

激光与光电子学进展

基于 MPLC 提高空间光-单模光纤耦合效率技术研究

于溪畅^{1,2}, 高世杰^{1,2*}, 吴佳彬¹, 马烈^{1,2}, 王晞名^{1,2}, 张国强^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在空间激光通信实际应用过程中,受到对准误差的影响,单模光纤耦合效率低,需要对其进行精确校正。在理想条件下,首先分析不存在对准误差及其他影响因素时平面波-单模光纤耦合效率及高斯光-单模光纤耦合效率模型,然后分别研究了光纤横向偏移和纵向偏移两种对准误差对单模光纤耦合效率的影响。在此基础上,提出了一种基于多平面光转换(MPLC)技术提高单模光纤耦合效率的方法,数值仿真了使用MPLC将平面波转化为高斯光前后及校正对准误差前后耦合效率的变化情况。仿真结果表明:使用MPLC将平面波转换为与高斯光高度相似的光束后,耦合效率会比平面波直接耦合进入单模光纤提高18.54%;使用MPLC分别校正横向偏移和纵向偏移后,耦合效率均提升至99%以上。该方法突破了空间光与单模光模式不匹配的限制,可以有效校正对准偏移误差,对于提高空间光到单模光纤的耦合效率具有一定的理论意义。

关键词 光通信; 单模光纤耦合效率; 对准误差; 多平面光转换

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221102

Research on MPLC-Based Technology to Improve the Coupling Efficiency of Spatial Optical-Single-Mode Fibers

Yu Xichang^{1,2}, Gao Shijie^{1,2*}, Wu Jiabin¹, Ma Lie^{1,2}, Wang Ximing^{1,2}, Zhang Guoqiang^{1,2}¹Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In the practical application of space laser communication, an alignment error will affect the coupling efficiency of single-mode fibers, which must be corrected accurately. Under ideal conditions, the plane wave-single-mode fiber coupling efficiency and Gaussian light-single-mode fiber coupling efficiency models with no alignment errors or other influencing factors were first analyzed and compared. The effects of the coupling efficiency of a single-mode fiber with two alignment errors, lateral and longitudinal fiber offsets were studied. A method was proposed to improve the coupling efficiency of single-mode fibers based on MPLC technology. The change in the coupling efficiency before and after converting the plane wave into Gaussian light and correcting the alignment error using multi-plane light conversion (MPLC) was simulated numerically. The simulation results showed that the plane wave was converted to a beam that is similar to Gaussian light by MPLC, and the coupling efficiency was 18.54% higher than the plane wave coupled directly to a single-mode fiber. The coupling efficiency was improved to more than 99% after correcting the transverse and longitudinal offsets by MPLC. This method breaks through the limitation of mismatch between spatial light and single-mode optical mode and can effectively correct the alignment deviation error. The method also has theoretical significance for improving the coupling efficiency of spatial light to single-mode optical fibers.

Key words optical communications; coupling efficiency of single-mode fiber; alignment error; multi-plane light conversion

1 引言

相干探测体制的激光通信系统^[1-2]的探测灵敏度

更高,噪声抑制能力更强,更适合长距离高速通信需求,是未来空间激光通信技术的重点研究和对象。为降低噪声、提高灵敏度而使用的前置光放大器大多

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2022-04-13; 录用日期: 2022-05-20; 网络首发日期: 2022-06-01

通信作者: *13604329504@163.com

针对单模光纤^[3],因此建立稳定的空间激光通信链路需要有高效的空-单模光纤耦合做保障,然而,在实际的空间激光通信链路建立过程中,存在许多误差(如卫星平台随机振动、对准误差等),这些误差不可避免,但会极大地影响耦合的稳定性,需要对其进行有效校正^[4-5]。

国内外目前多使用激光章动技术解决对准误差引起的空-单模光纤耦合效率降低的问题^[6-7],但激光章动技术受平面波模场与单模光纤模场不匹配的固有限制,理论上耦合效率最大值为 81.45%,无法得到进一步提高。2017 年,长春理工大学的范雪冰等^[8]提出了平面光-单模多芯光纤的耦合方案,相较于单模单芯光纤具有更好的环境适应性,但随着对准误差的增大,单模多芯光纤的耦合效率损失也较为严重。

多平面光转换(MPLC)是一种无源器件,主要由反射镜和反射相位板构成的多通腔组成,通过连续的相位变换和光学变换,实现精确的相位控制^[9]。自 2010 年提出后,首先被应用于复用解复用系统的构建,国外研究机构实现了由 3 模式^[10]到多达 1035 模式^[11]的复用。2020 年,Calvo 等^[12]将多 MPLC 技术应用于大气湍流的校正,对基于 Shack-Hartmann 传感器的经典自适应光学系统和基于 MPLC 的无源光纤耦合系统进行了比较实验,研究了使用 MPLC 方法补偿

强湍流的优势。2020 年,Cailabs 实验室的 Billaud 等^[13]对于使用 MPLC 进行星间指向误差的校正展开了相应的研究,验证了 MPLC 应用于小振幅指向误差补偿的可行性,但对于使用 MPLC 校正更大振幅的横向、纵向误差并未给出理论证明及仿真验证。此外,MPLC 技术还被广泛应用于光混频器^[14]、相干光组合^[15]以及量子信息处理^[16]等各个方面。

本文将 MPLC 精确的光束调制能力应用至单模光纤耦合系统中,研究理想条件下单模光纤耦合理论,首先对不存在对准误差及其他影响因素时的平面波-单模光纤耦合及高斯光-单模光纤耦合模型进行对比,然后理论分析横向偏移、纵向偏移等对准偏差对单模光纤耦合效率的影响。基于上述研究结果,本文提出一种基于 MPLC 技术提高单模光纤耦合效率方法,在提高空-单模光纤耦合效率的同时匹配度的同时校正对准误差,并用数值仿真验证了该方案的可行性。

2 理想条件下单模光纤耦合基本理论

2.1 单模光纤耦合理论

在不存在对准误差及其他影响因素条件下,单模光纤耦合系统的简化模型如图 1(a)所示,入射光经接收端接收后,被一个半径为 w_1 、焦距为 f 的衍射限制薄透镜聚焦,在后焦面,即光纤端面处耦合进入单模光纤。

