

基于多平面光转换的拉盖尔高斯模解复用混频器设计及仿真分析

郭代芳¹, 张鹏^{1,2,3*}, 官喜宇¹, 范云龙¹, 佟首峰^{1,3}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

³长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程中心, 吉林 长春 130022

摘要 为满足日益增长的通信容量需求,空分复用技术得到了快速发展,其中基于多平面光转换的模式复用及解复用混频器由于兼容模式多、插入损耗小等优点而成为了研究热点。为了简化相干通信接收端,本文提出了基于多平面光转换的拉盖尔高斯模解复用混频器,同时实现了模解复用和 90°混频功能。本文首先提出拉盖尔高斯模解复用混频器的设计原理及参数定义,并采用基于角谱计算的波前匹配算法建立模解复用混频器模型。然后,基于模型仿真研究了正弦拉盖尔高斯模解复用混频器,仿真结果表明,所设计的混频器的插入损耗为 -0.7020 dB,信号光与本振光的耦合系数大于 0.89,端口相位差小于 10.1°。之后,进一步分析了相位板数量及像素尺寸、工作波长等对输出性能的影响,结果发现:在不考虑相位板反射等外部损耗时,随着相位板数量增加(≥ 8),插入损耗和模式相关损耗逐渐减小并趋于平稳;工作波长在 1500~1600 nm 范围时,耦合系数、端口均一性、插入损耗和模式相关损耗变化较小;像素尺寸在 3.2~19.2 μm 范围时,端口均一性和模式相关损耗变化较为平稳,耦合系数和插入损耗随着像素增大而恶化。最后,考虑到轨道角动量光束在空间光通信领域的广泛应用,在上述基础上进一步设计了轨道角动量光束的模解复用混频器,其性能满足应用要求。本研究结果表明:所提出的基于多平面光转换的拉盖尔高斯模及轨道角动量光束的模解复用混频器可以同时实现模解复用和 90°混频功能,性能较好,且具有较好的波长特性。本方案及仿真分析结果为空分复用技术中关键器件的设计提供了技术参考。

关键词 光通信; 相干通信; 多平面光转换; 模解复用混频器; 拉盖尔高斯模; 轨道角动量

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202149.0906002

1 引言

传统的激光通信系统采用单模光纤作为传播媒介,但单模光纤的容量已经接近非线性香农极限,无法满足急剧增长的通信容量需求,为解决这一问题,空分复用技术应运而生^[1]。空分复用技术将空间维度作为新的自由度^[2],克服了光纤的非线性效应,成倍提高了光纤的传输容量^[3]。模分复用技术是空分复用技术的一种,它利用光的不同空间模式作为独立信道承载信号,具有传输容量大、传输速率高、传

输距离远等优势,近年来得到了快速发展^[4-8]。基于拉盖尔高斯(LG)模式的混频器可以实现模解复用和光束混频,因此可以用于模分复用无线激光相干通信接收,实现高速率、大容量、远距离的实时数据传输。此外,基于 LG 模式的混频器具有结构简单和损耗低的优势,可以用于模分复用和相干探测,因此也可以用于高速率数据传输,如可用于星间海量数据实时传输、短距离超高速数据互联等潜在应用场景。

多平面光转换(MPLC)技术利用多块相位板组

收稿日期: 2021-08-31; **修回日期:** 2021-09-28; **录用日期:** 2021-10-18

基金项目: 吉林省国际科技合作项目(20200801053GH)、国家自然科学基金(61705019)、吉林省科技厅自然科学基金(20180101338JC, 20190201271JC)、吉林省教育厅基金(JJKH20200752KJ)、国家自然科学基金青年科学基金(61805028)、吉林省教育厅基金(JJKH20190563KG)

通信作者: *zhangpeng@cust.edu.cn

合可以实现对任意光束空间强度分布的整形,光束整形损耗很低^[9]。近年来,MPLC 在模分复用技术中得到了广泛研究;2014 年,Labroille 等^[10]首先提出了基于 MPLC 的线偏振(LP)模式的模式复用器,实现了 6 模式的模式复用,系统的插入损耗(IL)为 9.2 dB;2017 年,Saad 等^[11]提出了基于 MPLC 的轨道角动量(OAM)光束的模式复用器,该模式复用器在 C 波段的平均插入损耗为 3.35 dB;同年,北京邮电大学的田永杰等^[12]首次提出了一种基于 MPLC 的可编程的多端口模式开关,该模式开关通过 $2m+1$ 次平面光转换来支持 m 个模式;2018 年,北京邮电大学的肖兴国等^[13]设计了一种基于 MPLC 的可编程和模式选择的 OAM 模式复用器,仿真结果表明,使用 5 块或 7 块相位板可以实现 3 个或 4 个 OAM 模式的复用,该复用器在 C 波段的模式转换和复用性能良好;2019 年,Fontaine 等^[14]提出了基于 MPLC 的厄米特高斯(HG)模式复用器,该器件实现了 210 个模式的复用;同年,中山大学的研究人员^[15]结合波前匹配方法和梯度下降算法,设计了一种 OAM 解复用器;2020 年,广东大学的研究人员^[16]使用 20 m 的 OM2 多模光纤完成了模分复用传输实验,该实验分别采用了波分复用、强度调制和直接探测技术,其中模分复用和解复用通过 MPLC 实现;同年,中山大学的研究人员^[17]又提出了一种用于 OAM 模式解复用传输的 MPLC 装置,该装置由 4 个相位掩模实现,同时采用两个有双面图案的玻璃板来制作相位板,以减小对准难度。

传统的模解复用系统的相干光学前端由模解复用器和 90° 混频器组成,因此,模解复用转换的模式数量等于所需的混频器数量,模解复用器的转换模式越多,需要的混频器数量越多,光学前端接收器也越复杂^[18-19]。为了简化相干光学前端,降低相关损耗,在基于 MPLC 的模解复用器的基础上,Wen 等^[20]于 2019 年提出了基于 MPLC 的 LP 模式的模解复用混频器(MDH),该器件实现了 LP 模式的模解复用混频,首次基于 MPLC 同时实现了模解复用和光束混频;2020 年,Wen 等^[21]提出了基于 MPLC 的 HG 模式的模解复用混频器,该器件实现了 HG 模式的模解复用混频;2021 年,Wen 等^[22]又提出了一种基于 MPLC 的非模式选择复用器的设计,该设计只需要几个相位掩模,就可以将数百个离散输入光束相干地组合成数百个 HG 模。

LG 模相比于其他模式具有一些独特的优势:

1) 发散角小,适用于远距离传输^[23];2) 可携带不同的信息,在不同的信道传输^[24];3) 可承载 OAM 的最佳光束^[24],携带光子 OAM 的 LG 模在多领域被广泛应用^[25-33]。目前,在相干光通信系统中,基于 MPLC 的 LG 模式的模解复用混频器,同样可以实现模式解复用及光束混频,同时减少了相关损耗并降低了系统复杂度。为此,研究基于 MPLC 的 LG 模式的模解复用混频器是必要的^[34]。

虽然已有人针对基于 MPLC 的 HG 模式的模解复用混频器和 LP 模式的模解复用混频器进行了研究^[20-22],在匹配算法及结构上能够提供一定参考,但基于菲涅耳衍射法的空间光束传输算法无法消除几何限制^[35],导致计算的倾斜平面不准确,精度有限。再者,正弦 LG 模及 OAM 光束的模解复用混频器暂时还未见报道,设计过程及相关输出性能未知。为此,针对正弦 LG 模及 OAM 光束的模解复用混频器的研究空白,本课题组借鉴文献^[21]、^[35]的角谱算法来计算空间光束的光场,通过两次傅里叶变换提高了计算的准确度,同时简化了整个计算过程^[36]。另外,以往的模解复用混频器忽略了对耦合系数在不同波长和像素下的仿真分析,针对这一现状,本课题组对不同波长和像素范围内的耦合系数进行了仿真和分析,为判断模式纯净度提供参考。

首先建立模解复用混频器模型,对基于正弦 LG 模式的模解复用混频器的相关性能指标进行仿真分析,并研究相关参数对模解复用混频器性能的影响规律;然后,在正弦 LG 模式的基础上,进一步研究 OAM 光束的模解复用混频器。仿真结果表明,LG 模及 OAM 光束的模解复用混频器与文献^[20-21]中的模解复用混频器相比具有更好的性能指标。

2 MPLC 设计原理及参数定义

MPLC 技术通过多块相位板可以实现任意的空间酉变换,因此,任意光束的整形都可以用 MPLC 来实现。图 1 给出了基于 MPLC 技术将 n 个独立输入的高斯模式转换成 n 个正交高阶模式的原理图^[37]。

一般复用/解复用 n 个模式,因此需要 $2n+1$ 块相位板才能达到理想的效果^[11]。模式转换在本质上是无损耗的,而实际上则是有光学损耗的,这是由光学器件的反射引入的。增加相位板的数量能提高 MPLC 的转换精度,但同时也增加了相关损耗。由于光有可逆性,因此反向使用模分复用器即可实现模解复用。

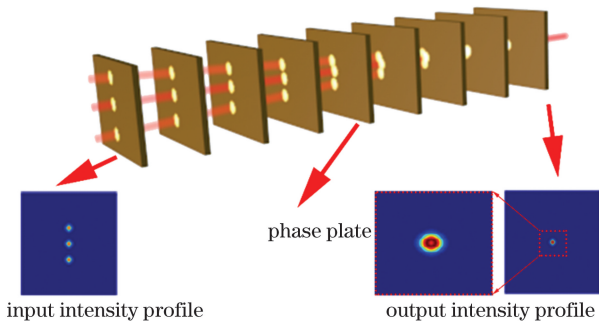


图 1 MPLC 原理图

Fig. 1 Schematic of multiplane light conversion

传统的模分复用系统采用独立的 90° 混频器实现信号光和本振光(LO)的相干混频。 90° 光混频可以表示为信号光和本振光在靶面上产生干涉的过程,混频光携带信号光的相位信息,而本振光功率远远大于信号光功率,所以混频器能够给予信号光一定的光学增益,方便了后续的信号处理。基于 MPLC 的 90° 混频器使信号光和本振光同时入射 MPLC 同样可以实现 90° 混频功能。假设信号光有 n 个模式,信号光和本振光同时入射到第一块相位板上,然后依次穿过多块相位板,最后输出端为 $4 \times n$ 排布的光斑分布,每一列光斑的相位分别为 $\pi, \pi/2, 0, -\pi/2$ 。将信号光与本振光同时引入 MPLC 系统,便可以实现基于 MPLC 的模解复用混频器^[20]。

