

引用格式: GONG Xiyu, ZHANG Peng, WU Xiaojie, et al. Research on Influence of Aberration and Turbulence on Performance of 90° Space Optical Hybrid[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4):0401003

宫喜宇,张鹏,吴潇杰,等. 像差及湍流对 90°空间光混频器性能的影响研究[J]. 光子学报, 2021, 50(4):0401003

像差及湍流对 90°空间光混频器性能的影响研究

宫喜宇^{1,2}, 张鹏^{1,2,3}, 吴潇杰^{1,2}, 南航^{1,2}, 郭代芳^{1,2}, 王超^{1,2}, 佟首峰^{1,2,3}

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 长春 130022)

(3 深圳鹏城实验室, 广东 深圳 518052)

摘要:光信号在大气湍流中发生畸变, 畸变光信号经过有缺陷的光学天线和空间光混频器后, 存在混频效率低及抖动的问题。针对空间输出型和单模输出型的 90°空间光混频器, 推导了带初级像差的 90°空间光混频器模型, 并研究了湍流对混频效率的影响。仿真结果表明, 对于探测器靶面半径为 50 μm 的空间输出型混频器, 像差量为 0.2λ 的倾斜、球差、离焦、彗差和像散分别导致混频效率下降 9.8%、0.6%、0.36%、0.02% 和 0.01%。对于单模输出型混频器, 像差量为 0.2λ 的倾斜、像散、离焦、彗差和球差分别导致混频效率下降 14.11%、8.39%、6.35%、2.63% 和 1.13%。湍流强度 C_n^2 小于 $6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 空间输出型比单模输出型混频器的混频效率高 19% 以上, 在湍流强度 C_n^2 大于 $6.4 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 时, 两者混频效率接近于 0。最后设计加工了空间输出型和单模输出型 90°混频器, 并搭建性能测试平台。对于探测器靶面半径为 50 μm 的空间输出型混频器, 像差量为 0.2λ 的倾斜、球差和离焦导致混频效率下降 52%、10% 和 6%; 对于单模输出型混频器, 像差量为 0.2λ 的倾斜、像散和离焦导致混频效率下降 65%、24% 和 11%, 其他像差对混频效率没有影响。湍流对混频器性能影响的实验结果显示, 空间输出型光混频器中频信号值的标准差为 21.388, 该值远低于单模输出型标准差 247.442。

关键词:空间相干光通信; 90°空间光混频器; 波前像差; 大气湍流; 混频效率

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215004.0401003

Research on Influence of Aberration and Turbulence on Performance of 90° Space Optical Hybrid

GONG Xiyu^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2,3}, WU Xiaojie^{1,2}, NAN Hang^{1,2}, GUO Daifang^{1,2},
WANG Chao^{1,2}, TONG Shoufeng^{1,2,3}

(1 College of Optoelectronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 National and Local Joint Engineering Research Center of Space Optoelectronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(3 Shenzhen Pengcheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518052, China)

Abstract: The optical signal is distorted in the atmospheric turbulence, after passing through the defective optical antenna and the space optical hybrid, there are problems of low hybrid efficiency and jitter. According to the influence of 90° space optical hybrid with space output and single-mode output, the hybrid

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61705019, 61805028), 吉林省科技厅自然科学基金(No.20180101338JC), 吉林省国际科技合作项目(No.20200801053GH), 吉林省教育厅基金(Nos.JJKH20200752KJ, JJKH20190563KG)

第一作者:宫喜宇(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间光学与空间激光通信技术。Email: 1803352216@qq.com

导师(通讯作者):张鹏(1985—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间激光通信技术。Email: zhangpeng@cust.edu.cn

收稿日期:2020-11-16; **录用日期:**2021-01-19

<http://www.photon.ac.cn>

efficiency model of space optical hybrid with primary aberration is derived. Then the influence of aberration and turbulence on hybrid efficiency is studied. The simulation results show that for the space output 90° space optical hybrid with a target radius of 50 μm of the detector, the tilt, spherical aberration, defocus, coma, and astigmatism with aberration of 0.2λ cause the hybrid efficiency to decrease by 9.8%, 0.6%, 0.36%, 0.02% and 0.01%, respectively. Astigmatism and coma have no effect on the hybrid efficiency. For the single-mode output hybrid, the tilt, astigmatism, defocus, coma, and spherical aberration with aberration of 0.2λ cause the hybrid efficiency to decrease by 14.11%, 8.39%, 6.35%, 2.63% and 1.13%, respectively. When the turbulence intensity $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$, the hybrid efficiency of the spatial output type is more than 0.19 higher than that of the single-mode output 90° space optical hybrid, and when the turbulence intensity $C_n^2 > 6.4 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$, the hybrid efficiency of the two is close to zero. Finally, the space output and single-mode output optical hybrid are designed and processed, and the performance test platform is built. For the space output hybrid with a detector target surface radius of 50 μm, the tilt, spherical aberration, and defocus of 0.2λ cause the hybrid efficiency to decrease by 52%, 10%, and 6%; for the single-mode output hybrid, the tilt, astigmatism and defocus with aberration of 0.2λ cause the hybrid efficiency to decrease by 65%, 24% and 11%. Other aberrations have no effect on the hybrid efficiency. The experimental results of turbulence on the hybrid performance show that the standard deviation of the intermediate frequency signal value of the space output optical hybrid is 21.388, which is much lower than that of single-mode output standard deviation 247.442.

Key words: Space coherent optical communication; 90° space optical hybrid; Wave-front aberration; Atmospheric turbulence; Hybrid efficiency

OCIS Codes: 010.1300; 060.2605; 060.1660; 060.2920

0 引言

空间相干激光通信技术由于其速率高、灵敏度高、安全性高等优势逐渐成为空间通信领域的研究热点^[1-2]。90°光混频器作为光学零差相干接收机的关键器件,现已在空间高速相干激光通信中使用,其作用是利用干涉原理将接收到的空间信号光与本振光干涉混频得到中频光信号,因此信号光和本振光之间必须严格满足干涉条件。而在实际工作中,空间光混频器极易受到动态工作条件影响,导致耦合效率等性能严重恶化,甚至光通信系统无法工作,为此有必要研究外部动态工作条件的影响,特别是湍流及像差这两个比较灵敏的影响因素。

90°光混频器根据其结构可分为三种:光纤型、波导型和空间型。其中空间型光混频器结构简单,空间探测器靶面大,有利于光束耦合,能提高抗湍流能力,具有较大应用价值。近年来,许多文献研究了空间光混频器的结构和性能影响因素,其中结构方面的研究包括高精度型^[3]、双折射晶体型^[4]、垂直型^[5]、平铺型^[6]以及分光比自适应补偿型90°空间光混频器^[7],空间光混频器结构设计不断向轻小型、高性能方向发展。由于空间光混频器在使用过程中面临大量的不确定因素,为此已有不少论文研究了大气湍流^[8]、指向跟踪误差^[9]、光相干性^[10]、分光比^[11]、天线像差^[12]、光轴偏转及光斑大小对空间光混频器混频效率^[13]、相位误差^[14]乃至相干通信误码率的影响研究。大量影响因素分析给空间光混频器实际应用提供了技术参考和设计依据。随着空分复用通信快速发展,空间光混频器也得到进一步应用,包括模分复用通信中少模并行混频^[15]和基于多平面转换的模式解复用空间光混频器^[16]。