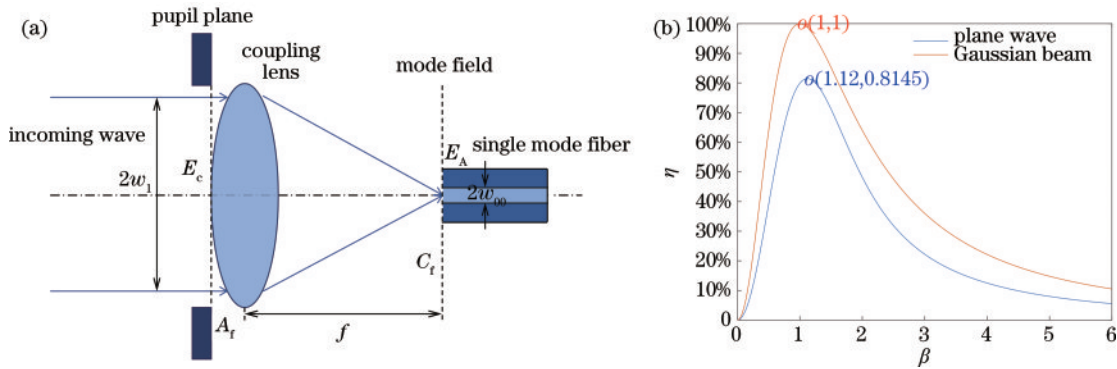


图 1 理想条件下单模光纤耦合。(a) 单模光纤耦合示意图;(b) 单模光纤耦合效率曲线

Fig. 1 Single-mode fiber coupling under ideal conditions. (a) Schematic diagram of single-mode fiber coupling; (b) single-mode fiber coupling efficiency curve

光纤耦合效率定义为耦合进光纤的光功率与后焦面处接收到的光功率的比值^[17],根据巴塞伐尔定理,这个比值可以等效为光瞳面处的积分,即

$$\eta = \frac{\left| \iint C_t^* \cdot E_A dS \right|^2}{\iint |C_t|^2 dS \cdot \iint |E_A|^2 dS} = \frac{\left| \iint E_c^* \cdot A_r dS \right|^2}{\iint |E_c|^2 dS \cdot \iint |A_r|^2 dS}, \quad (1)$$

式中: C_t 是入射光传输至后焦面处的光场分布; E_A 是单模光纤的模场分布; E_c 是入射光的光场分布; A_r 为单模光纤模场反向传输至光瞳面处的光场分布。

不存在对准误差及其他影响因素时,平面波-单模光纤耦合效率 η 可简化为

$$\eta = 2 \frac{[1 - \exp(-\beta^2)]^2}{\beta^2}. \quad (2)$$

高斯光-单模光纤的耦合效率 η 可简化为

$$\eta = \frac{4}{\left(\beta + \frac{1}{\beta}\right)^2}, \quad (3)$$

式中: $\beta = \frac{\pi w_1 w_{00}}{\lambda f}$ 是耦合系数; w_1 是光瞳面半径; w_{00} 是单模光纤模场半径; λ 是入射光波的波长; f 是透镜焦距。

对平面波-单模光纤及高斯光-单模光纤耦合效率曲线进行仿真,结果如图 1(b)所示。

不存在对准误差及其他影响因素时,平面波-单模光纤的耦合效率最大值为 81.45%,此时耦合系数 $\beta=1.12$ 。而高斯光-单模光纤的耦合效率最大值为 1,此时耦合系数 β 也为 1。

以重叠度来反映光场 O_i 与 O'_i 之间的相似程度,表示为

$$\alpha = \left| \iint_{(x,y)} \overline{O_i(x,y)} O'_i(x,y) dS \right| \quad (4)$$

其中,空间光与单模光纤模场之间的重叠度为 89.38%,而高斯光与单模光纤模场之间的重叠度为

1。重叠度越高,模场间相似程度越高,模式匹配程度越高,耦合效率便越高。

2.2 对准误差对单模光纤耦合效率的影响的理论分析

在实际的空间光耦合系统应用过程中,无法避免地会因热效应、装调误差等因素的存在而产生各种对准偏移误差。如图 2 所示,本文主要研究以下两种对准误差:横向偏差和纵向偏差。其中,图 2(a)和(b)是两种横向偏移,经证明可知,这两种情况对耦合效率的影响是等效的^[18]。然而,这些对准偏移误差会对耦合效率产生极大的影响,需要对其进行精确校正^[5]。