为了定量评价基于 MPLC 的模解复用混频器的性能,本课题组根据式(1)计算模式串扰、模式耦合效率、插入损耗和模式相关损耗(MDL)。

$$C_{i,j} = \left| \iint (\overline{A_i \varphi_i}) (\overline{A_{LO}^* \varphi_{LO}}) dx dy \right|, \quad (1)$$

式中: $C_{i,j}$ 模式互为相关矩阵; i 代表不同的模式; A_i 为信号光 i 的振幅; φ_i 为信号光 i 的积分区域; A_{LO} 为本振光的振幅; φ_{LO} 为信号光的积分区域。

对式(1)进行奇异值分解,则插入损耗可以表

示为

$$L_i = 10 \times \lg \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i^2 / n \right), \quad (2)$$

式中: λ_i 为不同的奇异值; n 为模式数。模式相关损耗表示为

$$L_M = 10 \times \lg (\lambda_{\max}^2 / \lambda_{\min}^2), \quad (3)$$

式中: λ_{\max} 为最大奇异值; λ_{\min} 为最小奇异值。端口功率均一性表示为^[20]

$$\Delta L = \max(P_i) / \min(P_i), \quad (4)$$

式中: $\max(P_i)$ 为端口的最大功率; $\min(P_i)$ 为端口的最小功率。

3 基于 MPLC 模解复用混频器的仿真设计及分析

3.1 模解复用混频器仿真模型

在仿真过程中采用了波前匹配算法^[38],算法流程如图 2 所示。空间光束传播采用的计算方法为角谱法。增加相位板数量有利于提高模解复用混频器的转换精度和工作波长范围,但也会增加模解复用混频器的相关损耗。综合考虑后,在最初的设计中,采用的相位板数为 4。输入端为信号光和本振光,即 LG_{10} 、 LG_{20} 和 LO。首先设定信号光的输入端位置和光斑大小,输出端为 4×2 排布的高斯模,每一行分别与模式 LG_{10} 和 LG_{20} 对应,每行光斑在水平方向的位置信息相同,光斑水平间距 $255 \mu\text{m}$,每列光斑间距 $255 \mu\text{m}$,然后分别对每列光斑赋予不同的相位值,分别是 $\pi, \pi/2, 0, -\pi/2$;再设定本振光输入端和输出端光斑的位置和大小,输出端为 4×2 排布且相位相同的高斯模(与信号光输出端的位置相对应),用于实现分束功能。将信号光和本振光的光场信息分别进行归一化处理,最后根据相关参数的设定进行波前匹配运算,得出光场和相位板分布。仿真参数如表 1 所示。

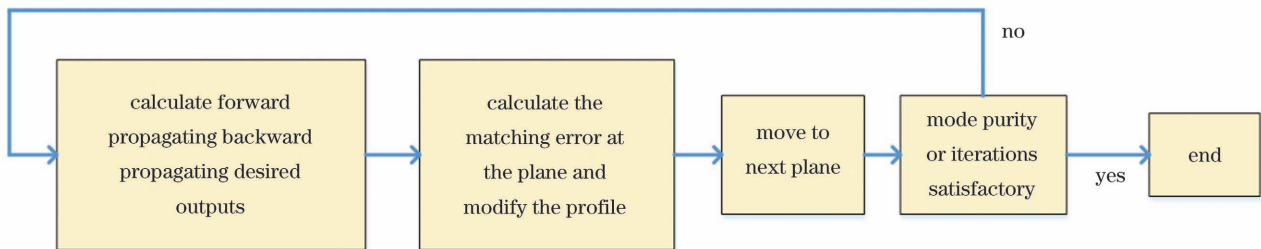


图 2 波前匹配算法流程图^[13]

Fig. 2 Flow chart of wavefront matching algorithm^[13]

表 1 输入端与输出端光斑的相关参数设定

Table 1 Simulation parameters of input and output spots

Parameter	Content
Signal	LG ₁₀ , LG ₂₀
Wavelength / nm	1550
Plane count	4
Signal diameter / μm	360
LO diameter / μm	500
Output spot diameter / μm	120
Output spot distance / μm	255

3.2 正弦 LG 模的模解复用混频仿真结果及分析

正弦 LG 模的模解复用混频输入-输出端口示意图如图 3 所示,根据仿真模型及设定参数,得到正弦 LG 模的模解复用混频结果。

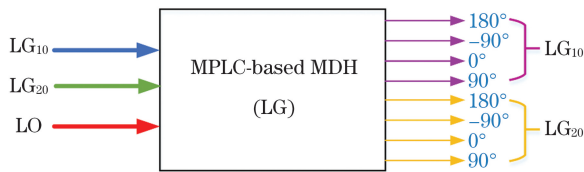


图 3 正弦 LG 模的模解复用混频输入-输出端口示意图
Fig. 3 Schematic of mode demultiplexing mixing input-output port of sinusoidal LG mode

根据表 1 中的参数进行了仿真运算,仿真结果如图 4~7 所示。图 4 给出了光束穿过每块相位板之后的光强分布,图 5 给出了每块相位板的相位掩码。仿真结果表明,信号光和本振光可以通过优化的相位掩码完成模解复用混频。为了更好地评估输入和输出光斑的光强分布,本文给出了信号光和本振光输入端的光强分布(如图 6 所示),以及信号光和本振光输出端的光强分布(如图 7 所示)。可以看出,输入光斑符合所设定的光强分布,输出端的光强分布符合设定的光强分布。尽管图 7(a)和图 7(c)存在光斑强度分布部分不均一的现象,但 4 块相位板足够可以有效地把信号光和本振光转换到设定的位置。

为进一步评估输出光斑的质量,本文给出了信号光和本振光输出端光斑的振幅分布,如图 8 所示。LG₁₀ 输出端与 LO 输出端(第一列)光斑的振幅分布如图 8(a)所示, LG₁₀ 输出端光斑振幅的标准差为 7.1158×10^{-5} , LO 输出端(第一列)光斑振幅的标准差为 1.6764×10^{-4} 。LG₂₀ 输出端与 LO 输出端(第二列)光斑的振幅分布如图 8(b)所示, LG₂₀ 输

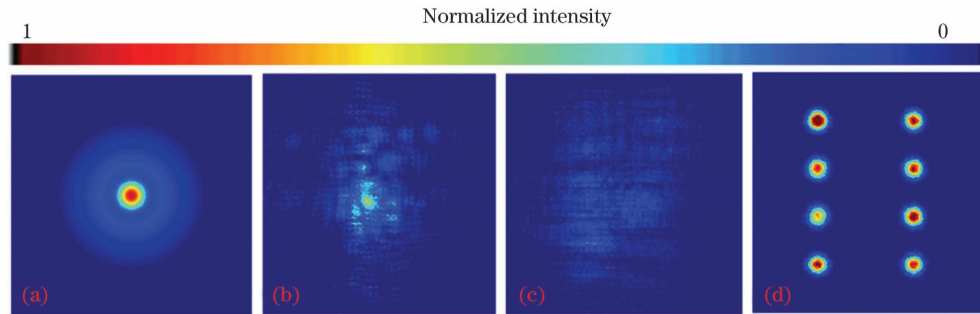


图 4 模解复用混频光强分布图。(a)通过第一块相位板后的光强分布;(b)通过第二块相位板后的光强分布;(c)通过第三块相位板后的光强分布;(d)通过第四块相位板后的光强分布

Fig. 4 Intensity distribution diagrams of mode demultiplexing hybrid. (a) Intensity distribution after passing through the first phase plate; (b) intensity distribution after passing through the second phase plate; (c) intensity distribution after passing through the third phase plate; (d) intensity distribution after passing through the fourth phase plate

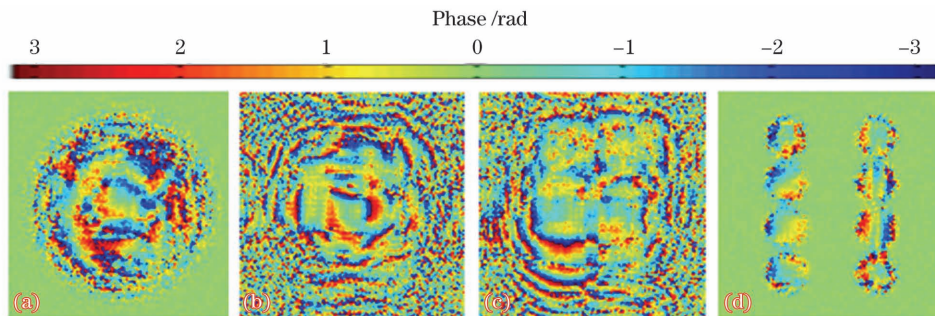


图 5 相位掩码。(a)第一块相位板的相位掩码;(b)第二块相位板的相位掩码;(c)第三块相位板的相位掩码;(d)第四块相位板的相位掩码

Fig. 5 Phase mask. (a) Phase mask of the first phase plate; (b) phase mask of the second phase plate; (c) phase mask of the third phase plate; (d) phase mask of the fourth phase plate