由于像差和湍流是空间光混频器中的重要影响因素,研究人员对其格外关注。CHAMBERS D M等建立了波前像差与混频外差效率的模型^[12,17],并进行仿真研究。杨宇飞等在此基础上进一步建立了偏振像差与混频外差效率的数学关系^[18-19],并分析偏振像差对通信性能的影响。不过上述工作集中体现在理论仿真,并未做定量实验研究。DELAUTRE D等通过实验定量研究了倾斜、离焦和大气湍流对混频外差效率的影响^[20],为后续研究提供了重要参考,但其研究对象是激光雷达,探测器靶面为毫米级别。空间相干激光通信多选用高速光电探测器(5 Gbps以上),其探测靶面为几十微米级别或是光纤耦合类型的,在混频及耦合过程中有所不同。为此针对高速光电探测器情况,重新建模及定量实验分析空间输出型(空间靶面)及光纤输出型(光纤耦合)空间光混频器性能受像差湍流影响规律。该工作将为新型空间光混频器设计提供参考,也有利于进一步明确空间光通信像差校正的优先级,为空间激光通信里光学天线的设计和自适应光学的应用提供依据。

为研究像差及湍流对90°空间光混频器性能的影响规律,首先建立了五种初级像差和大气湍流与混频效率的数学仿真模型,得到混频效率与五种初级像差和大气湍流强度的关系曲线,分析像差和湍流对混频效率的影响规律,最后利用基于微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)的变形镜和随机相位板模拟了初级像差和动态湍流,对空间输出型和单模输出型90°空间光混频器进行实验研究,验证了理论仿真结果。

1 空间相干光通信系统及光混频器结构

基于二进制相移键控(Binary Phase Shift Keying, BPSK)的空间零差相干光通信系统如图1,在系统发射端,光学天线将调制了数据码型的载波信号光扩束准直发出;接收端的光学天线接收信号光并将其耦合进混频器,信号光与本振光干涉输出中频光信号,平衡探测器将其转换为电信号;利用平衡探测将直流项相消,输出只有交流项,其中一部分用于数据处理模块进行解调;另一部分经过锁相环控制本振光激光输出的本振光频率和相位与信号光一致,实现锁相。

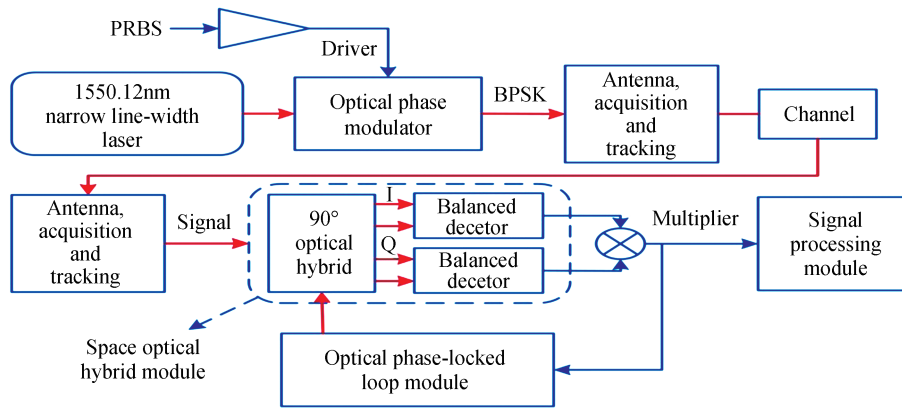


图1 BPSK调制格式的空间零差相干光通信系统

Fig. 1 Spatial homodyne coherent optical communication system based on BPSK modulation format

光混频器的功能是将接收的信号光与本振光干涉叠加,通过偏振器件实现光的分束合束和相位改变,最终输出中频信号,其结构如图2,由偏振分光棱镜(Polarized Beam Splitter, PBS)1/4波片和半波片构成。信号光和本振光都是45°线偏振光,本振光经过1/4波片后转换为圆偏振光,平行分量(P分量)和垂直分量(S分量)相位差为 $\pi/2$,通过PBS实现分离并与信号光实现干涉叠加,最后通过PBS将不同相位的信号分离用于后续平衡探测器接收。目前90°空间光混频输出方式大多为空间输出型和单模输出型,空间输出型90°空间光混频器是指信号光以空间形式输入,混频元件均为块状光学元件,混频分束后的光进入空间平衡探测器;单模输出型90°空间光混频器是与空间输出型原理一样,混频后光耦合到单模光纤平衡探测器。后续研究针对这两种混频器进行分析。

2 空间光混频器性能建模

混频效率是混频器输出性能的重要指标,代表了混频器输出叠加场中本振光与信号光的匹配度,影响混频器输出中频信号的信噪比。

设信号光和本振光的光场分布为^[21]

$$\begin{cases} E_s = A_s[r, \theta] \exp[i(-\omega_s t + \varphi_s)] \\ E_L = A_L[r, \theta] \exp[i(-\omega_L t + \varphi_L)] \end{cases} \quad (1)$$

式中, r, θ 为极坐标参数, $A_s(r, \theta), A_L(r, \theta)$ 为信号光与本振光的光场振幅分布, ω_s, ω_L 分别为信号光和本振光频率, φ_s, φ_L 为信号光和本振光初始相位。

因此两束光在光混频器里进行混频,其光强可表示为

$$I = A_s^2 + A_L^2 + 2A_s A_L \cos(\varphi_s - \varphi_L) \quad (2)$$

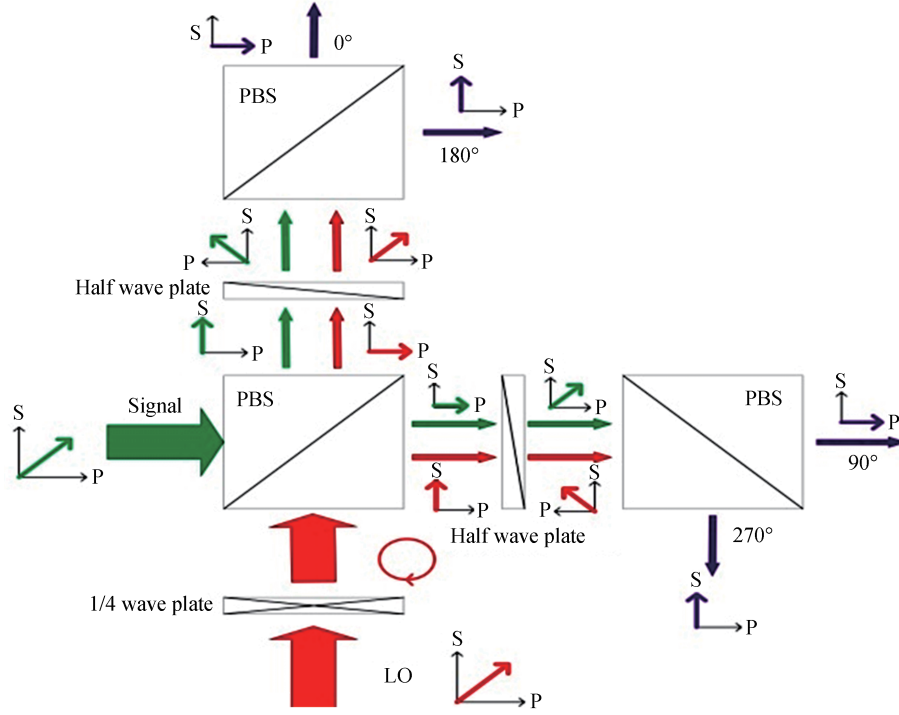


图 2 90°空间光混频器结构
Fig. 2 Schematic of 90° space optical hybrid structure

通过探测器接收转化为电信号, 电流信号均方值可表示为^[22]

$$\langle i^2 \rangle = \left(\frac{e\eta G}{h\nu} \right)^2 \cdot \left[\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} 2A_L(r, \theta) A_S(r, \theta) \cos(\Delta\varphi) r dr d\theta \right]^2 \quad (3)$$