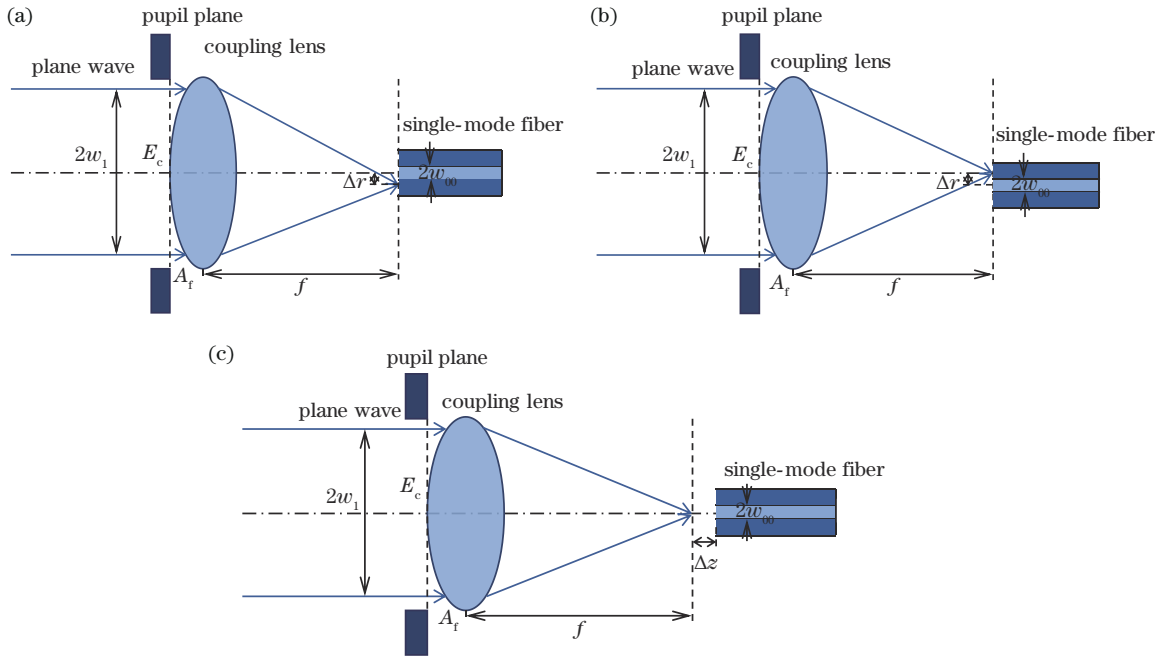


图 2 对准误差示意图。(a)后焦面横向偏移;(b)光纤位置横向偏移;(c)纵向偏移

Fig. 2 Schematic diagram of the alignment errors. (a) Lateral offset of the focal plane; (b) lateral offset of the fiber end; (c) longitudinal offset

当分别存在 Δr 的横向偏移及 Δz 的纵向偏移时,单模光纤反向传输至光瞳面处的模场分布 A_i 及对应的耦合效率 η 如表 1 所示。

其中,

$$w_a = \frac{\lambda f}{\pi w_{00}} \quad (5)$$

分别对耦合效率随横向偏移及纵向偏移变化的曲线进行了数值仿真,结果如图 3 所示。当对准误差为 0 时,耦合效率达到最大值,为 81.43%。耦合效率会随对准误差的增加而呈现减小的趋势。当横向偏移量 $\Delta r=1.4w_{00}$,或纵向偏移量 $|\Delta z|=40w_{00}$ 时,单模光纤耦合效率会降低至 10% 左右,耦合损耗严重,因此需要

表 1 存在对准误差时,单模光纤在光瞳面处的模场分布及对应的耦合效率

Table 1 Mode field distribution and corresponding coupling efficiency of a single-mode fiber at the pupil plane with alignment error

		Alignment error
Lateral offset	A_i	$A_i(r, \Delta r) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda f} \cos \theta r \Delta r\right]$
	η	$\eta_{\Delta r} = \frac{1}{\pi} \left \int_0^1 \sqrt{8\pi} \beta \exp(-\beta^2 \rho^2) J_0\left(2\beta \frac{\Delta r}{\omega_{00}} \rho\right) \rho d\rho \right ^2$
Longitudinal offset	A_i	$A_i(r, \Delta z) = \sqrt{\frac{2}{\pi \omega_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_a^2}\right) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\Delta z r^2}{2f^2}\right)$
	η	$\eta_{\Delta z} = 8\beta^2 \left \int_0^1 \exp(-\beta^2 \rho^2) J_0\left(\beta^2 \rho^2 \frac{j\lambda \Delta z}{\pi \omega_{00}^2}\right) \rho d\rho \right ^2$

校正对准误差来提高耦合效率。

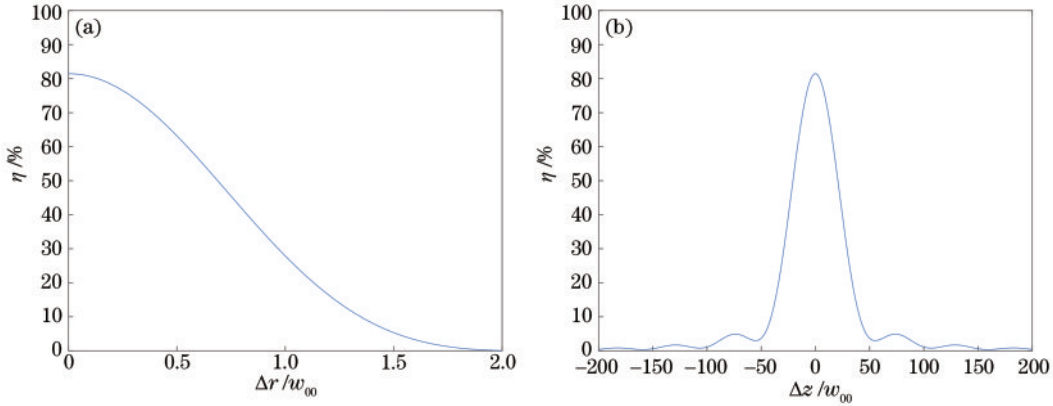


图 3 耦合效率随对准误差变化曲线。(a)耦合效率随横向偏移变化曲线;(b)耦合效率随纵向偏移变化曲线

Fig. 3 Coupling efficiency as a function of alignment error. (a) Coupling efficiency as a function of lateral offset; (b) coupling efficiency as a function of longitudinal offset

3 基于MPLC的单模光纤耦合方案研究

MPLC 器件是一种自由空间型器件,可以通过连续的相位变换和自由空间传输实现任意的幺正变换^[19],以及精确的光束调制,其调制原理如图 4(a)所示。由于投射式结构体积较大,且相位板对准复杂性较高,因此采用如图 4(b)所示的多通腔结构,通过在相位板或空间光调制器上的多次反射来实现光束的调制^[9]。

准直后的入射光首先经过 z_1 距离的自由空间传输至相位板或空间光调制器(SLM)上的第一个相位掩模处,再经 z_0 距离的自由空间传输至下一相位掩模处,以此类推,直到之后一个相位掩模,再经 z_2 距离的自由空间传输,转换为预计的输出。

相位掩模的纯相位调制写作 U_{DM} , 相位掩模间的自由空间传输写作 U_{FT} , 将 $U_{DM} \times U_{FT}$ 定义为一个单元,任意个单元的乘积设为 K , 而所有可能的 K 组成集合 H 。又设 U_{ij} 为所有幺正矩阵的集合 U 的子群, U_{ij} 包含所有可能的 T_{ij} ,

$$T_{ij}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cos(\theta) & \cdots & \sin(\theta) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & 1 & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\sin(\theta) & \cdots & \cos(\theta) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

由 Borevich 等^[20]的研究结果可知,有限个 $U_{DM} \times U_{FT}$ 单元的乘积可以组成任意的 T_{ij} , 因此所有 U_{ij} 都在 H 里,且连续的 $U_{DM} \times U_{FT}$ 单元组合可以组成任意的幺正矩阵,而 H 包含一切连续的 $U_{DM} \times U_{FT}$ 单元组合,因