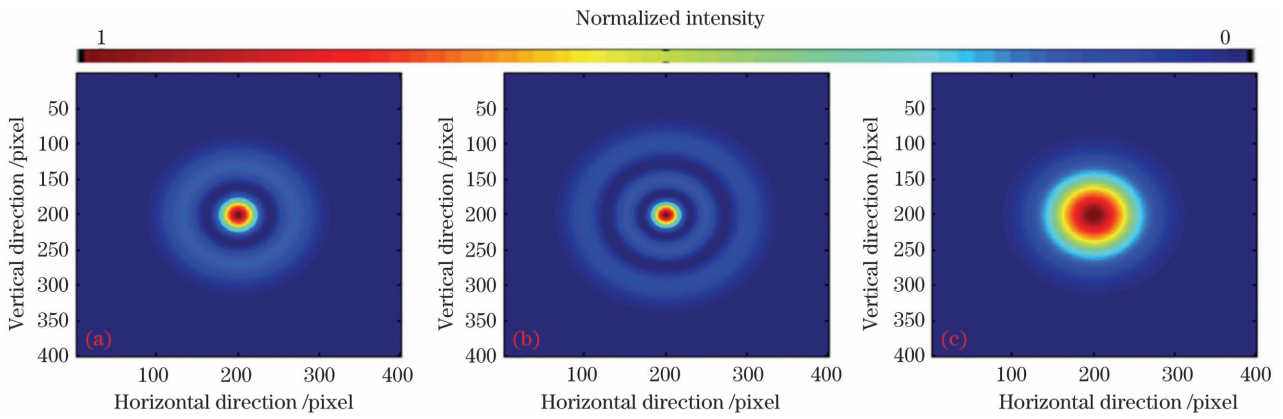


图 6 信号光和本振光输入端的光强分布。(a) LG_{10} 的光强分布; (b) LG_{20} 的光强分布; (c) LO 的光强分布

Fig. 6 Light intensity distributions at the input end of signal light and local oscillator light. (a) Light intensity distribution of LG_{10} ; (b) light intensity distribution of LG_{20} ; (c) light intensity distribution of LO

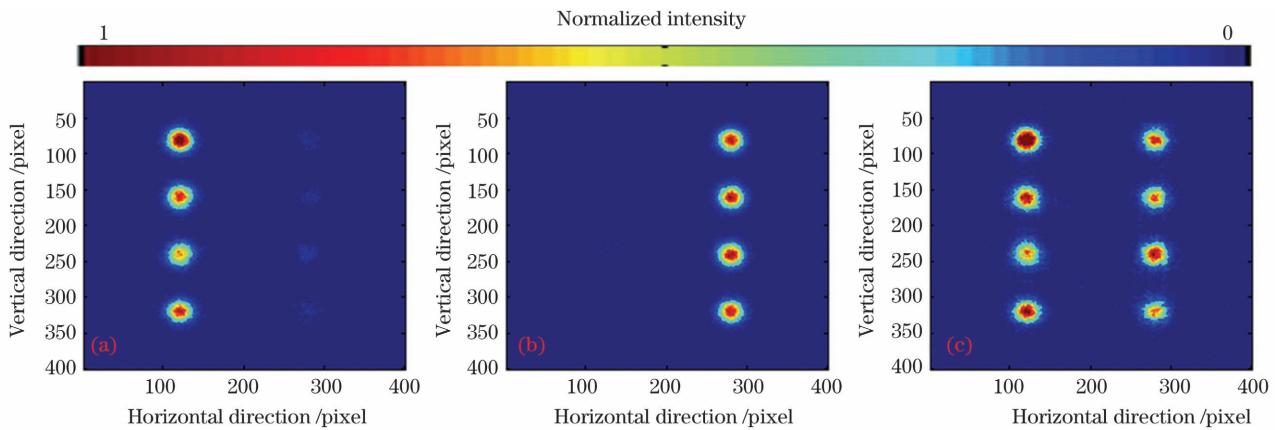


图 7 信号光和本振光输出端的光强分布。(a) LG_{10} 输出端的光强分布; (b) LG_{20} 输出端的光强分布; (c) LO 输出端的光强分布

Fig. 7 Light intensity distributions at the output end of signal light and local oscillator light. (a) Light intensity distribution of LG_{10} output terminal; (b) light intensity distribution of LG_{20} output terminal; (c) light intensity distribution of LO output terminal

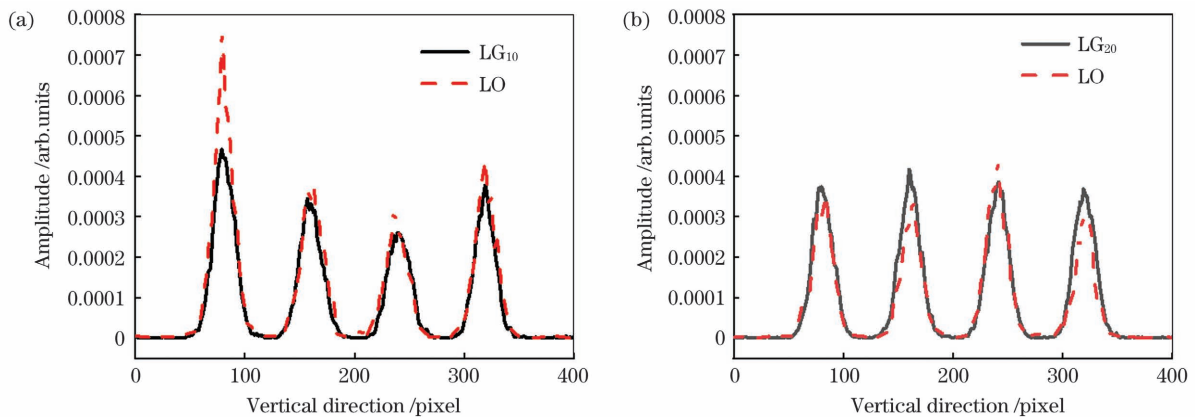


图 8 信号光和本振光输出端光斑的振幅分布。(a) LG_{10} 输出端与 LO 输出端(第一列)光斑的振幅分布; (b) LG_{20} 输出端与 LO 输出端(第二列)光斑的振幅分布

Fig. 8 Amplitude distributions of light spots at the output end of signal light and local oscillator light. (a) Amplitude distributions of light spots at the output end of LG_{10} and LO (first column); (b) amplitude distributions of light spots at the output end of LG_{20} and LO (second column)

出端光斑振幅的标准差为 1.8753×10^{-5} , LO 输出端(第二列)光斑振幅的标准差为 4.4589×10^{-5} 。其中:LO 输出端(第一列)光斑的标准差较大,光斑均一性较差;LG₁₀ 输出端、LG₂₀ 输出端和 LO 输出端(第二列)光斑振幅的标准差都小于 1×10^{-4} , 光斑均一性较好,并且信号光和相应的本振光位置基本对齐。

之后本文又分析了信号光和本振光输出端光斑的相位误差。信号光输出端与本振光输出端光斑的相位分布如图 9 所示,可见,输出光斑的相位除有些小波纹外(实际有效的相位部分已用虚线框标出),光斑相位和所设定的相位基本相符。计算信号光和本振光在竖直方向相位的平均值,进而可求得输出光斑与设定光斑的相位误差,如表 2 所示。

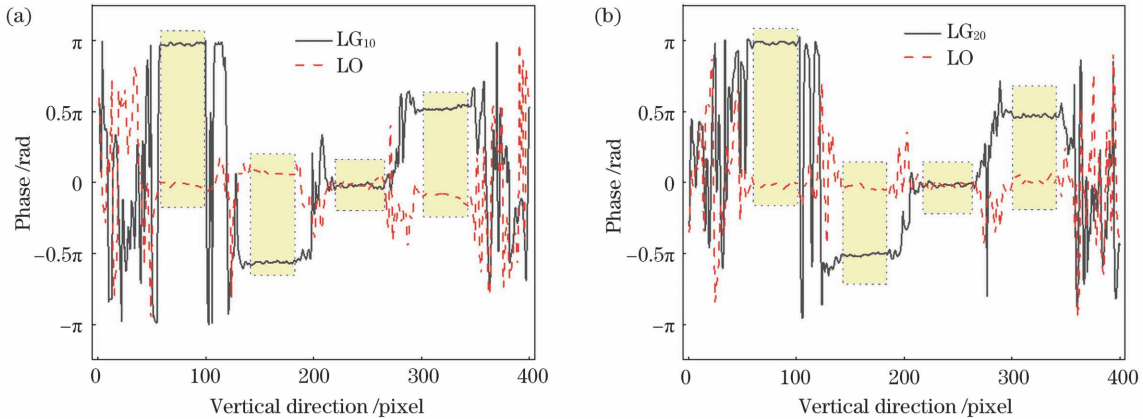


图 9 信号光和本振光输出端光斑的相位分布。(a) LG₁₀ 输出端与 LO 输出端(第一列)光斑的相位分布;(b) LG₂₀ 输出端与 LO 输出端(第二列)光斑的相位分布

Fig. 9 Phase distributions of light spots at the output end of signal light and local oscillator light. (a) Phase distribution of light spots at the output end of LG₁₀ and LO (first column); (b) phase distribution of light spots at the output end of LG₂₀ and LO (second column)

表 2 信号光和本振光输出端仿真与理想设定的相位差

Table 2 Phase difference between simulation and ideal results of signal light and local oscillator light output terminals

Output end	$\Delta\theta_{1i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{2i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{3i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{4i}/(^{\circ})$
Port 1	4.2748	1.6215	3.1197	3.2488
Port 2	4.2591	-10.0284	2.7872	4.0659
Port 3	3.6252	2.7794	3.0096	3.2708
Port 4	-3.4394	9.2533	5.1587	-1.2643

LG₁₀ 输出端 4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{1i}|$ 在 $3.4394^{\circ} \sim 4.2748^{\circ}$ 之间, LO 输出端(第一列)4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{2i}|$ 在 $1.6215^{\circ} \sim 10.0284^{\circ}$ 之间, LG₂₀ 输出端 4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{3i}|$ 在 $2.7872^{\circ} \sim 5.1587^{\circ}$ 之间, LO 输出端(第一列)4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{4i}|$ 在 $1.2643^{\circ} \sim 4.0659^{\circ}$ 之间。各端口的相位差均 $\leq 10.0284^{\circ}$, 且整体相位较稳定。

为更好地评估模解复用混频器的性能,本文分析了模式的相似度。根据式(1)得出了归一化理想场和输出场的光场耦合矩阵,如图 10 所示。对角线为信号光和本振光的耦合系数, LG₁₀ 的耦合系数为 0.8983, LG₂₀ 的耦合系数为 0.9269, LO 的耦合系数为 0.9098。非对角线代表不同模式光场的串扰, LG₁₀ 与 LG₂₀ 的串扰为 0.0159, LG₁₀ 与 LO 的串扰为