式中, e 为电荷量, ν 为光频率, η 为探测器量子效率, h 为普朗克常量, G 为增益, r_0 为探测器半径, B 为探测器带宽, $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_{LO}$ 。接收到的信号光功率非常微弱, 引起的噪声可忽略, 因此均方噪声电流可表示为

$$\langle i_N^2 \rangle = \frac{2Be^2\eta G^2}{h\nu} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_L(r, \theta)|^2 r dr d\theta \quad (4)$$

通过式(4)和(3)的比值得到信噪比^[23], 信号光总功率为 $P_s = \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_S(r, \theta)|^2 r dr d\theta$, 代入可得

$$\text{SNR} = \frac{2\eta P_s}{Bh\nu} \cdot \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} 2A_L(r, \theta) A_S(r, \theta) \cos(\Delta\varphi) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_L(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_S(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (5)$$

第一项为系统信噪比极限, 第二项的值小于1, 该项即为空间型90°混频器的混频效率^[24]

$$\gamma = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} 2A_S(r, \theta) A_L(r, \theta) \cos(\Delta\varphi) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_S(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_L(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (6)$$

为保证输出中频信号的稳定传输, 目前90°空间光混频器输出端采用单模光纤连接。此时的混频效率与单模光纤的耦合效率有关, 单模光纤耦合效率可表示为^[25]

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} A(r, \theta) M(r, \theta) r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |A(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |M(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (7)$$

式中, r_0 为单模光纤芯径, $A(r, \theta)$ 为参与耦合的光场强度分布, $M(r, \theta)$ 为光纤模场, ω_s 为单模光纤模场半径, 与光纤芯径的关系为 $\omega_s/r_0 = 0.65 + 1.619/V^{3/2} + 2.879/V^6$, 单模光纤归一化频率满足 $1.9 \leq V \leq 2.4$ 。单模光纤中传输光束近似为高斯光束^[26], 即

$$\begin{cases} M(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega_s^2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s^2}\right) \\ \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |M(r)|^2 r dr d\theta = 1 \end{cases} \quad (8)$$

信号光和本振光单独输入时, 耦合效率可分别表示为

$$\begin{cases} \eta_s = \frac{\left| \int_0^{r_0} E_s(r) M(r) r dr \right|^2}{\int_0^{\infty} |E_s(r)|^2 r dr} \\ \eta_L = \frac{\left| \int_0^{r_0} E_L(r) M(r) r dr \right|^2}{\int_0^{\infty} |E_L(r)|^2 r dr} \end{cases} \quad (9)$$

接收到的信号光波前近似为平面波, 经光学接收天线成像后光场分布为艾里分布, 本振光光场为高斯分布。因此将本振光和信号光的光场分布与单模光纤模场带入式(7)中, 可得到单模光纤对叠加光场的耦合效率为

$$\eta_{SL} = \frac{\left| \int_0^{r_0} \frac{A_s^2 \pi^2 d^4}{\omega_s^2 \lambda_s^2 f^2} \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s'^2}\right) r dr d\theta + \frac{4A_L^2}{\omega_s^2} \int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s'^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s'^2}\right) r dr d\theta \right|^2}{\frac{A_s^2 \pi^2 d^4}{4\lambda_s^2 f^2} \int_0^{\infty} \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \right|^2 r dr + A_L^2 \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s'^2}\right) r dr} \quad (10)$$

则单模光纤输出型的90°空间光混频器的混频效率为

$$\gamma_{SMF} = \frac{\eta_{SL}}{\eta_L} \gamma \quad (11)$$

3 空间光混频器性能仿真分析

3.1 初级像差对空间混频器混频效率影响

光束的波前畸变会使两束相干光之间产生相位误差, 导致混频效率降低。光束波前畸变的来源主要有两点: 1) 接收天线光学系统产生的像差引入波前畸变; 2) 信道湍流扰动引起的波前畸变。在波前分析中光束的波前畸变通常可以用初级像差的线性组合表示。在数学上波前畸变可以用一组相互正交的Zernike多项式来描述, 其极坐标下的表达式为^[27]

$$\varphi(r, \theta) = a_0 + \sum_{k=1}^N a_k Z_k(r, \theta) \quad (12)$$

式中, θ 表示极角, r 表示极轴, a_0 是常数值, $Z_k(r, \theta)$ 是第 k 项 Zernike 多项式, a_k 是 Zernike 多项式系数。 $Z_k(r, \theta)$ 可表示为^[28]

$$\begin{cases} Z_{\text{even } k}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \cos(m\theta) & m \neq 0 \\ Z_{\text{odd } k}(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^m(r) \sin(m\theta) & m \neq 0 \\ Z_k(r, \theta) = \sqrt{2(n+1)} R_n^0(r) & m = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$R_n^m(r) = \sum_s^{\frac{(n-m)/2}{s}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2 - s]! \times [(n-m)/2 - s]!} r^{(n-2s)} \quad m < n, n - |m| = \text{even} \quad (14)$$

式中, $Z_{\text{even } k}(r, \theta)$ 为 Zernike 多项式的偶数项, m, n 分别是角向频率和径向频率数, $Z_{\text{odd } k}(r, \theta)$ 表示 Zernike 多项式的奇数项, $Z_k(r, \theta)$ 表示 $m=0$ 的项, $n - |m| = \text{even}$ 表示 $n - |m|$ 的取值为偶数。

常见的五种初级像差可分为倾斜、离焦、像散、彗差、球差。Zernike 多项式中, 第 1 和 2 项 ($n=1$) 对应于倾斜像差, 使像斑在像平面上漂移。第 4 项 ($n=2$) 对应于离焦, 第 3、5 项 ($n=2$) 对应于像散, 第 7、8 项 ($n=3$) 对应于彗差项, 第 12 项 ($n=4$) 对应于球差。通常初级像差可用 Zernike 项表示为^[29]

$$\begin{cases} W_{\text{tilt}}(\rho, \theta) = k\rho \cos\theta = \frac{k}{2} Z_1^{-1} \\ W_{\text{defocus}}(\rho, \theta) = k\rho^2 = k \left(\frac{Z_2^0 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \right) \\ W_{\text{astigmatism}}(\rho, \theta) = k\rho^2 \cos\theta = k \frac{Z_2^2}{\sqrt{6}} \\ W_{\text{coma}}(\rho, \theta) = k\rho^3 \cos\theta = k \left(\frac{Z_3^1 + 3Z_1^1}{3\sqrt{8}} \right) \\ W_{\text{spherical aberration}}(\rho, \theta) = k\rho^4 = \frac{k}{6} \left(\frac{Z_4^0}{\sqrt{5}} + \sqrt{3} Z_2^0 + 2 \right) \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入式(6)得到含有像差影响的空间型 90°混频器的混频效率表达式

$$\gamma = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} 2A_s(r, \theta) A_L(r, \theta) \cos[kW_x(\rho, \theta)] r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |A_s(r, \theta)|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} |A_L(r, \theta)|^2 r dr d\theta} \quad (16)$$

式中, $\rho = r/r_0, k = 2\pi/\lambda$ 为信号光波数。信号光被光学系统会聚后一般为艾里分布, 所以采用艾里-高斯模型分析各类像差对混频效率的影响, 得到像差条件下单模输出型 90°空间光混频器的混频效率表达式为

$$\gamma_w = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega'_{0,2}}\right) \cdot \cos[k_s W_x(\rho, \theta)] \cdot r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \right|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega'_{0,2}}\right) r dr d\theta} \quad (17)$$

仿真分析倾斜、离焦、像散、彗差、球差五种初级像差对空间输出和单模光纤输出的空间光混频器混频效率的影响,设光学系统的 F 数为5,聚焦后光斑束腰为光纤模场半径 $r=5\ \mu\text{m}$,信号光和本振光波长为 $\lambda_s=\lambda_L=1\ 550\ \text{nm}$ 。