此可以得出结论: H 就是 U 。

故使用连续相位掩模和自由空间传输的单元组合,就可以实现任意的幺正变换。根据幺正变换的定义,若在坐标变换过程中内积保持不变,则该变换为幺正变换^[21]。平面波表达式为

$$E_m(r) = \frac{1}{\pi w_0^2} \times \begin{cases} 1, & 0 < r < w_0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (7)$$

无对准误差等影响因素时,单模光纤反向传输至光瞳面处的光场分布为

$$A_i(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi w_a^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{w_a^2}\right). \quad (8)$$

计算得到式(7)和式(8)的内积为 1,再分别计算表 1 中单模光纤存在焦平面两种对准误差时,在光瞳面处的模场分布 A_i 的内积,也均为 1,因此从 $E_m(r)$ 到 $A_i(r)$ 、 $E_m(r)$ 到 $A_i(r, \Delta r)$ 、 $E_m(r)$ 到 $A_i(r, \Delta z)$ 的变换均为幺正变换。

而 MPLC 技术就是通过连续的相位掩模和自由空间传输的组合,来实现从光场到光场的转换,即 MPLC 技术可以通过幺正变换来实现光束调制。因此,通过 MPLC 可以将平面波 $E_m(r)$ 分别转换为理想高斯光 $A_i(r)$ 、带有 Δr 的横向偏移的 $A_i(r, \Delta r)$ 及带有 Δz 的纵向偏移的 $A_i(r, \Delta z)$ 。

在设计 MPLC 时,有多种可调参数,如图 4(b)所示,例如相位掩模数量、各个相位掩模的相位分布、输入光到第一个相位掩模的距离 z_1 、相邻相位掩模间距 z_0 以及输出光到最后一个相位掩模的距离 z_2 等,这些参数之间会相互迭代共同影响转换精度。其中, MPLC 的核心是相位屏,相位屏直接决定 MPLC 的模式转换精度,而其余的参数作为相位屏求解时的预设参数,这些参数的优化可以进一步提高 MPLC 的精度。以平面波 E_m 作为输入光,利用波前匹配算法可生成所需的相位屏。波前匹配算法是由 Hashimoto 等^[22]最先提出,其具体原理是根据光路可逆的特性,输入光

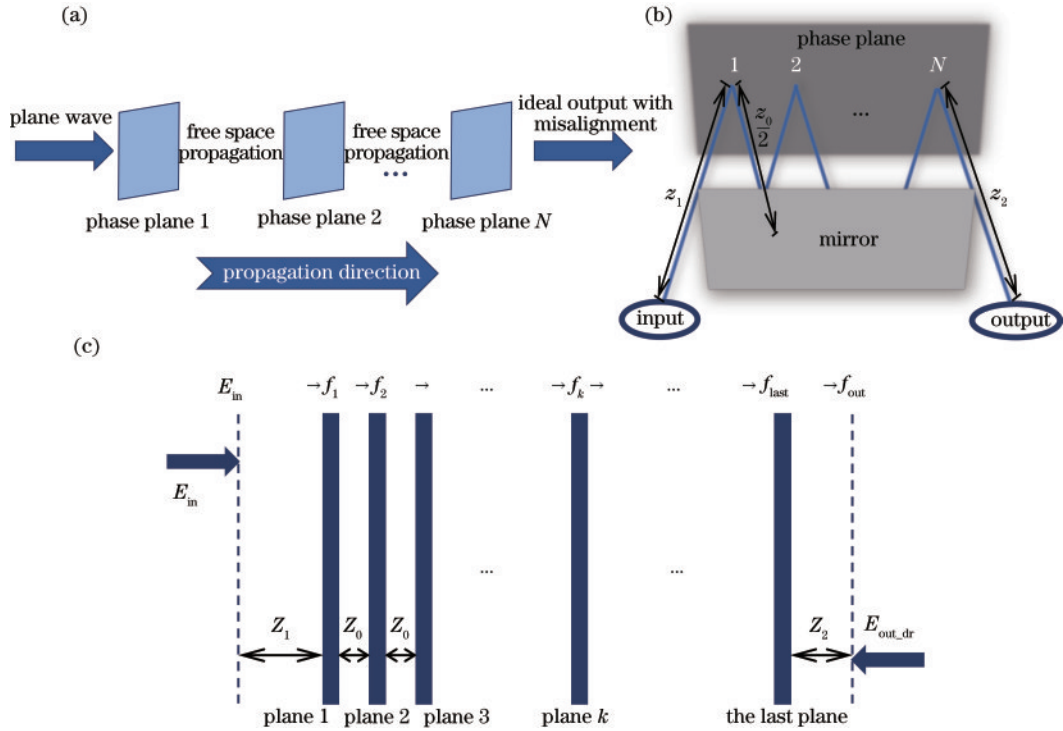


图 4 MPLC 示意图。(a)MPLC 原理图；(b)MPLC 的可调参数；(c)波前匹配算法

Fig. 4 Schematic diagram of MPLC. (a) Principle of MPLC; (b) variable parameters of MPLC; (c) wavefront-matching method

正推至某一处的相位分布应与输出光逆推至该处的相位分布相同,因此从第一个相位掩模开始,分别将输入光正推和输出光逆推至待求相位掩模处,根据正推输入光和逆推输出光的相位差并按照一定的权重分配原则计算每一个相位掩模的相位分布,以此类推,依次计算出各个相位掩模的相位分布,在计算出最后一个相位掩模后,倒转方向,从最后一个相位掩模开始反向计算至第一个相位掩模,反复迭代计算,计算过程示意图如图 4(c)所示。

如图 5 所示,平面光 E_{in} 经望远镜系统接收收缩后,以 w_0 的束腰半径入射进入 MPLC 中,在 MPLC 中经过多次反射,到达光瞳面转换为与带有对准误差的单模光纤反向传输模场 A_f 高度相似的模场 E_c ,以达到提高单模光纤耦合效率的目的。单模光纤耦合方案以 MPLC 技术为核心,单模光纤的耦合效率作为评价标准,使用 MPLC 在提高空间光与单模光纤模场的模式匹配程度的同时校正对准偏移误差,以达到提高单模光纤耦合效率的目的。