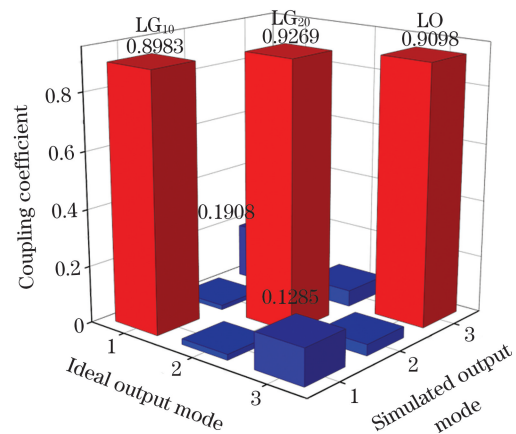


图 10 归一化理想场与输出场的耦合矩阵

Fig. 10 Coupling matrix of normalized ideal field and output field

0.1908, LG_{20} 与 LG_{10} 的串扰为 0.0203, LG_{20} 与 LO 的串扰为 0.0568, LO 与 LG_{10} 的串扰为 0.1285, LO 与 LG_{20} 的串扰为 0.0395。其中最大串扰为 0.1908 (LG_{10} 与 LO), 模式串扰较大, 这是因为信号光的模式不同, 光强分布不同, 需要增加较多的相位板来改善串扰。由于信号光与本振光模式的耦合系数都大于 0.89, 因此整体模式的耦合系数较高, 该模解复用混频器的模式耦合系数比现有模解复用混频器都高, 整体插入损耗为 -0.7020 dB, 模式相关

损耗为 -3.2352 dB。

为了更进一步评估参数对模解复用混频器的影响, 在不考虑反射等外部损耗的情况下, 根据式 (2) 和式 (3), 通过改变相位板数量得到了插入损耗、模式相关损耗与相位板数量的关系曲线, 如图 11 所示。可见, 插入损耗和模式相关损耗随相位板数量的增加而减小 (负号代表损耗), 当相位板数量为 8 时, 插入损耗和模式相关损耗逐渐趋于平缓。

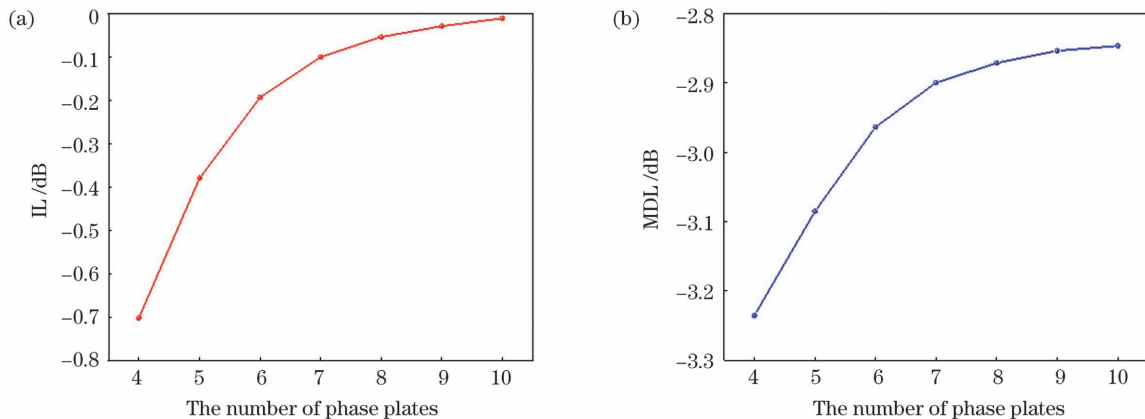


图 11 插入损耗和模式相关损耗与相位板数量的关系曲线。(a)插入损耗与相位板数量的关系曲线;(b)模式相关损耗与相位板数量的关系曲线

Fig. 11 Relationship curve between insertion loss (IL) or mode dependent loss (MDL) and the number of phase plates.

(a) Relationship curve between IL and the number of phase plates; (b) relationship curve between MDL and the number of phase plates

然后同样根据式(1)~(4)评估该模解复用混频器的耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗与波长的关系, 结果如图 12 所示, 本文结果与相关文献的对比如表 3 所示。由图 12(a)、(b)可以看出: 在 1500~1600 nm 波长范围内, LG_{10} 耦合系数的变化为 0.0065, LG_{20} 耦合系数的变化为 0.0059, LO 耦合系数的变化为 0.0061, 整体耦合系数的变化小于 0.007; LG_{10} 的 ΔL_i 变化为 0.1193, LG_{20} 的 ΔL_i 变化为 0.0839, LO 的 ΔL_i 变化为 0.1627, 整体的 ΔL_i 变化均小于 0.17。可见, 信号光和本振光的耦合系数和 ΔL_i 整体平稳。由图 12(c)、(d)可以看出: 在 1520~1560 nm 波长范围内, 插入损耗相对较小, 插入损耗的变化范围为 0.047 dB, 整体变化范围较小; 模式相关损耗的变化范围为 0.055 dB, 变化较小。

由表 3 可以看出: 在 1500~1600 nm 波长范围内, 基于 LP 模的模解复用混频器信号光和本振光的 ΔL_i 变化范围均不超过 0.7 dB, 而基于 LG 模的模解复用混频器信号光和本振光的 ΔL_i 变化范围

均小于 0.17 dB。这说明基于 LG 模的模解复用混频器的 ΔL_i 稳定性优于基于 LP 模的模解复用混频器。此外, 由表 3 还可以看出: 基于 LP 模的模解复用混频器的模式相关损耗和插入损耗的变化范围均不超过 1 dB, 基于 LG 模的模解复用混频器的插入损耗和模式相关损耗的变化范围均小于 0.05 dB。整体上说, 相对于文献[20]给出的基于 LP 模的模解复用混频器, 基于 LG 模的模解复用混频器在 1500~1600 nm 波段内更稳定, 证实了本文所设计的混频器具有较好的波长特性。

最后本文通过仿真得到了耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗与像素尺寸的关系, 如图 13 所示。由图 13(b)可以看出: 在 3.2~19.2 μm 的像素范围内, LG_{10} 的 ΔL_i 变化范围为 0.3362 dB, LG_{20} 的 ΔL_i 变化范围为 0.1203 dB, LO 的 ΔL_i 变化范围为 0.3483 dB。可见, 整体的 ΔL_i 变化范围均小于 0.35 dB, 说明信号光和本振光的 ΔL_i 整体趋于平稳。此外, 由图 13(a)、(c)、(d)可以看出: 在 3.2~19.2 μm 的像素范围内, 模式相关损耗的变化

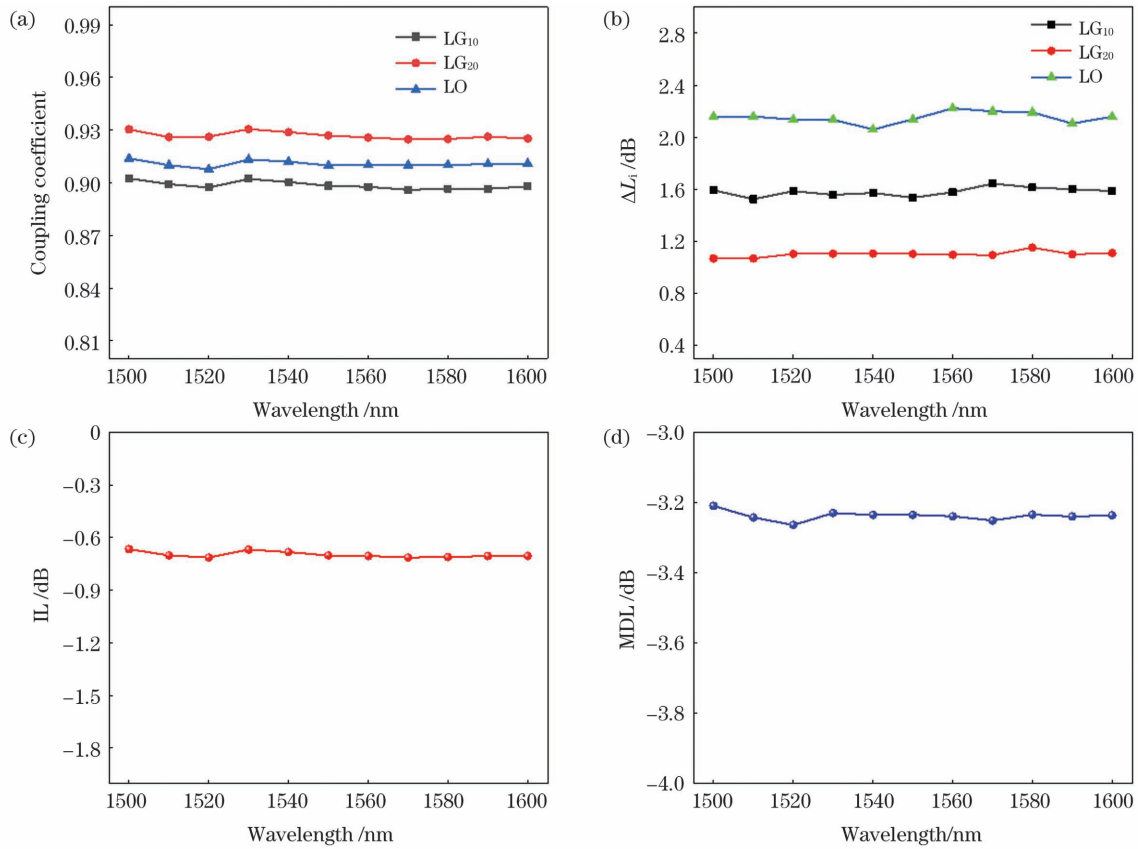


图 12 耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗与波长的关系曲线。(a)耦合系数与波长的关系曲线;(b) ΔL_i 与波长的关系曲线;(c)插入损耗与波长的关系曲线;(d)模式相关损耗与波长的关系曲线

Fig. 12 Variations of coupling coefficient, ΔL_i , IL, MDL with wavelength. (a) Relationship curve between coupling coefficient and wavelength; (b) relationship curve between ΔL_i and wavelength; (c) relationship curve between IL and wavelength; (d) relationship curve between MDL and wavelength

