍流强度的增大, 也会加剧这些因素的影响, 从而导致受大气湍流干扰的信号光更多地耦合进高阶模式中, 且接收光功率总体下降。当湍流强度达到 $D/r_0 = 9$ 时, 如图 8 所示, 信号光主要集中在 LP01、LP11a、LP11b、LP02 中。随着湍流强度的增加, 高阶模式的功率占比总体上逐渐增加, LP01 模光功率减小, 极大影响单模光纤接收系统的传输信号质量。相应地, 模式分集接收系统能够将 LP01、LP11a、LP11b、LP21a、LP21b 以及 LP02 中信号光进行合并接收, 因此得到了显著的性能提升。

图 9 为两个系统在中等湍流 $D/r_0 = 9$ 情况下的传输性能曲线。在误码率等于 1×10^{-3} 条件下, 如图 9 (a) 所示, 模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 5.1 dB 的链路损耗。在观察中断概率为 3×10^{-2} 的情况下, 如图 9 (b) 所示, 模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 5.9 dB 的链路损耗。模式分集接收系统对大气湍流表现出明显补偿作用, 有效提升了接收性能。



(a) 误码率曲线

(a) Bit error rate curve

(b) 中断概率曲线

(b) Interruption probability curve

图 9 中等湍流条件下模式分集接收系统和单模光纤接收系统的传输性能曲线

Fig. 9 Transmission performance curves of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system under moderate turbulence conditions

与弱湍流强度相比, 随着湍流强度的增加, 模式分集接收系统相对于单模光纤接收的性能提升也越来越显著。这是由于在更强的大气湍流环境中, 波前畸变更严重, 导致信号光功率更多地耦合进高阶模态中, 低模态的耦合效率降低。因此, 模式分集接收系统表现出更好的大气湍流补偿效果。

在强湍流 $D/r_0 = 16$ 情况下, 发射功率为 -20 dBm 时, 模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图如图 10 所示。

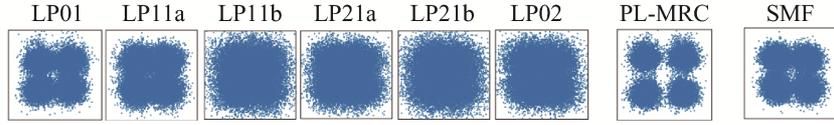


图 10 模式分集接收系统和单模光纤接收系统的接收星座图

Fig. 10 Receiving constellation of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system

观察图 10 可以发现，在强湍流强度的这一时刻下，随着湍流强度的继续增大，相比较于中湍流强度，模式分集接收系统和单模光纤接收系统能接收到的光信号都有所下降。相对于单模光纤接收系统，模式分集接收系统的 MRC 合并信号质量更好，同时，信号光在 LP21a、LP21b 以及 LP02 这些高阶模式中信号光占比变大。随着湍流强度逐渐变强，光场的扩散和畸变现象更加严重，尽管只能接收到微弱的信号光，然而仍可以通过 MRC 算法对接收的多路信号进行合并，实现对大气湍流的补偿。

图 11 给出两个系统在强湍流 $D/r_0 = 16$ 情况下的传输性能曲线。如图 11 (a) 所示，在误码率等于 1×10^{-3} 条件下，模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 5.5dB 的链路损耗。如图 11 (b) 所示，观察中断概率为 3×10^{-2} 的情况下，模式分集接收系统比单模光纤接收系统降低了 4.3 dB 的链路损耗。模式分集接收系统对大气湍流表现出明显补偿作用，有效提升了接收性能。

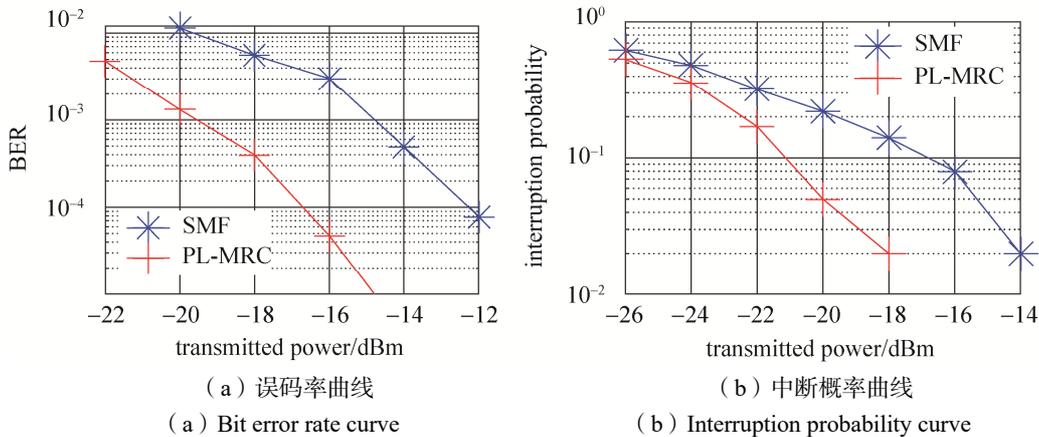


图 11 强湍流条件下模式分集接收系统和单模光纤接收系统的传输性能曲线

Fig. 11 Transmission performance curves of mode diversity receiving system and single-mode fiber receiving system under strong turbulence conditions