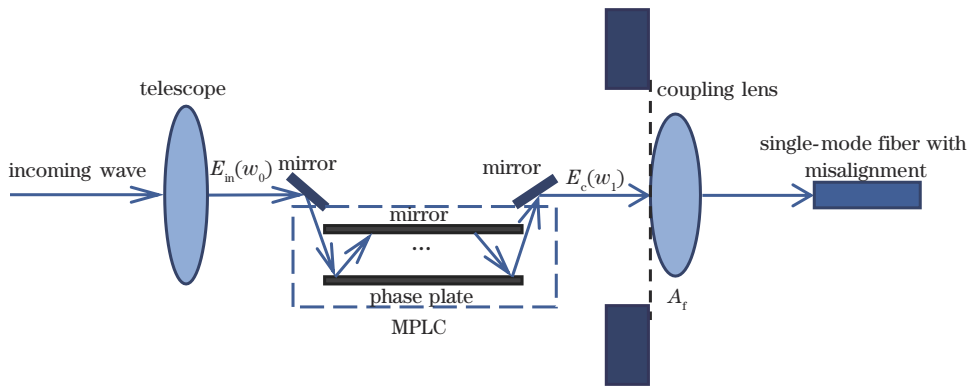


图 5 基于 MPLC 的单模光纤耦合方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of single-mode fiber coupling scheme based on MPLC

4 仿真分析

为了衡量基于 MPLC 的单模光纤耦合方案对耦合效率的提升作用,对使用 MPLC 前后的单模光纤耦合效率进行了仿真。仿真过程中,设定的相关参数如

表 2 所示,光波长 λ 为 1550 nm,输入平面波 E_{in} 的束腰半径 $w_0=1$ mm, MPLC 的理想输出光 A_f 的束腰半径 $w_1=1$ mm,单模光纤的模场半径 $w_{00}=5.2$ μ m。在不使用 MPLC 条件下,平面波直接耦合进入单模光纤时,耦合系数 β 取理论上使平面波-单模光纤耦合效率

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

Parameter	Value	
Wavelength λ / nm	1550	
Waist radius of plane wave w_0 / mm	1	
Waist radius of output beam w_1 / mm	1	
Mode field diameter $2w_{00}$ / μm	10.4	
β	With MPLC	1
	Without MPLC	1.12

最高的值 1.12; 在使用 MPLC 条件下, 将平面波先转换为与带有对准误差的 A_i 高度相似的光束, 再耦合进入单模光纤, 此时耦合系数 β 取理论上使高斯光-单模

光纤耦合效率最高的值 1。

本文以单模光纤的耦合效率作为评价标准, 求解出每次变换所需的 MPLC 的各个可调参数, 再把平面波光 E_m 重新代入至求出的 MPLC 模型中, 计算出经 MPLC 转换后的实际输出 E_c , 以及经 MPLC 校正后的单模光纤耦合效率。