表 3 1500~1600 nm 波长范围内耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗的对比

Table 3 A comparison of coupling coefficient, ΔL_i , IL, and MDL in the wavelength range of 1500-1600 nm

Parameter	LP ^[20]	LG(this paper)
Coupling coefficient		0.8960-0.9025 (LG ₁₀)
		0.9247-0.9033 (LG ₂₀)
		0.9077-0.9138 (LO)
ΔL_i /dB	1.25-1.75 (signal)	1.5237-1.6430 (LG ₁₀)
	2.3-3 (LO)	1.0673-1.1512 (LG ₂₀)
		2.0597-2.2224 (LO)
IL /dB	-2--1	-0.7137 --0.6664
MDL /dB	-2--1	-3.2643--3.2098

为 0.1466 dB,整体趋于平稳,信号光和本振光的耦合系数随着像素的增大而减小,插入损耗随着像素的增大而增大。这说明,随着像素增大,该模解复用混频器的性能变差。

由表 4 可以看出:在 3.2~19.2 μm 像素范围内,基于 LP 模的模解复用混频器信号光和本振光

的 ΔL_i 变化范围不超过 1.25 dB,而基于正弦 LG 模的模解复用混频器信号光和本振光的 ΔL_i 变化范围均小于 0.35 dB,变化范围更小。这说明基于正弦 LG 模的模解复用混频器的稳定性均优于基于 LP 模的模解复用混频器。由表 4 还可以看出,基于 LP 模的模解复用混频器的模式相关损耗变化范围

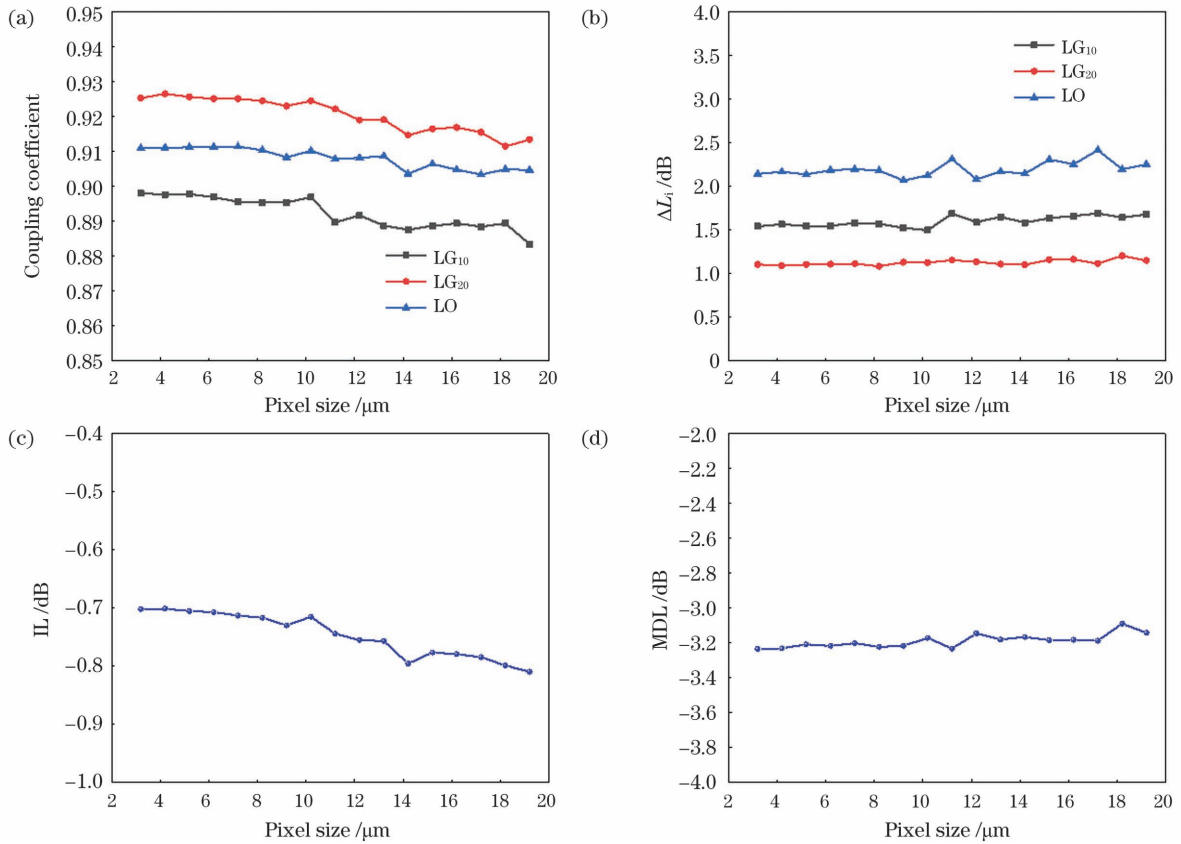


图 13 耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗与像素尺寸的关系曲线。(a)耦合系数与像素尺寸的关系曲线;(b) ΔL_i 与像素尺寸的关系曲线;(c)插入损耗与像素尺寸的关系曲线;(d)模式相关损耗与像素尺寸的关系曲线

Fig. 13 Variation of coupling coefficient, ΔL_i , IL, and MDL with pixel size. (a) Relationship curves between coupling coefficient and pixel size; (b) relationship curves between ΔL_i and pixel size; (c) relationship curve between IL and pixel size; (d) relationship curve between MDL and pixel size

表 4 在 3.2~19.2 μm 像素范围内耦合系数、 ΔL_i 、插入损耗和模式相关损耗的对比

Table 4 A comparison of coupling coefficient, ΔL_i , IL, and MDL for a pixel range of 3.2~19.2 μm

Parameter	LP ^[20]	LG (this paper)
Coupling coefficient		0.8979–0.8834 (LG ₁₀)
		0.9113–0.9033 (LG ₂₀)
		0.9264–0.9114 (LO)
ΔL_i /dB	0.75–2 (signal)	2.0638–2.4121 (LG ₁₀)
	2.3–3 (LO)	1.2023–1.0820 (LG ₂₀)
		2.4121–2.0638 (LO)
IL /dB	–2––1	–0.8097––0.7020
MDL /dB	–1.75– –1	–3.2353––3.0906

为 0.75 dB,而基于正弦 LG 模的模解复用混频器的模式相关损耗变化范围为 0.1447 dB。这说明,基于正弦 LG 模的模解复用混频器的模式相关损耗稳定性较好。此外,基于 LP 模的模解复用混频器的插入损耗在 –2~–1 dB 之间变化,整体较稳定,而基于正弦 LG 模的模解复用混频器的插入损耗在 –0.8097~–0.7020 dB 之间变化。随着像素增大,

基于正弦 LG 模的模解复用混频器的性能变差,且变化范围小于 0.2 dB,整体上比基于 LP 模的模解复用混频器更稳定。

3.3 OAM 模的模解复用混频仿真结果分析

LG 光束是亥姆霍兹方程在傍轴近似下的解,它是圆形镜光学谐振腔的本振模,LG 光束一般有两种表达方式,分别为正弦 LG 光束和螺旋 LG 光

束^[39]。根据欧拉公式 $\exp(ix) = \cos x + i \sin x$, 可以将螺旋 LG 光束理解成两部分正弦 LG 光束之和^[40]。当螺旋 LG 光束的径向指数 p 为 0, 拓扑荷数 l 为整数时, 螺旋 LG 光束为 OAM 光束。

OAM 模的模解复用混频输入-输出端口示意图如图 14 所示, 根据正弦 LG 模模解复用混频仿真, 同时考虑到轨道角动量光束在空间光通信中被广泛应用, 根据表 5 所示参数进一步设计了 OAM 模的模解复用混频器, 以下为仿真结果。



图 14 OAM 模的模解复用混频输入-输出端口示意图
Fig. 14 Schematic of mode demultiplexing mixing input-output port of OAM mode

表 5 输入端与输出端光斑的相关参数设定

Table 5 Simulation parameters of input and output spots

Parameter	Content
Signal	OAM ₁ , OAM ₂
Wavelength /nm	1550
Plane count	4
Signal diameter / μm	360
LO diameter / μm	500
Output spot diameter / μm	120
Output spot distance / μm	255

基于表 5, 依据 LG 模的仿真分析得到了如图 15~18 所示的仿真结果。混频过程光强分布如图 15 所示, 相位掩码如图 16 所示。这表明, 模解复用混频器可以通过优化的相位掩码完成模解复用混频。同样, 为了评估输出光斑的质量, 仿真得到了设定的信号光和本振光输入端的光强分布, 以及信号光和本振光输出端的光强分布, 如图 17、18 所示。

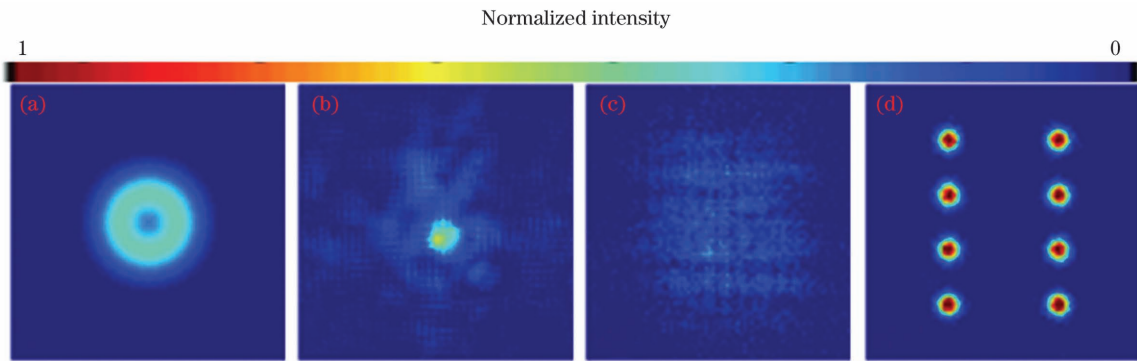


图 15 模解复用混频强度分布。(a)通过第一块相位板后的光强分布;(b)通过第二块相位板后的光强分布;(c)通过第三块相位板后的光强分布;(d)通过第四块相位板后的光强分布