图3(a)~(c)分别为空间探测器靶面半径 $50\ \mu\text{m}$ 、 $25\ \mu\text{m}$ 、 $10\ \mu\text{m}$ 条件下,五种初级像差对空间输出型90°空间光混频器混频效率的影响。靶面半径 $50\ \mu\text{m}$ 时,无像差时混频效率为81.1%,像差量为 0.2λ 的倾斜、球差、离焦、彗差和像散分别导致混频效率下降9.8%、0.6%、0.36%、0.02%和0.01%;靶面半径 $25\ \mu\text{m}$ 时,无像差时混频效率为80.46%,像差量为 0.2λ 的倾斜、离焦、球差、像散和彗差分别导致混频效率下降8.69%、1.44%、0.39%、0.06%和0.06%;靶面半径为 $10\ \mu\text{m}$ 时,无像差时混频效率为80.76%,像差量为 0.2λ 的倾斜、离焦、像散、球差和彗差分别导致混频效率下降8.83%、4.78%、2.46%、0.82%和0.26%。通过对比图3(a)、(b)、(c)三图可发现,倾斜像差对混频效率影响最大,当探测器接收靶面面积减小时,混频效率整体减小,并且离焦和像散的影响增大,彗差和球差对混频效率的影响始终很小。

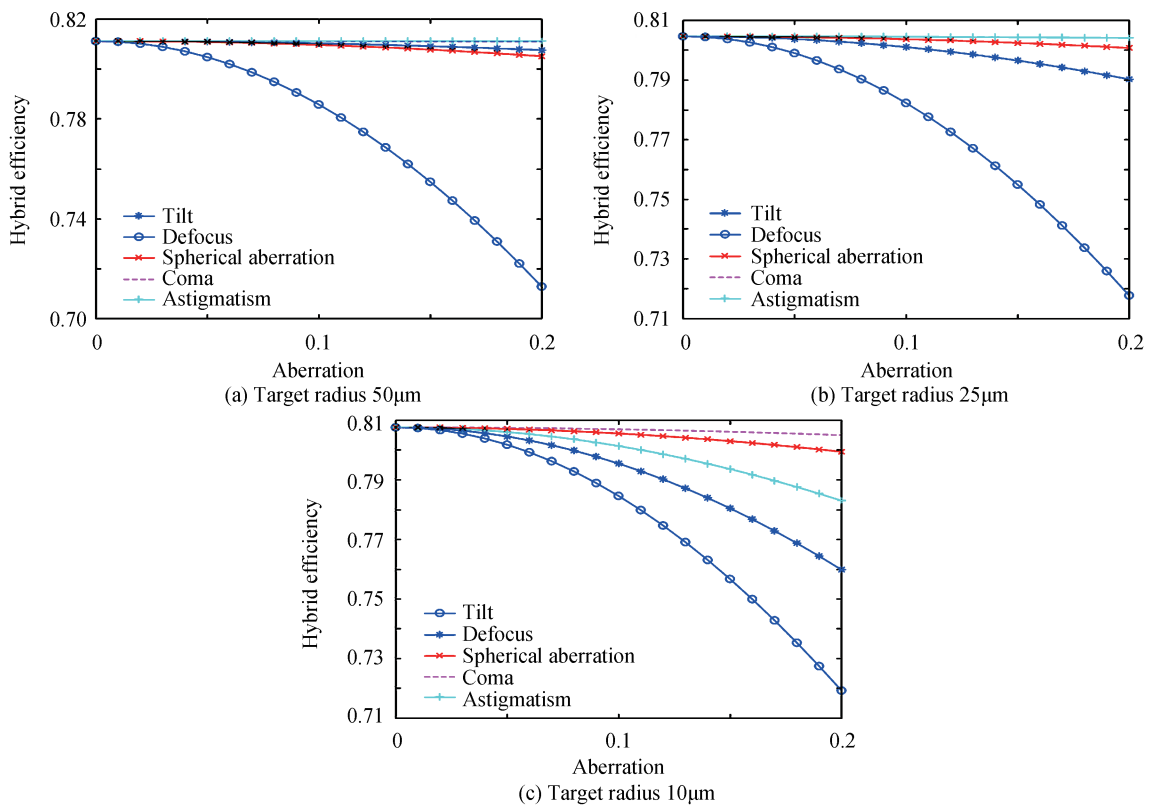


图3 不同靶面半径条件下五种初级像差对空间输出型90°空间光混频器混频效率影响曲线

Fig. 3 The influence curve of five primary aberrations on the hybrid efficiency of the space output 90° space optical hybrid under different target radius conditions

一般单模光纤纤芯直径为 $9\ \mu\text{m}$ 。图4为五种初级像差对单模光纤输出的90°空间光混频器混频效率的影响曲线,从图4中可以看出在相同光学接收系统条件下,五种初级像差对单模输出型90°空间光混频器混频效率的影响程度不同,无像差时混频效率为52.78%,像差量为 0.2λ 的倾斜、像散、离焦、彗差和球差分别导致混频效率下降14.11%、8.39%、6.35%、2.63%和1.13%。对于单模输出型90°空间光混频器,由于单模光纤纤芯直径远小于空间型光电探测器靶面,混频效率整体低于空间输出型90°空间光混频器,初级像差对混频效率的衰减程度为倾斜>像散>离焦>彗差>球差。

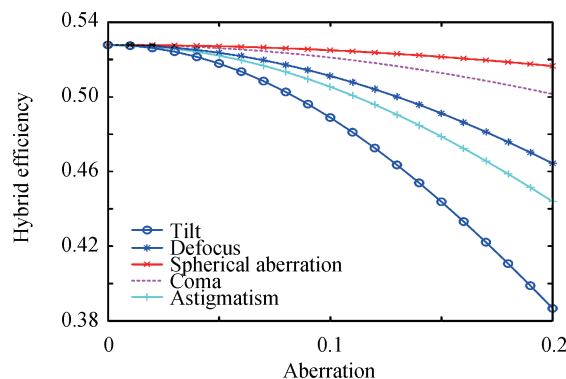


图4 五种初级像差对单模输出型90°空间光混频器混频效率的影响曲线

Fig. 4 The influence curve of five primary aberrations on the hybrid efficiency of the single-mode output type 90° space light hybrid

3.2 大气湍流对空间混频器性能影响

空间相干光通信链路中存在大气湍流,会引起信号光的光强闪烁和波前畸变,其中湍流引入的波前畸变是多种初级像差的组合,可以用基于Von Karman湍流谱模型的平均相位延迟量表示^[8]

$$\langle \varphi_T^2 \rangle = 0.782 L k^2 C_n^2 L_0^{5/3} \quad (18)$$

式中, L 为传输距离, L_0 为湍流外尺度, C_n^2 为大气湍流折射率常量, $k=2\pi/\lambda$ 为信号光波数。由式(11),包含湍流相位延迟的混频效率表达式为

$$\gamma_T = \frac{\left| \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0'^2}\right) \cdot \cos(\varphi_T) \cdot r dr d\theta \right|^2}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left| \frac{J_1\left(\frac{\pi r}{F\lambda_s}\right)}{\frac{\pi r}{F\lambda_s}} \right|^2 r dr d\theta \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_0'^2}\right) \left| \right|^2 r dr d\theta} \quad (19)$$

当湍流扰动引入的平均相位延迟 $\varphi_T > 2\pi/\lambda$ 时,相位差波动过大,无法满足干涉条件。设探测器直径为0.2 mm,湍流外尺度 $L_0=1$ m,传输距离 $L=1000$ m,接收靶面半径50 μm 的空间输出型和单模输出型的空间光混频器的混频效率与大气湍流强度的关系如图5。