在弱、中、强三种湍流强度下，当误码率为 1×10^{-3} 时，模式分集接收系统较单模光纤接收系统降低了约 4.2 dB、5.1 dB 和 5.5 dB 的链路损耗。当中断概率为 3×10^{-2} 时，模式分集接收系统较单模光纤接收系统降低了约 3 dB、5.9 dB 和 4.3 dB 的链路损耗。综合对比平均误码率与中断概率，模式分集接收系统在弱、中、强三种湍流强度下，均能实现较大的性能增益。模式分集接收系统对大气湍流表现出明显补偿作用，有效提升了接收性能。

3 结束语

本文采用模式分集的方法对大气湍流进行补偿，采用最大比合并算法完成对多路信号的高效合并。为了分析模式分集接收系统对大气湍流的补偿效果，搭建了单模光纤接收系统作为对比。实验结果表明，在弱、中、强三种湍流强度下，模式分集接收系统能够有效地补偿大气湍流对空间光通信系统的不利影响。与单模光纤接收系统相比，在相同误码率下，模式分集接收系统分别降低了约 4.2 dB、5.1 dB 和 5.5 dB 的链路损耗。在相同中断概率下，模式分集接收系统较单模光纤接收系统降低了约 3 dB、5.9 dB 和 4.3 dB 的链路损耗。另外，相比较于大孔径接收系统以及多孔径分集接收系统，基于模式分集接收的空间激光通信系统极大地减少了接收设备的体积，降低了复杂度。

参考文献

- [1] 高世杰, 吴佳彬, 刘永凯, 等. 微小卫星激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1171–1181.
GAO Shijie, WU Jiabin, LIU Yongkai, et al. Development status and trend of micro-satellite laser communication systems[J]. Chinese Journal of Optics, 2020, 13(6): 1171–1181.
- [2] JONES Andrew. Japan launches JDRS-1 optical data relay satellite for military, civilian use[EB/OL]. (2020-11-29) [2022-1-6]. <https://spacenews.com/japan-launches-jdrs-1-optical-data-relay-satellite-for-military-civilian-use>.
- [3] 张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 1–13.
ZHANG Ruofan, ZHANG Wenrui, ZHANG Xuejiao, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 1–13.
- [4] NOURI H, UYSAL M. Experimental investigation on the effect of wavelength on aperture averaging in FSO communications[J]. Optics Letters, 2020, 45(11): 3063–3066.
- [5] ELSAYED E E, YOUSIF B B. Performance enhancement of hybrid diversity for M-ary modified pulse-position modulation and spatial modulation of MIMO-FSO systems under the atmospheric turbulence effects with geometric spreading[J]. Optical and Quantum Electronics, 2020, 52(12): 1–18.
- [6] RUI Daoman, LIU Chao, CHEN Mo, et al. Probability enhancement of fiber coupling efficiency under turbulence with adaptive optics compensation[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60(8): 102343.
- [7] ALIREZA F, WEN He, LIU Huiyuan, et al. Optimizing free space to few-mode fiber coupling efficiency.[J]. Applied optics, 2019, 58(13): D34–D38.
- [8] 田晓, 黄宝玉, 张俊. 利用单透镜结构实现自由空间激光进入单模光纤的耦合研究[J]. 光电子·激光, 2020, 31(4): 362–366.
TIAN Xiao, HUANG Baoyu, ZHANG Jun. Study on high efficiency coupling of free space laser entering single mode fiber using single lens[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(4): 362–366.
- [9] 韩立强, 游雅晖. 大气衰减和大气湍流效应下多输入多输出自由空间光通信的性能[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 223–230.
HAN Liqiang, YOU Yahui. Performance of multiple input multiple output free space optical communication under atmospheric turbulence and atmospheric attenuation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 223–230.
- [10] 谭越心, 陈嘉轲, 吴平, 等. 基于光子灯笼的 6×6 模分复用传输实验[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2020, 33(3): 22–27.
TAN Yuexin, CHEN Jiako, WU Ping, et al. Six-mode mode division multiplexing transmission experiment based on photonic lantern[J]. Journal of Liaocheng University(Natural Science Edition), 2020, 33(3): 22–27.
- [11] 李学良. 大气激光通信数字相干探测关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [12] 周泽隆. 基于数字信号处理的相干光接收机关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [13] 郝晓明, 全薇, 吴平, 等. 基于模式分集的大气湍流补偿技术研究[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2020, 38(3): 250–257.
HAO Xiaoming, QUAN Wei, WU Ping, et al. Simulation of atmospheric turbulence compensation system based on mode division multiplexing[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2020, 38(3): 250–257.

[作者简介]

陈悦 1997年生, 硕士研究生, 主要研究方向为自由空间光通信技术。

胡贵军 1970年生, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为光纤通信技术和器件等。

(本文编辑: 傅杰)