Fig. 15 Intensity distributions of mode demultiplexing hybrid. (a) Light intensity distribution after passing through the first phase plate; (b) light intensity distribution after passing through the second phase plate; (c) light intensity distribution after passing through the third phase plate; (d) light intensity distribution after passing through the fourth phase plate

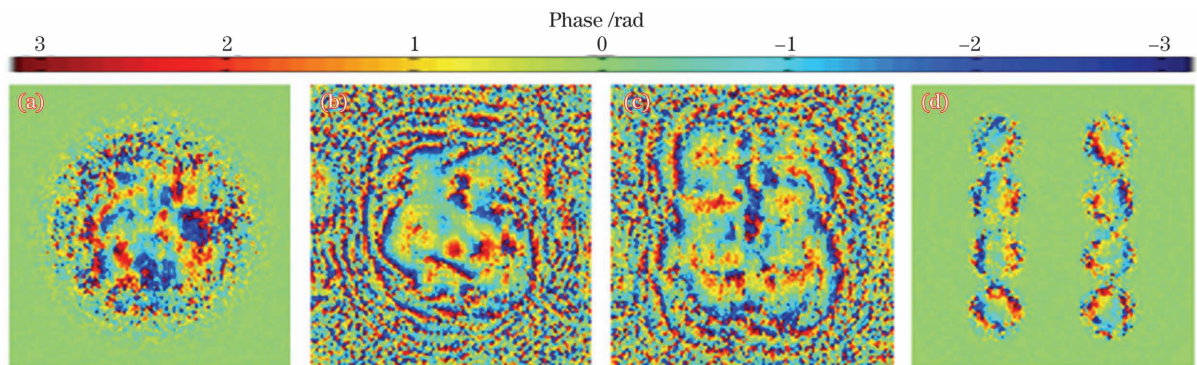


图 16 相位掩码图。(a)第一块相位板的相位掩码;(b)第二块相位板的相位掩码;(c)第三块相位板的相位掩码;(d)第四块相位板的相位掩码

Fig. 16 Phase mask diagrams. (a) Phase mask of the first phase plate; (b) phase mask of the second phase plate; (c) phase mask of the third phase plate; (d) phase mask of the fourth phase plate

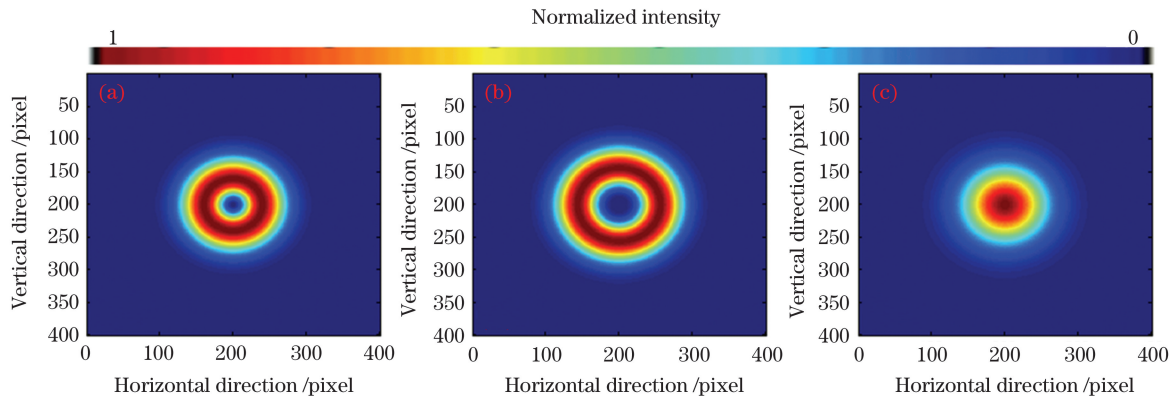


图 17 信号光和本振光输入端的光强分布。(a) OAM_1 的光强分布; (b) OAM_2 的光强分布; (c) LO 的光强分布
 Fig. 17 Light intensity distributions of signal light and local oscillator light input terminals. (a) Light intensity distribution of OAM_1 ; (b) light intensity distribution of OAM_2 ; (c) light intensity distribution of LO

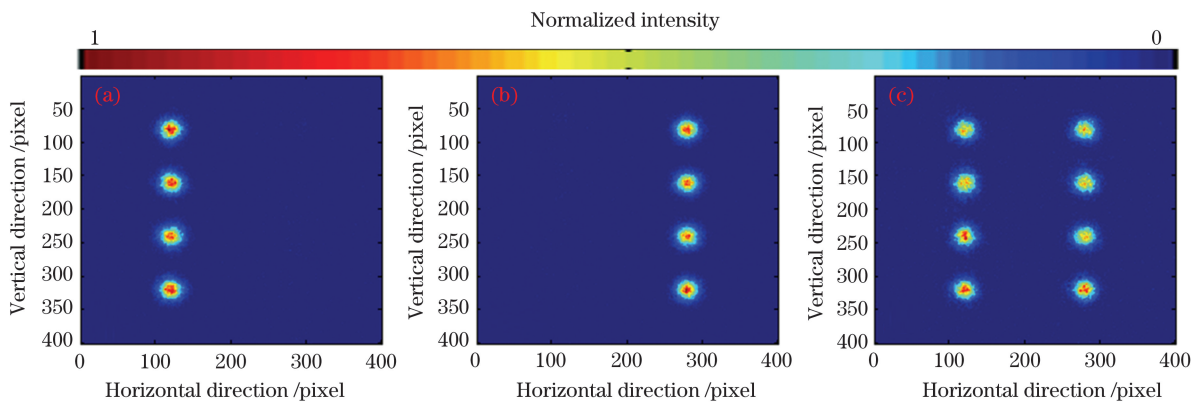


图 18 信号光和本振光输出端的光强分布。(a) OAM_1 输出端光强分布; (b) OAM_2 输出端光强分布; (c) LO 输出端光强分布

Fig. 18 Light intensity distributions of signal light and local oscillator light output terminals. (a) Light intensity distributions of OAM_1 output terminal; (b) light intensity distribution of OAM_2 output terminal; (c) light intensity distribution of LO output terminal

这表明, 光强分布符合设定的模式分布, 输出端的光强分布符合设定的光强分布, 光斑强度分布较好。

同样, 为了评估输出光斑的质量, 本文仿真得到

了信号光输出端和本振光输出端的振幅分布, 如图 19 所示。其中: OAM_1 输出端与 LO 输出端(第一列)的振幅分布如图 19(a) 所示, OAM_1 输出端光

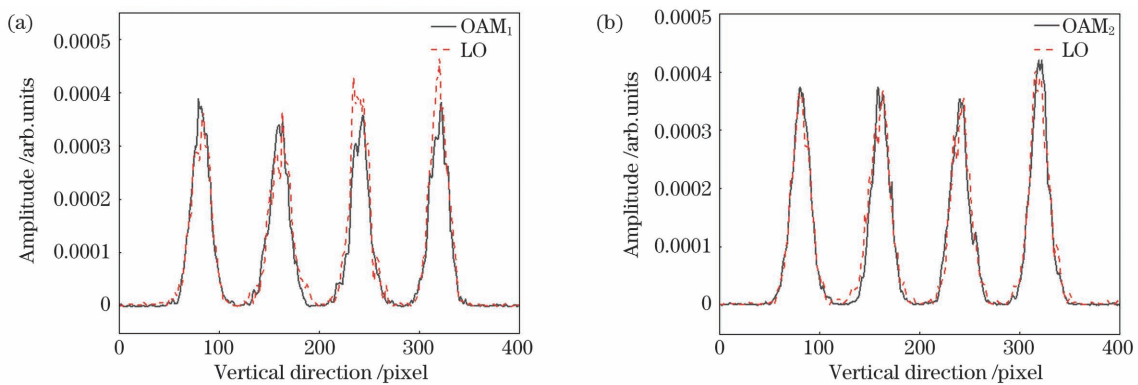


图 19 信号光输出端和本振光输出端的振幅分布。(a) OAM_1 输出端与 LO 输出端(第一列)的振幅分布; (b) OAM_2 输出端与 LO 输出端(第二列)的振幅分布

Fig. 19 Amplitude distributions of signal light and local oscillator light output terminals. (a) Amplitude distributions of OAM_1 and LO (first column) output terminals; (b) amplitude distributions of OAM_2 and LO (second column) output terminals

斑振幅的标准差为 1.8425×10^{-5} , LO 输出端(第一列)光斑振幅的标准差为 4.1680×10^{-5} ; OAM₂ 输出端与 LO 输出端(第一列)的振幅分布如图 19(b)所示, OAM₂ 输出端光斑振幅的标准差为 4.2237×10^{-5} , LO 输出端(第二列)光斑振幅的标准差为 1.8539×10^{-5} 。可见, OAM₁、OAM₂ 和 LO 输出端光斑振幅的标准差均小于 1×10^{-4} , 标准差较小, 振幅均一性较好, 且信号光和本振光输出端的光斑位置一致。

接下来分析输出光斑的相位误差。信号光和本

振光输出端的相位分布如图 20 所示, 其中: OAM₁ 输出端与 LO 输出端(第一列)的相位分布如图 20(a)所示, OAM₁ 输出端与 LO 输出端(第一列)的相位存在一定的波动(实际有效的相位部分已用虚线框标出); OAM₂ 输出端和 LO 输出端(第二列)的相位分布如图 20(b)所示, OAM₂ 输出端和 LO 输出端(第二列)光斑的相位基本比较稳定(实际有效的相位部分已用虚线框标出)。计算了信号光和本振光在竖直方向相位的平均值, 输出光斑与设定光斑的相位误差如表 6 所示。