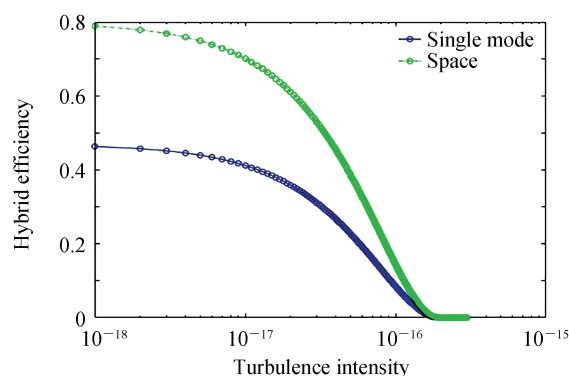


图5 混频效率与湍流强度关系曲线

Fig. 5 Relation curve between hybrid efficiency and turbulence intensity

通常 $C_n^2 < 6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ 为弱湍流, $6.4 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3} < C_n^2 < 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 为中强度湍流, $C_n^2 > 2.5 \times 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 为强湍流。由图5可知,弱湍流条件下混频效率衰减较小,空间输出型比单模输出型90°空间光混频器

的混频效率高19%以上,随着大气湍流强度的增加,湍流导致的相位延迟使混频效率逐渐降低,在湍流强度 $C_n^2 > 6.4 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$ 时,混频效率接近为0,此为只考虑湍流强度对混频效率影响的结果,强湍流条件下无法实现通信。采用空间输出的90°空间光混频器,其接收靶面比单模光纤芯径更大所以抗湍流效果更好。

4 90°空间光混频器性能实验

4.1 初级像差性能影响实验

空间输出型和单模输出型90°空间光混频器,如图6所示。空间输出型90°混频器的信号光输入端直径为13 mm,空间型探测器靶面直径为100 μm 。单模输出型90°混频器的信号光输入端直径为15 mm,单模光纤芯径为9 μm 。MEMS可变形反射镜(DM140A-35-UP01),通过140个单独控制的使薄膜变形,适用波段1 050~1 700 nm;哈特曼波前传感器(Optino-NIR),共45×45个微透镜区域,采用InGaAs相机,适用波段950~1 700 nm。

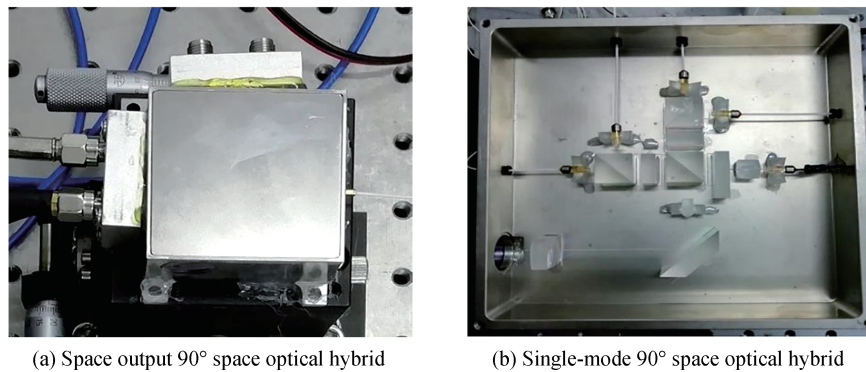


图6 90°空间光混频器
Fig. 6 90° space optical hybrid

为测试初级像差对90°空间光混频器性能的影响,利用MEMS变形镜将特定像差的波前畸变引入信号光中,通过分光棱镜将一部分光分出,通过Optino-NIR哈特曼波前传感器测量信号光波前,利用探测器和示波器测量90°空间光混频器输出的拍频信号的峰峰值。实验平台如图7,实验中信号光与本振光的波长均为

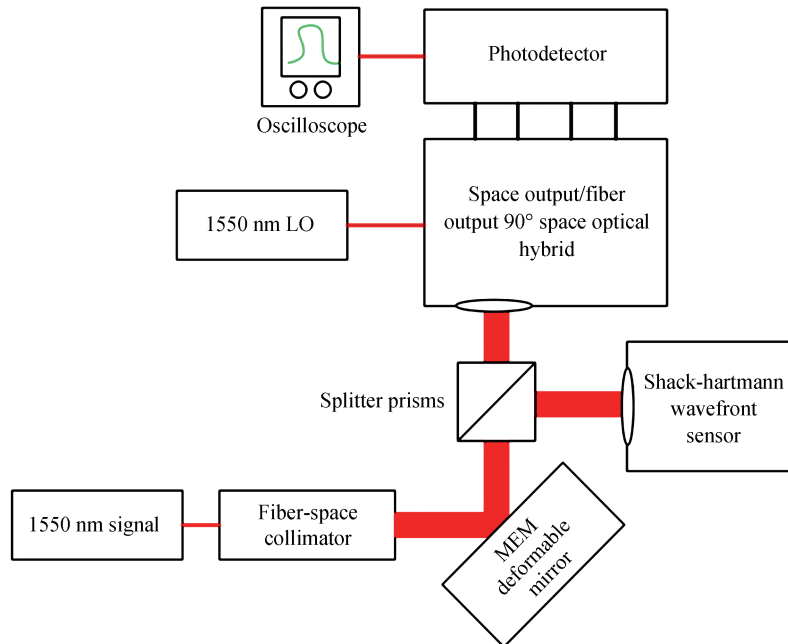


图7 初级像差对混频效率影响实验光路
Fig. 7 The effect of primary aberration on mixing efficiency experimental optical path

1 550 nm, 本振光功率为 10 dBm, 信号光功率为 6 dBm, 频差控制在 25 MHz 以内。MEMS 变形镜模拟的五种初级像差波前如图 8, 实验模拟的五种初级像差与 Zernike 多项式仿真得到的初级像差基本吻合。实验中信号光功率和本振光功率保持不变, 因此可以通过比较引入像差时拍频信号的峰峰值与无像差条件下拍频信号峰峰值大小, 间接得到混频效率的变化趋势。