4.1 无对准误差等影响因素时基于 MPLC 将平面波转换为高斯光

不存在对准误差及其他影响因素时, 令平面光在 MPLC 中进行多次反射, 转换为与高斯光高度相似的光束, 光路示意图如图 6 所示。

仿真结果如图 7 所示。

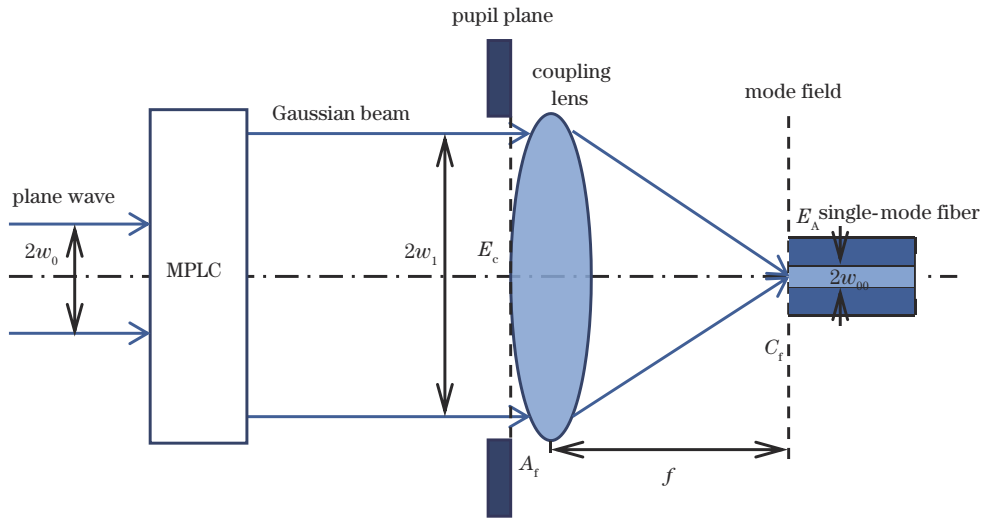


图 6 基于 MPLC 的空间光-单模光纤耦合光路图

Fig. 6 Schematic diagram of spatial optical-single-mode fiber based on MPLC

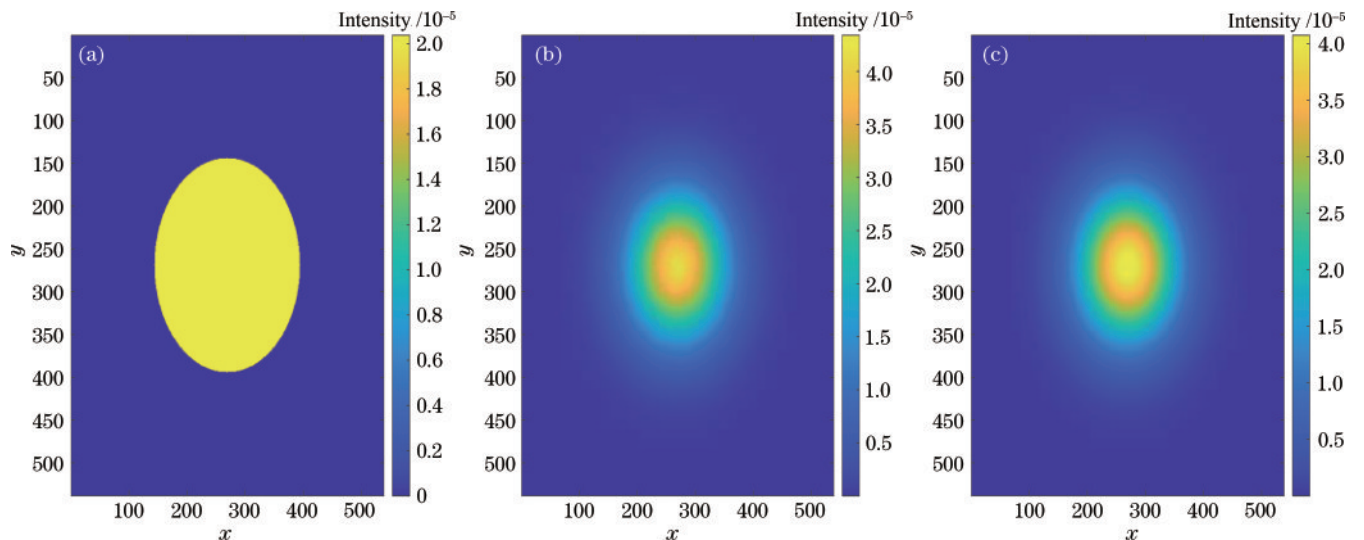


图 7 仿真结果。(a)输入光;(b)实际输出光;(c)理想输出光

Fig. 7 Simulation results. (a) Input light; (b) actual output light; (c) ideal output light

利用式(4)计算得到实际输出光 E_c 与理想输出光 A_i 之间的重叠度 $\alpha=99.99\%$, 实际输出光与理想输出光之间具有极高的相似度。在不使用 MPLC 条件下, 转换系数 $\beta=1.12$ 时, 利用式(1)计算得到平面波直接

耦合进入单模光纤时的耦合效率为 81.45% , 再利用式(4)计算得到此时空间光与 A_i 之间的重叠度 $\alpha=89.38\%$ 。MPLC 对空间光进行光束调制转换为与高斯光高度相似的光束后, 耦合效率提高到 99.98% , 耦

合效率提高了 18.53%。这是由于 MPLC 的输出光 E_c 与单模光纤模场反向传输至光瞳面处的光场分布 A_r 相似程度得到了提高,模式匹配程度也提高了,因此耦合效率提高。这证实了使用 MPLC 提高单模光纤耦合效率的可行性,通过提高光瞳面处 E_c 和 A_r 的相似程度,可以有效提高单模光纤的耦合效率。

4.2 基于 MPLC 校正对准误差

使平面波在 MPLC 内进行多次反射后,传输至光瞳面处时,转换为存在对准误差时与单模光纤后向传输至光瞳面的模场高度相似的光场分布,以达到提高单模光纤转换效率的目的。基于 MPLC 技术校正对准误差的光路示意图如图 8 所示。

不同 MPLC 可调参数下,当横向偏移量 Δr 以 $0.1w_0$ 为步长从 0 增大至 $2w_0$,纵向偏移量 Δz 以 $10w_0$ 为步长从 $-200w_0$ 增大至 $200w_0$ 时,MPLC 校正前后的耦合效率分别随两种对准误差变化的趋势如图 9 所示。

理想情况下,使用的 MPLC 相位掩模数量 N 越多,转换的精度越高^[19],但在 MPLC 的实际应用过程中,相位掩模数量越多,带来的反射损耗越多,且相位屏或空间光调制器的制备难度也会加大,因此需要在满足转换精度的情况下,选取合理数量的相位掩模。本文分别研究了使用 1~4 个相位掩模时,耦合效率随横向和纵向偏移变化的曲线如图 9(a)、(b)所示。此时 MPLC 的其余可变参数,输入光到第一个相位掩模

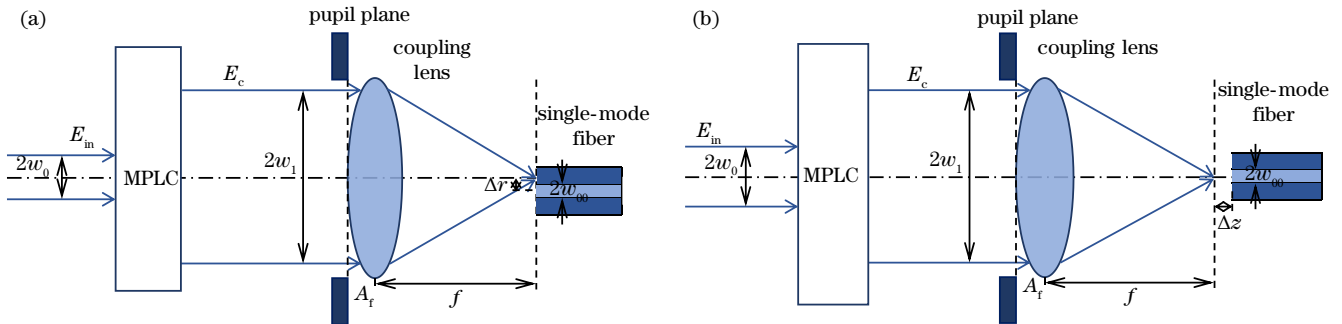


图 8 MPLC 校正对准误差示意图。(a)横向偏移;(b)纵向偏移

Fig. 8 Schematic diagram of the MPLC correcting misalignment. (a) Lateral offset; (b) longitudinal offset