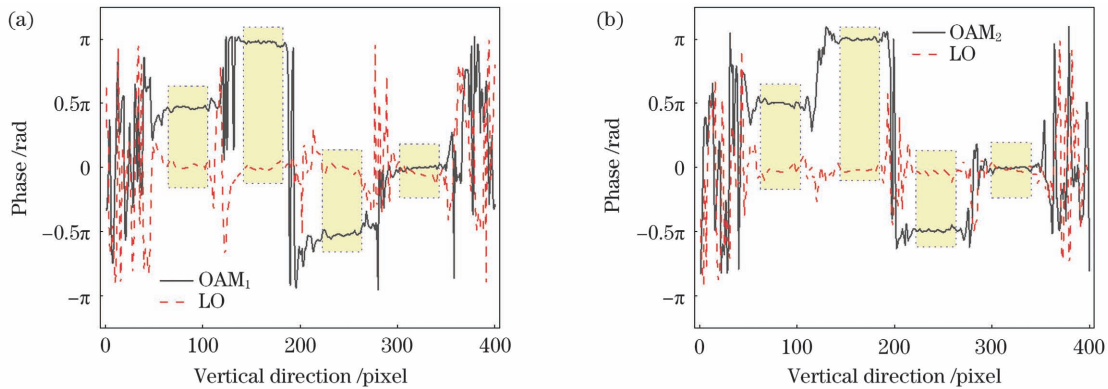


图 20 信号光输出端与本振光输出端的相位分布。(a) OAM₁ 输出端与 LO 输出端(第一列)的相位分布; (b) OAM₂ 输出端与 LO 输出端(第二列)的相位分布

Fig. 20 Phase distributions of signal light and local oscillator light output terminals. (a) Phase distributions of OAM₁ and LO (first column) output terminals; (b) phase distributions of OAM₂ and LO (second column) output terminals

表 6 信号光和本振光输出端的相位差

Table 6 Phase difference between signal light and local oscillator light output terminals

Output	$\Delta\theta_{1i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{2i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{3i}/(^{\circ})$	$\Delta\theta_{4i}/(^{\circ})$
Port 1	5.1525	-0.3341	-0.8072	5.8899
Port 2	4.1862	1.5663	0.7415	2.6961
Port 3	4.8456	0.5369	-1.0668	6.3869
Port 4	0.3510	8.9746	1.0106	2.1095

表 6 中总结了信号光和本振光输出端的相位差, 可以看出: OAM₁ 输出端 4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{1i}|$ 在 $0.3510^{\circ} \sim 5.1525^{\circ}$ 之间, LO 输出端(第一列)4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{2i}|$ 在 $0.3341^{\circ} \sim 8.9746^{\circ}$ 之间, LG₂₀ 输出端 4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{3i}|$ 在 $0.7415^{\circ} \sim 1.0668^{\circ}$ 之间, LO(第一列)输出端 4 个端口的相位差 $|\Delta\theta_{4i}|$ 在 $2.6961^{\circ} \sim 6.3869^{\circ}$ 之间。各端口的相位差均不超过 8.9746° , 相位整体较稳定。

最后评估模式的相似度和串扰。根据式(1)得到了归一化理想场与输出场的耦合矩阵, 如图 21 所示。对角线为信号光和本振光的耦合系数, OAM₁ 的耦合系数为 0.8854, OAM₂ 的耦合系数为 0.8908, LO 的耦合系数为 0.8983。信号光和本振

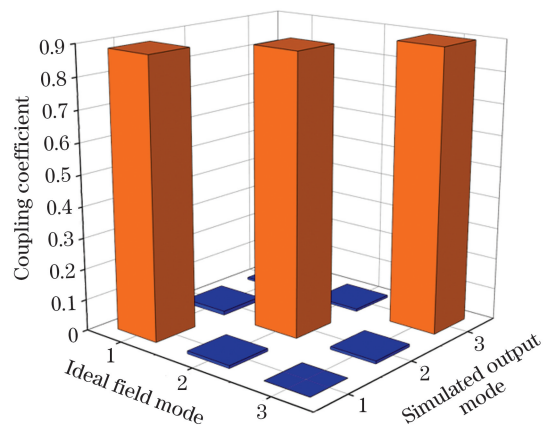


图 21 归一化理想场与输出场的耦合矩阵

Fig. 21 Coupling matrix of normalized ideal field and output field

光的耦合系数均大于 0.8,耦合系数整体较高。非对角线代表不同模式光场的串扰,其中 OAM_1 和 OAM_2 的串扰为 0.0127, OAM_1 和 LO 的串扰为 0.0072, OAM_2 和 OAM_1 的串扰为 0.0091, OAM_2 与 LO 的串扰为 0.0076,LO 和 OAM_1 的串扰为 0.0006,LO 与 OAM_2 的串扰为 0.0006。可见,串扰均小于 0.013,串扰整体较小。整体插入损耗为 -0.9995 dB,模式相关损耗为 -0.1504 dB。

如表 7 所示,与参考文献[20-21]相比,LP 模的模解复用混频器信号光和本振光耦合系数的平均值为 0.887,HG 模的模解复用混频器信号光和本振光耦合系数的平均值不小于 0.76,正弦 LG 模的模解复用混频器信号光和本振光的耦合系数平均值为

0.9117, OAM 模的模解复用混频器信号光和本振光耦合系数的平均值为 0.8915。基于 LG 模的模解复用混频器的耦合系数均优于 LP 模和 HG 模的模解复用混频器。LP 模的模解复用混频器的最大串扰为 0.05, OAM 模的模解复用混频器的最大串扰均小于 0.013。可见, OAM 模的模解复用混频器的模式串扰更小。LP 模的模解复用混频器的插入损耗为 -1.08 dB,HG 模的模解复用混频器的插入损耗均小于 -1 dB。LP 模和 HG 模的模解复用混频器的模式相关损耗均不大于 -1.25 dB, OAM 模的模解复用混频器的模式相关损耗为 0.1504 dB,整体性能较好。

表 7 耦合系数、最大串扰、插入损耗和模式相关损耗的对比

Table 7 A comparison of coupling coefficient, maximum crosstalk, IL and MDL

Mode	LP ^[20]	HG ^[21]	LG [this paper]	OAM [this paper]
Coupling coefficient	0.874 (LP ₀₁)		0.8983 (LG ₁₀)	0.8854 (OAM ₁)
	0.889 (LP _{11o})	≥ 0.76	0.9269 (LG ₂₀)	0.8908 (OAM ₂)
	0.869 (LP _{11e})			
		0.916 (LO)		0.9098 (LO)
Maximum crosstalk	0.05		0.1908	0.0127
IL/dB	-1.08	-2.3	-0.702	0.9995
MDL/dB	-1.25	-1.7	-3.2352	0.1504

4 结 论

本文提出了基于 MPLC 的 LG 模的模解复用混频器,采用 4 块相位板同时实现了两个模式的模解复用和 90° 混频。通过数值仿真得到了基于正弦 LG 模的模解复用混频器的性能指标,仿真结果表明,信号光和本振光的耦合系数均大于 0.89,各端口相位差均小于 10.1° ,最终实现了模解复用混频器的插入损耗为 -0.7020 dB,模式相关损耗为 -3.2352 dB。在此基础上进一步探究了系统参数对混频器性能的影响。仿真结果表明:1)随着相位板数量的增加,在不考虑反射等外部损耗的条件下,插入损耗和模式相关损耗逐渐减小并趋于平稳(相位板数量 ≥ 8);2)在 (1550 ± 50) nm 波长范围内,耦合系数、端口均一性、插入损耗和模式相关损耗整体趋于平稳(说明该模解复用混频器具有较好的波长特性);3)当像素尺寸在 $3.2 \sim 19.2 \mu\text{m}$ 范围内时,端口均一性和模式相关损耗整体较平稳,耦合系数和插入损耗随着像素的增大而恶化(故该模解复用混频器的性能会随像素增大而变差)。最后,在基于正弦 LG 模的模解复用混频器的基础上进一步设计

了 OAM 光束的模解复用混频,通过数值仿真得到了模式耦合效率、光斑振幅、各个端口相位差等相关参数。仿真结果表明,信号光和本振光的耦合系数均大于 0.8,各模式之间的串扰均小于 0.013,相位差均小于 8.98° ,最终实现了模解复用混频器的插入损耗为 -0.9995 dB,模式相关损耗为 -0.1504 dB。本文的模解复用混频器比文献[20-21]的模解复用混频器具有更稳定的性能,在空分复用技术中具有一定的应用价值。

整体而言,基于 MPLC 的模解复用混频器和传统的模解复用混频器都可以用于相干信号检测。传统的模解复用混频器在多模式情况下的相干光学前端结构较为复杂(相干光学前端包括模解复用器和 n 个混频器, n 为模式数),成本较高,但其在模式数量少的情况下,技术相对成熟,优势较为明显。基于 MPLC 的模解复用混频器由一系列相位片构成,结构简单,插入损耗低,系统结构受模式数的影响较小,因此适用于空间紧凑且模式较多的情况,但技术开发还在进行中,性能等有待于进一步提高。随着 MPLC 技术的发展,基于 MPLC 的模解复用混频器的整体性能将会进一步提升。

致谢 感谢美国中佛罗里达大学闻和、张远航在 MPLC 仿真及波前匹配算法方面提供的帮助。

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] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [3] Essiambre R J, Foschini G J, Kramer G, et al. Capacity limits of information transport in fiber-optic networks[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(16): 163901.
- [4] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [5] Ip E, Li M J, Bennett K, et al. $146\lambda \times 6 \times 19$ -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 Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 790-797.
- [6] Wen H, Xia C, Velázquez-Benítez A M, et al. First demonstration of six-mode PON achieving a record gain of 4 dB in upstream transmission loss budget [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(8): 1990-1996.
- [7] Kokubun Y, Koshihara M. Novel multi-core fibers for mode division multiplexing: proposal and design principle[J]. *IEICE Electronics Express*, 2009, 6(8): 522-528.
- [8] 孙晶, 黄普明, 么周石. 大气湍流与平台微振动影响下的星地激光通信性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0301003.
Sun J, Huang P M, Yao Z S. Performance of satellite-to-ground laser communications under the influence of atmospheric turbulence and platform micro-vibration [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0301003.
- [9] 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*, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, D. C.: OSA, 2015: W1A.5.
- [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): 15599-15607.
- [11] Saad R, Meunier M, Trunet G, et al. Highly selective 7 orbital angular momentum mode multiplexer based on multi-plane light conversion [C] // 2017 European Conference on Optical Communication (ECOC), September 17-21, 2017, Gothenburg, Sweden. New York: IEEE Press, 2017: 17733588.
- [12] Tian Y J, Li Y, Li B B, et al. Programmable mode switch based on multi-plan light conversion (MPLC) for mode division multiplexing networks [C] // 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), July 31-August 4, 2017, Singapore. New York: IEEE Press, 2017: 17373649.
- [13] Xiao X G, Li Y, Zheng D H, et al. Programmable orbital angular momentum(OAM) mode multiplexer based on multi-plane light conversion(MPLC) [C] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), October 26-29, 2018, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2018: 18382558.
- [14] Fontaine N K, Ryf R, Chen H S, et al. Laguerre-Gaussian mode sorter[J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 1865.
- [15] Lin Z Z, Wen Y H, Chen Y J, et al. Inverse design of orbital angular momentum mode demultiplexer by combining wavefront matching method and gradient descent algorithm [C] // 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019: 19065516.
- [16] Li J P, Hu J K, Zou D 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): 4501308.
- [17] Lin Z Z, Wen Y H, Chen Y J, et al. Transmissive multi-plane light conversion for demultiplexing orbital angular momentum modes[C]//*Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 10-15, 2020, Washington, DC. Washington, D.C.: OSA, 2020: SF1J.
- [18] Randel S, Ryf R, Sierra A, et al. 6×56 -Gb/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.
- [19] 吴潇杰, 张鹏, 南航, 等. 90° 空间光混频器分光比的影响分析及自适应调整[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(15): 150602.
Wu X J, Zhang P, Nan H, et al. Influence analysis and adaptive adjustment of spectral ratio of 90° spatial optical mixer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(15): 150602.
- [20] Wen H, Liu H Y, Zhang Y H, et al. Mode demultiplexing hybrids for mode-division multiplexing coherent receivers [J]. *Photonics*