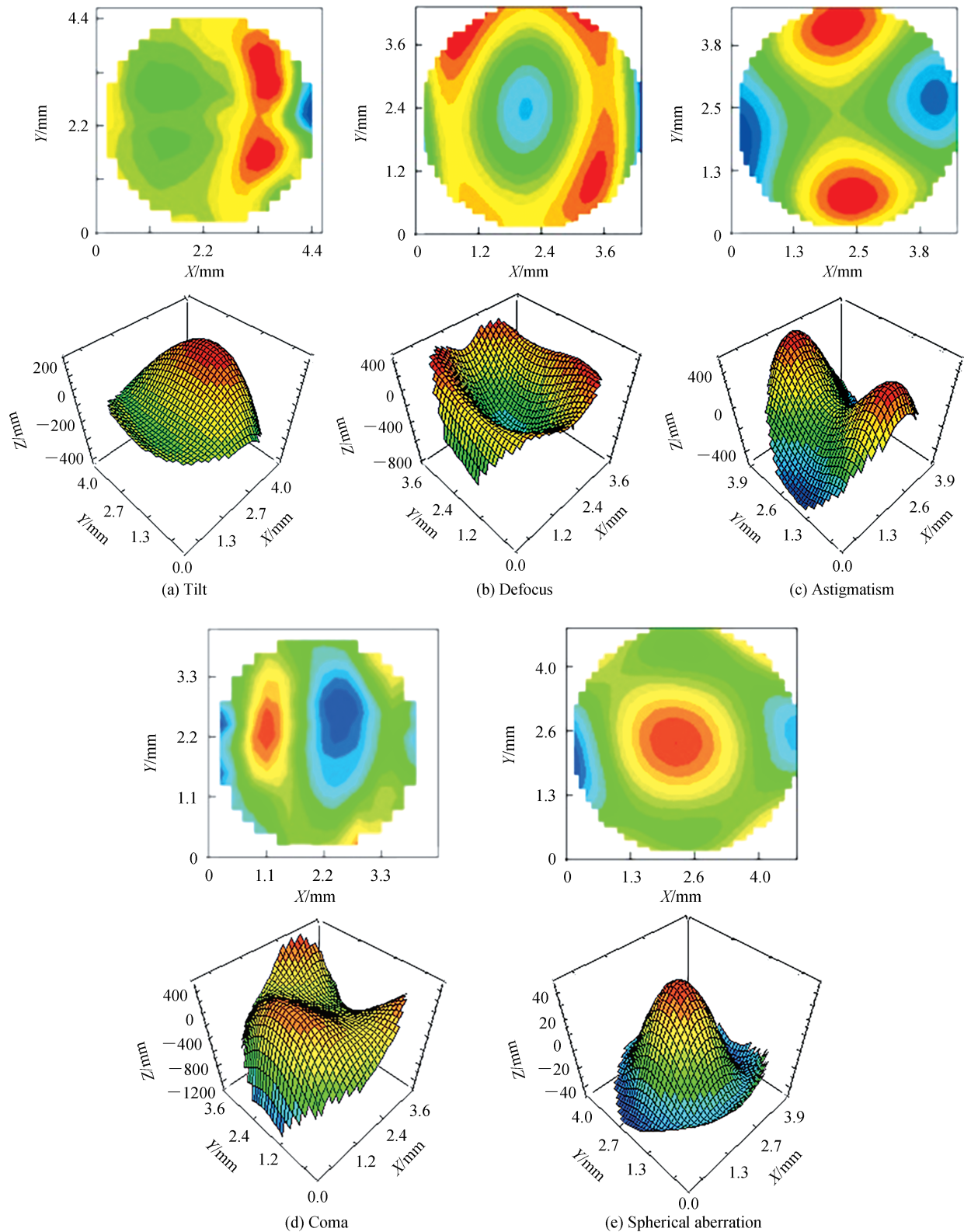


图 8 实验模拟的五种初级像差的二维图和三维图

Fig. 8 Two-dimensional and three-dimensional images of five primary aberrations simulated by the experiment

首先测量像差对混频效率的影响,先测量无像差条件下,信号光和本振光同时输入90°空间光混频器得到拍频信号,测量拍频信号的峰峰值 A_0 ,然后通过MEMS变形镜对信号光引入不同强度的初级像差,测量得到存在像差条件下拍频信号的峰峰值 A_n ,计算与 A_n 的比值 A_n/A_0 ,绘制曲线如图9,得到不同强度的初级像差对空间输出型和单模输出型90°空间光混频器混频效率的影响规律。然后测量得到无像差引入条件下,信号光单独输入单模输出型90°空间光混频器时输出端口测得的光功率 P_0 ,然后通过MEMS变形镜引入不同强度的初级像差,测量得到存在像差条件下90°空间光混频器输出端口的光功率 P_n ,计算 P_n 与 P_0 的比值 P_n/P_0 ,绘制曲线如图10,得到不同强度的初级像差对单模光纤耦合效率的影响规律。

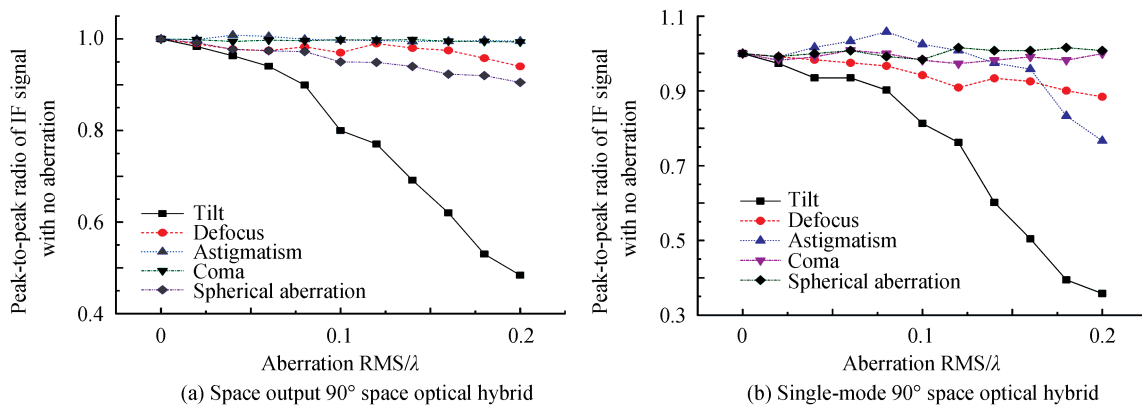


图9 中频信号在有像差时和无像差时输出峰峰值比

Fig. 9 Intermediate frequency signal output peak-to-peak ratio with aberration and without aberration

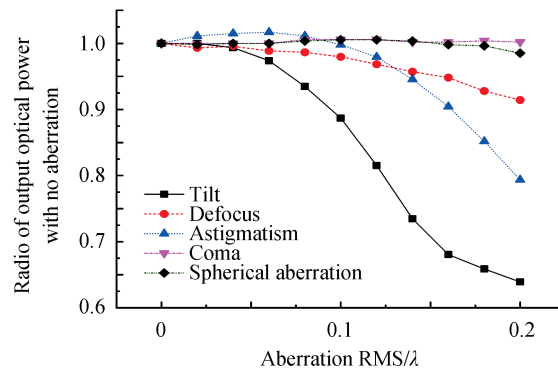


图10 信号光单独输入混频器时有像差和无像差时输出光功率比

Fig. 10 The ratio of the output optical power when the signal light is input to the hybrid alone with and without aberration

从图9(a)中可以看出五种像差对空间输出型90°空间光混频器混频效率的影响程度不同。倾斜对混频效率的影响最大,当引入的倾斜量为 0.2λ 时,混频效率相对无像差时下降52%;引入球差量为 0.2λ 时,混频效率相对无像差时下降10%;当引入的离焦量为 0.2λ 时,混频效率相对于无像差时下降6%;彗差和像散对混频效率几乎没有影响;从图9(b)中可以看出五种初级像差对单模输出型90°空间光混频器混频效率的影响程度不同。倾斜对混频效率的影响最大,当引入的倾斜量为 0.2λ 时,混频效率相对无像差时下降65%;引入像散量为 0.2λ 时,混频效率相对无像差时下降24%;当引入的离焦量为 0.2λ 时,混频效率相对无像差时下降11%;彗差和球差对混频效率几乎没有影响。

从图10中可以看出五种初级像差对单模光纤的耦合效率的影响程度不同,倾斜对耦合效率的影响最大,当引入的倾斜量为 0.2λ 时,耦合效率相对无像差时下降37%;引入像散量为 0.2λ 时,耦合效率相对无像差时下降19%;当引入的离焦量为 0.2λ 时,耦合效率相对无像差时下降8%;彗差和球差对耦合效率几乎没有影响。当像散和离焦量小于 0.15λ 时,离焦造成的耦合效率降低比像散的多,与理论仿真结果不同,经分析可能是因为引入的像散量刚好校正了扩束准直光学系统本身存在的像差,导致耦合输出的光功率有所升高。

由于实验中存在对准误差和测量误差,实验结果中像差引起的混频效率下降值大于仿真结果,空间型

探测器的靶面直径为 $100\ \mu\text{m}$, 初级像差对空间输出型 90° 空间光混频器混频效率的衰减程度为倾斜 $>$ 球差 $>$ 离焦 $>$ 彗差 \approx 像散; 初级像差对单模输出型 90° 空间光混频器混频效率的衰减程度为倾斜 $>$ 像散 $>$ 离焦 $>$ 彗差 $>$ 球差, 和仿真结果一致。