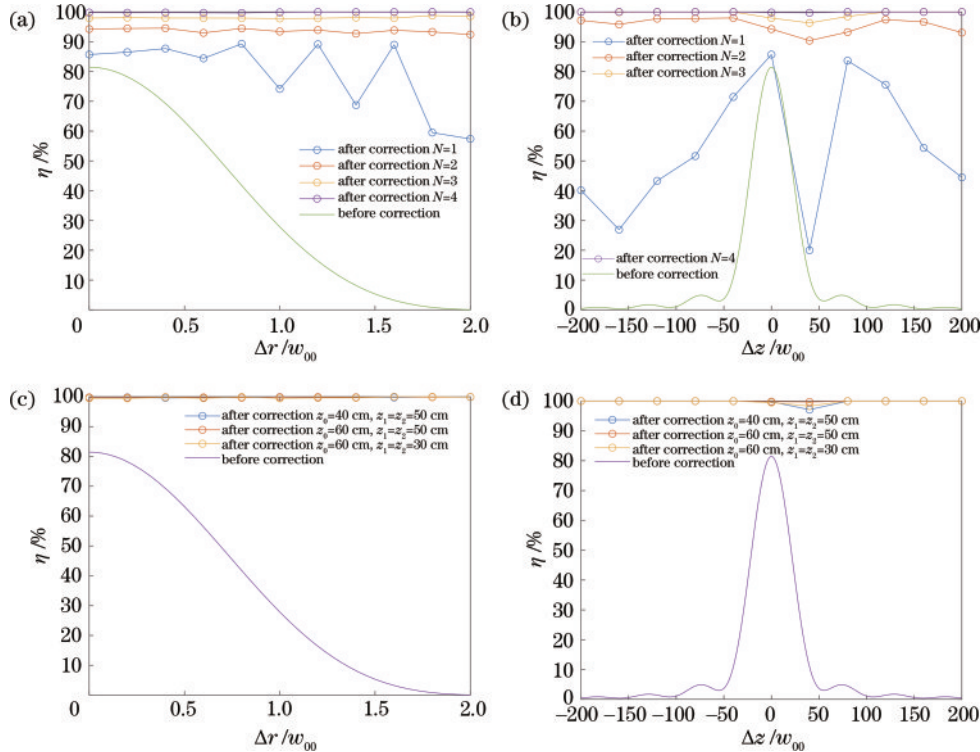


图 9 MPLC 校正前后耦合效率曲线。不同(a)相位掩模数量 N 和(b) z_0, z_1, z_2 条件下,MPLC 校正前后耦合效率随横向偏移量变化曲线;不同(c)相位掩模数量 N 和(d) z_0, z_1, z_2 条件下,MPLC 校正前后耦合效率随纵向偏移量变化曲线

Fig. 9 Coupling efficiency curves before and after correction by MPLC. Variation curves of coupling efficiency with lateral offset before and after MPLC correction under different (a) number N of phase masks and (b) $z_0, z_1,$ and z_2 ; variation curves of coupling efficiency with lateral offset before and after MPLC correction under different (c) number N of phase masks and (d) $z_0, z_1,$ and z_2

的距离 z_1 与输出光到最后一个相位掩模的距离 z_2 均为 60 cm, 相邻相位掩模间距 z_0 为 50 cm。结果表明, 随着使用的相位掩模数量增多, 耦合效率越高, 这是由于 MPLC 的转换精度越高, 与理论相符。当相位掩模数量 $N=4$ 时, 耦合效率均在 99% 以上, 获得了较好的模式转换效率, 因此本文选取的相位掩模数量 N 为 4。

然后将使用的相位掩模数量 N 固定为 4, 改变 z_1 、 z_2 和 z_0 , 仿真得到的结果如图 9(c)、(d) 所示。从图 9(c) 可以看出, 不同的 z_1 、 z_2 和 z_0 对 MPLC 校正横向偏移后的耦合效率影响较小, 均稳定在 99% 以上。从图 9(d) 可以看出, 不同的 z_1 、 z_2 和 z_0 对 MPLC 校正纵向偏移后的耦合效率影响较大, 其中在 $z_0=60$ cm、 $z_1=z_2=50$ cm 及 $z_0=60$ cm、 $z_1=z_2=30$ cm 的条件下, 纵向偏移为 $40w_{00}$ 时, 波前匹配算法陷入了局部极值点, 导致该点的耦合效率相较于其他偏移量时较低, 而在

$z_0=60$ cm、 $z_1=z_2=50$ cm 的条件下, MPLC 校正各个纵向偏移量后都能够达到 99% 以上, 波前匹配算法未陷入局部极值点。因此, 综合上述分析, 选取 4 个相位掩模, 设定 $z_0=60$ cm、 $z_1=z_2=50$ cm 来进行对准误差的校正。

设置相位掩模数量 $N=4$, 相邻相位掩模间距 $z_0=60$ cm, 输入光到第一个相位掩模的距离与输出光到最后一个相位掩模的距离 $z_1=z_2=50$ cm, 在此条件下进行对准误差的校正, 得到耦合效率随对准误差变化的曲线如图 10 所示, 由于光瞳面的入射光场与带有对准误差的单模光纤后向传输模场有极高的相似度, 模式匹配度得到了极大的提高, 因此耦合效率有着明显的提升。在横向偏移量为 $0\sim 2w_{00}$, 纵向偏移量为 $-200w_{00}\sim 200w_{00}$ 范围内, 经 MPLC 校正后的耦合效率均可以提升至 99% 以上。

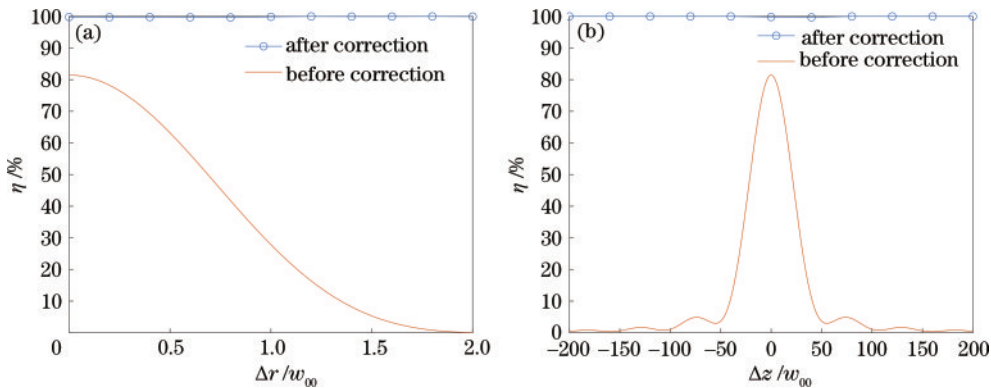


图 10 MPLC 校正前后耦合效率曲线。(a) 横向偏移; (b) 纵向偏移

Fig. 10 Coupling efficiency curves before and after correction by the MPLC. (a) Lateral offset; (b) longitudinal offset