- Research, 2019, 7(8): 917-925.
- [21] Wen H, Liu H Y, Zhang Y H, et al. Scalable Hermite-Gaussian mode-demultiplexing hybrids [J]. Optics Letters, 2020, 45(8): 2219-2222.
- [22] Wen H, Zhang Y H, Sampson R, et al. Scalable non-mode selective Hermite-Gaussian mode multiplexer based on multi-plane light conversion[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 88-97.
- [23] Phillips R L, Andrews L C. Spot size and divergence for Laguerre Gaussian beams of any order [J]. Applied Optics, 1983, 22(5): 643-644.
- [24] Allen L, Beijersbergen M, Spreeuw R, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Physical Review A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [25] Mair A, Vaziri A, Weihs G, et al. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. Nature, 2001, 412(6844): 313-316.
- [26] Kuga T, Torii Y, Shiokawa N, et al. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam [J]. Physical Review Letters, 1997, 78(25): 4713.
- [27] Arlt J, Hitomi T, Dholakia K. Atom guiding along Laguerre-Gaussian and Bessel light beams [J]. Applied Physics B, 2000, 71(4): 549-554.
- [28] Franke-Arnold S, Allen L, Padgett M. Advances in optical angular momentum [J]. Laser & Photonics Review, 2008, 2(4): 299-313.
- [29] Fatemi F, Bashkansky M. Cold atom guidance using a binary spatial light modulator[J]. Optics Express, 2006, 14(4): 1368-1375.
- [30] Bradshaw D S, Andrews D L. Interactions between spherical nanoparticles optically trapped in Laguerre-Gaussian modes[J]. Optics Letters, 2005, 30(22): 3039-3041.
- [31] Wang J. Advances in communications using optical vortices[J]. Photonics Research, 2016, 4(5): B14-B28.
- [32] Willner A E, Xie G D, Li L, et al. Design challenges and guidelines for free-space optical communication links using orbital-angular-momentum multiplexing of multiple beams [J]. Journal of Optics, 2016, 18(7): 074014.
- [33] 马文琪, 路慧敏, 王建萍, 等. 基于空间光调制器和深度学习的涡旋光束产生 [J]. 光学学报, 2021, 41(11): 1107001.
- Ma W Q, Lu H M, Wang J P, et al. Vortex beam generation based on spatial light modulator and deep learning [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(11): 1107001.
- [34] Song H, Su X Z, Song H Q, et al. Simultaneous turbulence mitigation and mode demultiplexing using one MPLC in a two-mode 200-Gbit/s free-space OAM-multiplexed link [C] // Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2020, March 8-12, 2020, San Diego, California. Washington, D.C.: OSA, 2020: W1G.3.
- [35] Matsushima K, Schimmel H, Wyrowski F. Fast calculation method for optical diffraction on tilted planes by use of the angular spectrum of plane waves [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(9): 1755-1762.
- [36] 李文胜, 彭彬, 吴庆麟. 衍射问题的角谱算法 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2006, 20(1): 75-77.
- Li W S, Peng B, Wu Q L. A method of calculating the diffraction by angular spectrum [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2006, 20(1): 75-77.
- [37] 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.
- [38] Sakamaki Y, Saida T, Hashimoto T, et al. New optical waveguide design based on wavefront matching method [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(11): 3511-3518.
- [39] Granata M, Buy C, Ward R, et al. Higher-order Laguerre-Gauss mode generation and interferometry for gravitational wave detectors [J]. Physical Review Letters, 2010, 105(23): 231102.
- [40] 周国泉. 拉盖尔-高斯光束的近场矢量结构特征 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1187-1191.
- Zhou G Q. Analytical vectorial structure of a Laguerre-Gaussian beam in the near field [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1187-1191.

Design and Simulation Analysis of Laguerre Gaussian Mode Demultiplexing Hybrid Based on Multi-Plane Light Conversion

Guo Daifang¹, Zhang Peng^{1,2,3*}, Gong Xiyu¹, Fan Yunlong¹, Tong Shoufeng^{1,3}

¹ School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

² School of Electronic Information Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

³ National and Local Joint Engineering Centre of Space Optoelectronic Technology, Changchun University of Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract

Objective The traditional laser communication system uses a single-mode fibre communication medium, which cannot meet the rapidly increasing demand for communication capacity because the capacity of single-mode fibre is close to the nonlinear Shannon limit. To solve this problem, space division multiplexing technology was recently proposed. Space division multiplexing technology overcomes the nonlinear effect of optical fibres and doubles their transmission capacity using the spatial dimension as a new degree of freedom. Mode division multiplexing technology is a type of space division multiplexing technology, which uses different spatial modes of light as independent channels to carry signals and realises a large transmission capacity, high transmission rate and long transmission distance. To meet the growing demand for communication capacity, space division multiplexing technology has rapidly developed recently. Among them, mode multiplexing and demultiplexing using multiplane light conversion has become a research hotspot because of many compatible modes and low insertion loss. To simplify the receiver of coherent communication, we propose a Laguerre Gaussian mode demultiplexer mixer using a multi-plane light conversion, which functions as mode demultiplexing and 90° hybrid simultaneously. The mode demultiplexing hybrid based on Laguerre Gaussian mode achieves mode demultiplexing and beam hybrid, and can be used for mode division multiplexing wireless laser coherent communication reception, to meet the real-time data transmission with the high rate, large capacity and long-distance. Moreover, the hybrid using the Laguerre Gaussian mode has the advantages of simple structure and low loss. It can be used for mode division multiplexing and coherent detection. Therefore, it can be used for high-speed data transmissions, such as the real-time transmission of massive data between satellites, short-range ultrahigh-speed data interconnection and other potential application scenarios.

Methods First, the design principle and parameter definition of the Laguerre Gaussian mode demultiplexing hybrid were given. Then, we established the mode demultiplexing hybrid model using the wave-front matching algorithm. Next, we used the angular spectrum method for calculating the spatial beam field, thereby improving the calculation accuracy and simplifying the calculation. Finally, we completed the simulation of the sinusoidal Laguerre Gaussian mode demultiplexer mixer using the model and further designed the mode demultiplexer mixer of orbital angular momentum beam for the sinusoidal Laguerre Gaussian mode.

Results and Discussions We proposed Laguerre Gaussian modes demultiplexing hybrid using multiplane light conversion. Four phase plates were used to realise mode demultiplexing and 90° hybrid of two modes simultaneously. The performance index of the mode demultiplexing hybrid using the sinusoidal Laguerre Gaussian mode was analysed by numerical simulation. The simulation results showed that the coupling coefficient of signal light and local oscillator light was greater than 0.89, and the phase difference of each port was less than 10.1°. Finally, the insertion and mode-dependent losses are -0.7020 and -3.2352 dB. Following this, we further explored the influence of system parameters on hybrid performance. The simulation results showed that 1) with an increase in the number of phases, neglecting the external loss such as reflection, the insertion and mode-dependent losses decreased and tended to be stable (≥ 8); 2) in the wavelength range of 1550 ± 50 nm, the coupling coefficient, port uniformity, insertion loss, and mode-dependent loss were stable as a whole, indicating that the mode demultiplexer mixer has good wavelength characteristics; 3) the pixel size ranged from 3.2 to 19.2 μm , the port uniformity and mode related loss were relatively stable as a whole, and the coupling coefficient and the insertion loss deteriorated with an increase in the number of pixels. Therefore, if the pixels are large, the performance of the mode demultiplexing hybrid will deteriorate. Finally, from the mode demultiplexing hybrid using sinusoidal Laguerre Gaussian mode, the mode demultiplexing hybrid of orbital angular momentum beam was further designed. Furthermore, we numerically

simulated and analysed the relevant parameters, such as mode coupling efficiency, spot amplitude and phase difference of each port. The simulation results showed that the coupling coefficient of signal light and local oscillator light was greater than 0.8, the crosstalk between various modes was less than 0.013, and the phase difference was less than 8.98° . The insertion loss of mode demultiplexing hybrid and mode-dependent loss -0.9995 and -0.1504 dB, respectively. The mode demultiplexing hybrid has more stable performance and a certain application value in space division multiplexing technology.

Conclusions The proposed Laguerre Gaussian mode and orbital angular momentum beam demultiplexing hybrid using multiplane light conversion simultaneously achieved mode demultiplexing and 90° hybrid, with good performance and wavelength characteristics. The designed and implemented Laguerre Gaussian mode demultiplexing hybrid using multiplane light conversion achieved good performance and a feasible scheme, thereby providing a technical reference for designing mode multiplexing and demultiplexing in space division multiplexing technology.

Key words optical communications; coherent communication; multiplane light conversion; mode demultiplexing hybrid; Laguerre Gaussian mode; orbital angular momentum