4.2 动态湍流模拟实验

通过在玻璃基板上喷涂多层 Amphomer(一种丙烯酸(酯)类/辛基丙烯酸酰胺共聚物)制作得到随机相位板^[30]。制作的两片随机相位板通过 ZEGO 干涉仪测得整体相位分布如图 11, 相位分布 PV 值分别为 26.756λ 和 3.981λ , RMS 值分别为 4.311λ 和 0.499λ 。通过哈特曼波前传感器测得的局部相位分布分别如图 12 所示, 相位板不同位置引入的相位畸变不同, 因此通过旋转相位板来模拟动态的湍流效果是可行的, 同时可以改

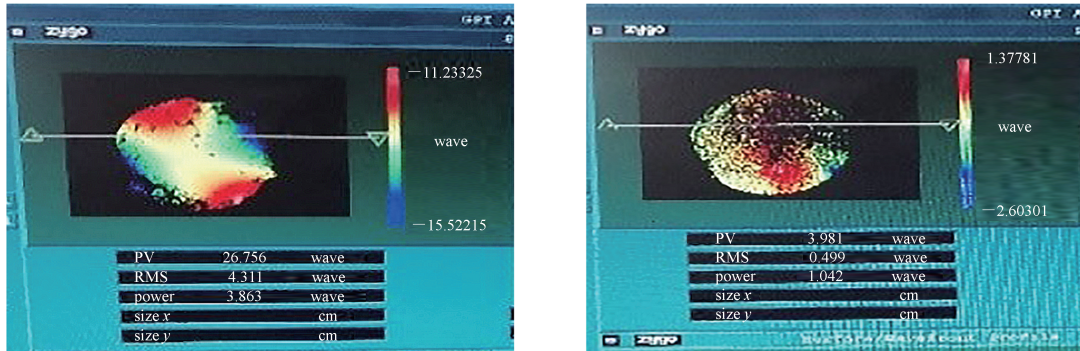


图 11 随机相位板整体相位分布

Fig. 11 Random phase plate overall phase distribution

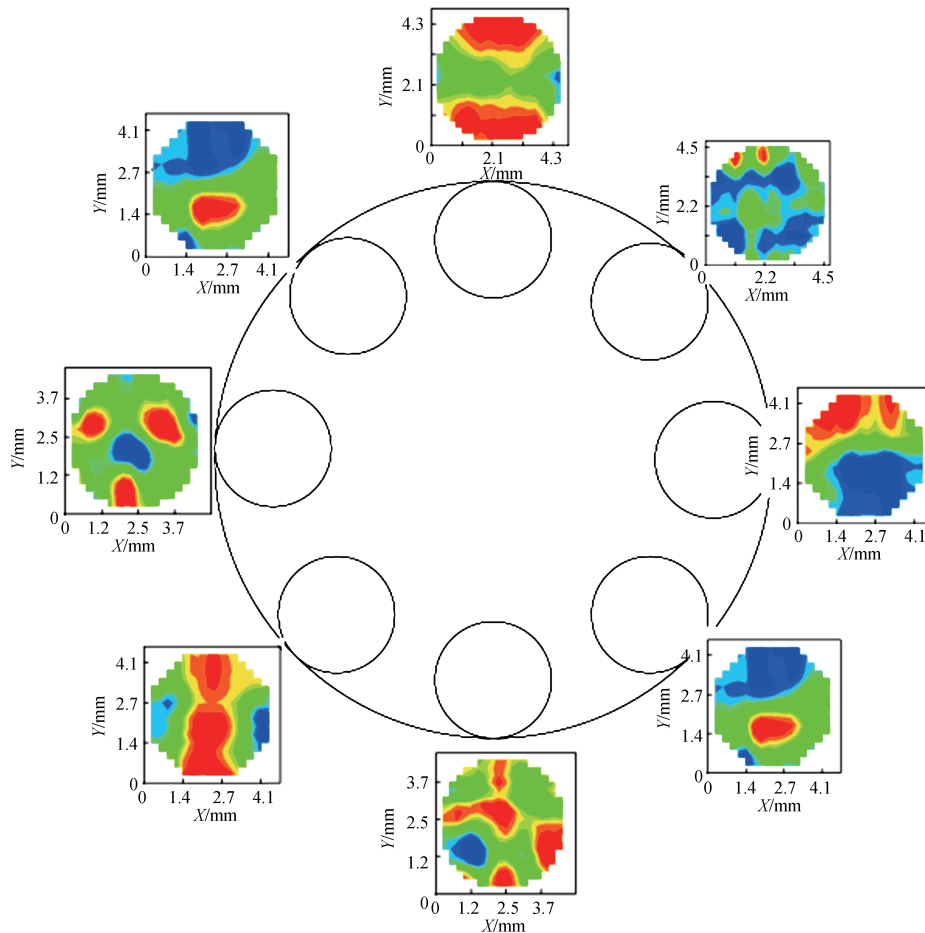


图 12 随机相位板不同位置引入的波前像差

Fig. 12 Wavefront aberration introduced by different positions of random phase plate

变相位板数量来模拟不同强度的动态湍流。

通过电控旋转台驱动随机相位板旋转来模拟动态的大气湍流,实验光路如图 13。利用示波器记录 90°空间光混频器的幅值变化,如图 14。5 min 内对 中频信号进行 20 次随机采样记录其峰峰值,数据分布如图 15。湍流片旋转时不同位置上引入的波前畸变不同,导致混频效率的抖动致使拍频信号峰峰值抖动,验证了使用在玻璃基板上喷涂多层 Amphomer(一种丙烯酸(酯)类/辛基丙烯酸酰胺共聚物)制作的随机相位板对动态大气湍流进行简单模拟的可行性。对于空间输出型 90°空间光混频器,用一片相位板时,中频信号最大峰峰值为 128.4 mV,均值为 90.245 mV,标准差为 21.388;当相位板数增加为两片时,峰峰值整体降低,最大峰峰值为 97.2 mV,均值为 58.08 mV,标准差为 19.743;对于单模输出型 90°空间光混频器,用一片相位板时,中频信号最大峰峰值为 960 mV,均值为 421 mV,标准差为 247.442;当相位板数增加为两片时,峰峰值整体降低,最大峰峰值为 436 mV,均值为 151 mV,标准差为 102.925;说明当模拟的湍流强度增加时,90°空间光混频器输出的中频信号峰峰值减小,在信号光和本振光强度不变的条件下意味着混频效率降低,空间输出型相比于单模输出型 90°空间光混频器标准差较小,证明了空间输出型比单模输出型 90°空间光混频器的抗湍流能力强。