以上结果说明, 与平面光直接耦合进入单模光纤相比, 使用 MPLC 不仅可以将平面光转换为高斯光, 提高模式匹配程度, 还可以有效校正实际的空间光耦合系统应用过程中存在的各种对准偏移误差, 提高了入射光束与单模光纤模场的相似程度, 进而有效提高了单模光纤的耦合效率。

5 结 论

在理想条件下, 本文首先对比分析了不存在对准误差及其他影响因素时平面波-单模光纤耦合效率及高斯光-单模光纤耦合效率模型, 结果表明, 高斯光与单模光纤模场分布的匹配度更高, 最佳耦合效率由 81.45% 提高到 1。进一步分别分析了光纤横向偏移和纵向偏移两种对准误差对于空间光-单模光纤耦合效率的影响, 结果表明, 耦合效率会随对准误差的增大而减小。因此, 对准误差的校正对于单模光纤耦合效率的提升有十分重要的作用。接着, 本文提出了利用 MPLC 的相位调制能力提高单模光纤耦合效率的方法, 当不存在对准误差及其他影响因素时, MPLC 可以将平面波光转换为高斯光束, 耦合效率提高了 18.54%。最后, 基于上述结果, 本文研究了利用

MPLC 校正对准误差的可行性, 分别计算了利用 MPLC 校正前后的耦合效率随两种对准误差变化的曲线, 对比结果表明, 使用 MPLC 分别校正横向偏移、纵向偏移和光纤倾斜后的耦合效率都提升至 99% 以上, 均远远高于理想情况下空间光到单模光纤耦合效率的最大值 81.45%。因此, 该研究对于提高空间光到单模光纤的耦合效率具有一定的理论意义。然而, 受波前匹配算法自身运行速度的限制, 基于 MPLC 的单模光纤耦合效率提高方案的调节频率相对较低, 需要进行进一步的研究改进。

参 考 文 献

- [1] 陶坤宇, 曹哲玮, 杨奇, 等. 空间超高速数字相干激光通信问题与解决方法[J]. 光通信技术, 2021, 45(5): 44-49.
Tao K Y, Cao Z W, Yang Q, et al. Problems and solutions of ultra-high speed digital coherent space laser communication[J]. Optical Communication Technology, 2021, 45(5): 44-49.
- [2] 徐文婧, 李岩, 刘宇昕, 等. 相干光通信载波相位恢复算法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1206002.
Xu W J, Li Y, Liu Y Y, et al. Carrier phase recovery

- algorithm for coherent optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1206002.
- [3] 朱世伟. 基于能量反馈的单模光纤耦合算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2019. Zhu S W. Research on single mode fiber coupling algorithm based on energy feedback[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [4] 赵卓, 谌明, 刘向南, 等. 降低随机振动对卫星激光通信光纤耦合影响的补偿算法[J]. *光通信技术*, 2020, 44(12): 47-51. Zhao Z, Chen M, Liu X N, et al. Compensation algorithm for reducing the influence of random vibration on fiber coupling in satellite laser communication[J]. *Optical Communication Technology*, 2020, 44(12): 47-51.
- [5] 吴子开. 提高空间光通信系统耦合效率的研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2017. Wu Z K. Research on improving the coupling efficiency of space optical communication system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [6] 金志明. 基于章动模式的精密跟踪伺服技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021. Jin Z M. Research on precision tracking servo technology based on nutation mode[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [7] Swanson E A, Bondurant R S. Using fiber optics to simplify free-space lasercom systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, 1218: 70-82.
- [8] 范雪冰, 王超, 佟首峰, 等. 空间光到单模多芯光纤耦合效率分析及影响因素研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(12): 2414-2422. Fan X B, Wang C, Tong S F, et al. Study of the coupling efficiency of spatial light into single-mode multi-core fiber[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(12): 2414-2422.
- [9] Labroille G, Jian P, Barré N, et al. Mode selective 10-mode multiplexer based on multi-plane light conversion [C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [10] Labroille G, Denolle B, Jian P, et al. Efficient and mode selective spatial mode multiplexer based on multi-plane light conversion[J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15599-155607.
- [11] Fontaine N K, Chen H S, Mazur M, et al. Hermite-Gaussian mode multiplexer supporting 1035 modes[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [12] Calvo R M, Allieux D, Reeves A, et al. Alternative passive fiber coupling system based on multi-plane light conversion for satellite-to-ground communications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11272: 167-178.
- [13] Billaud A, Allieux D, Laurenchet N, et al. Pointing error compensation for inter-satellite communication using multi-plane light conversion spatial demultiplexer [EB/OL]. (2020-12-18)[2021-08-06]. <https://arxiv.org/abs/2012.10247>.
- [14] Fontaine N K, Zhang Y H, Chen H S, et al. Ultrabroadband polarization insensitive hybrid using multiplane light conversion[C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2020: W4C.5.
- [15] Billaud A, Le Guennic T, Allieux D, et al. Optimal coherent beam combining based on Multi-Plane Light Conversion for laser directed energy weapons and countermeasure[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11539: 115390F.
- [16] Lib O, Sulimany K, Bromberg Y. Reconfigurable synthesizer for quantum information processing of high-dimensional entangled photons[EB/OL]. (2021-08-04)[2022-01-02]. <https://arxiv.org/abs/2108.02258>.
- [17] Ruilier C, Paris O D. A study of degraded light coupling into single-mode fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 3350: 319-329.
- [18] 赵芳. 基于单模光纤耦合自差探测星间光通信系统接收性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. Zhao F. Research on receiving performance of intersatellite laser communication systems based on single-mode fiber coupled self-homodying detection[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [19] Morizur J F, Nicholls L, Jian P, et al. Programmable unitary spatial mode manipulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2010, 27(11): 2524-2531.
- [20] Borevich Z I, Krupetskii S L. Subgroups of the unitary group that contain the group of diagonal matrices[J]. *Journal of Soviet Mathematics*, 1981, 17(4): 1951-1959.
- [21] 王波, 金叶, 张喜花. 基矢量的变换及矢量、算符的变换: 量子力学基础教程[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2020. Wang B, Jin Y, Zhang X H. Transformation of the basis vector and vector, operator transformation: Fundamentals of quantum mechanics[M]. Chongqing: Publishing House of Chongqing University, 2020.
- [22] Hashimoto T, Saida T, Ogawa I, et al. Optical circuit design based on a wavefront-matching method[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(19): 2620-2622.