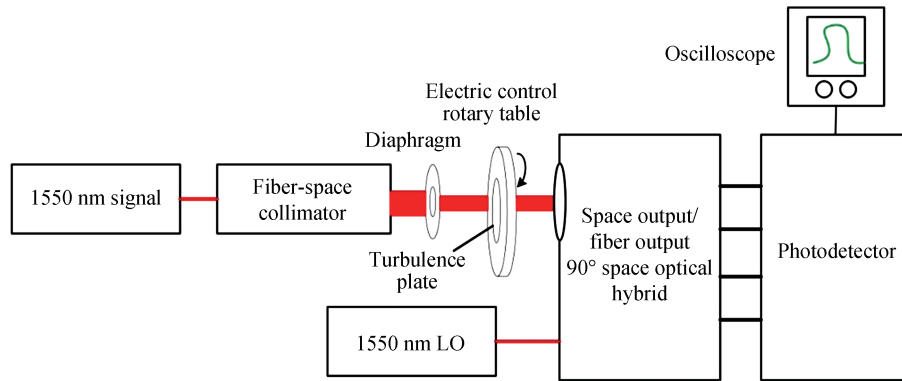


图 13 动态湍流模拟实验

Fig. 13 Dynamic turbulence simulation experiment

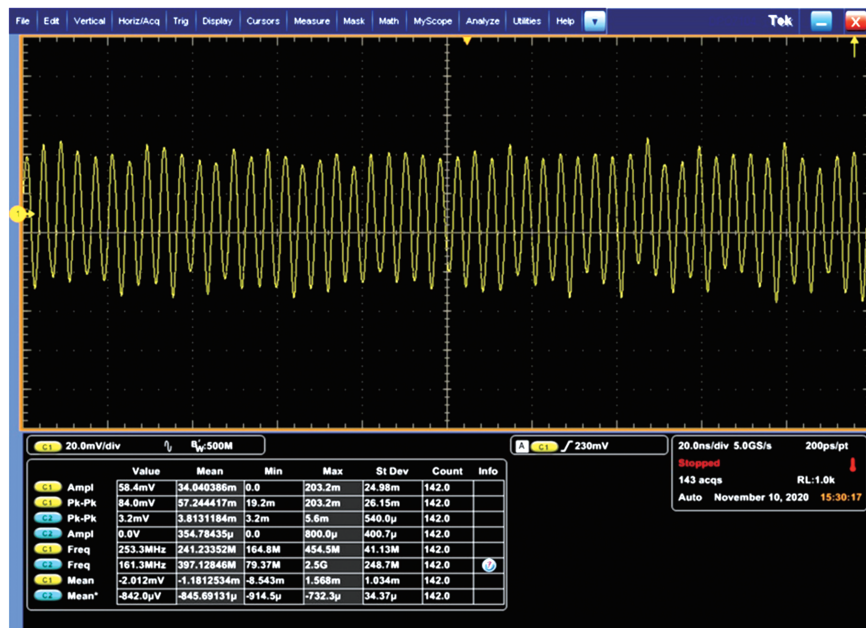


图 14 90°空间光混频器的幅值变化

Fig. 14 Amplitude change of 90° space optical hybrid

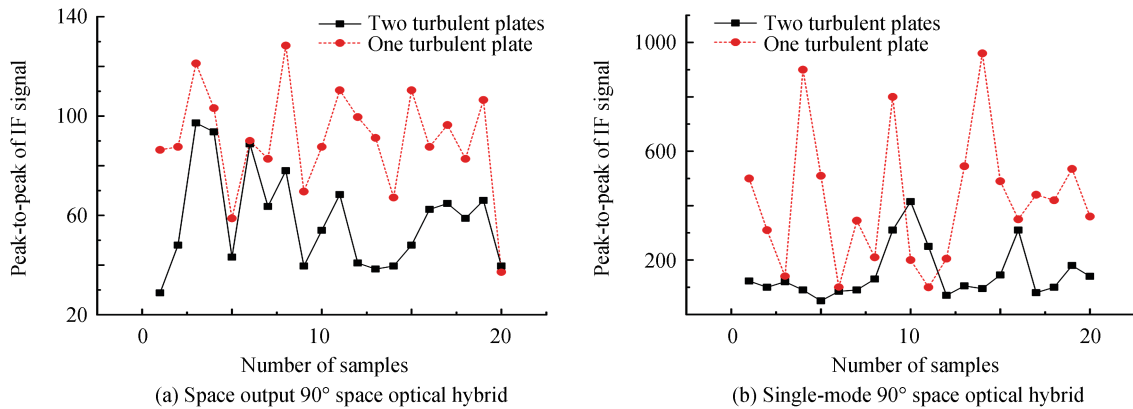


图 15 5min 内 20 个采样点的中频信号峰峰值

Fig. 15 Peak-to-peak Intermediate frequency signal at 20 sampling points within 5 minutes

5 结论

本文研究了像差和湍流对空间输出型和单模输出型 90°空间光混频器混频效率的影响。仿真分析了五种初级像差和大气湍流对空间输出型和单模输出型 90°空间光混频器混频效率的影响。像差量为 0.2λ 的倾斜、像散、离焦、彗差和球差,探测器靶面半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的空间输出型相比于单模输出型混频器混频效率性能分别提升了 4.31%、8.38%、5.99%、2.61% 和 0.53%。在弱湍流下,空间输出型比单模输出型混频器的混频效率高 19% 以上。

实验结果表明,像差量为 0.2λ 的倾斜、像散、离焦和彗差,探测器靶面半径为 $50\ \mu\text{m}$ 的空间输出型相比于单模输出型混频器对混频效率性能分别提升了 13%、24%、5% 和 0,而像差量为 0.2λ 的球差下单模输出型性能优于空间输出型的混频效率 10%,经分析可能是引入的球差量校正了单模输出型耦合透镜本身存在的像差。在湍流实验中,空间输出型混频器中频信号值的标准差 21.388,远低于单模输出型标准差 247.442,证明了在像差和大气湍流下空间输出型比单模输出型 90°空间光混频器的混频效率更好。该工作将为新型空间光混频器设计提供参考,推动空间相干激光通信进一步实用化。

参考文献

- [1] 姜会林,佟首峰.空间激光通信技术与系统[M].国防工业出版社:北京,2010:134-136.
- [2] CHEN Weibiao, SUN Jianfeng, HOU Xia, et al. 5.12 Gbps optical communication link between LEO satellite and ground station[C].2017 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), IEEE, 2017: 260-263.
- [3] ZHOU Yu, SUN Jianfeng, YAN Aimin, et al. Self-homodyne interferometric detection in 2×4 optical hybrid for free-space optical communication[C].Free-Space Laser Communications X, International Society for Optics and Photonics, 2010, 7814: 781412.
- [4] WAN Lingyu. Optical 90-deg hybrid of birefringent crystals for freely propagating laser beams[J]. Optical Engineering, 2010, 49(12): 125004.
- [5] 郑阳,郑建平.垂直型 90 度空间光混频器[P].CN105068257A.2015.
- [6] 郑阳,贺文俊,郑建平.平铺型 90 度空间光混频器[P].CN105005151A.2015.
- [7] 张鹏,南航,李晓燕,等.分光比自适应调控的空间光 90 混频器[P].CN107132663A.2017.
- [8] NAN Hang, ZHANG Peng, TONG Shoufeng, et al. Performance analysis of free space coherent optical communication in atmosphere turbulence with tracking error[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 56-61.
南航,张鹏,佟首峰,等.大气湍流下带有跟踪误差的空间相干光通信性能分析[J].光子学报, 2015, 44(8): 56-61.
- [9] LI Xiaoyan, ZHAO Xiaohui, ZHANG Peng, et al. BER performance of FSOC system with differential signaling over partially correlated atmospheric turbulence fading and partially correlated pointing errors[J]. Optics Communications, 2020, 457: 124545.
- [10] SALEM M, ROLLAND J P. Heterodyne efficiency of a detection system for partially coherent beams[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision, 2010, 27(5): 1111-1119.
- [11] NAN Hang, ZHANG Peng, TONG Shoufeng, et al. Analysis and optimization of splitting performance for space optical hybrid[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1748-1756.
南航,张鹏,佟首峰,等.空间光混频器分光性能的分析与优化[J].光学精密工程, 2017, 25(7): 1748-1756.

- [12] CHAMBERS D M. Modeling heterodyne efficiency for coherent laser radar in the presence of aberrations [J]. *Optics Express*, 1997, 1(3): 60-67.
- [13] NAN Hang, ZHANG Peng, TONG Shoufeng, et al. Analysis of the effect of light spot size and ray axis deflection on heterodyne efficiency of space optical hybrid[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 198-205.
南航, 张鹏, 佟首峰, 等. 光斑尺寸偏差和光轴偏转对空间光混频器混频效率的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(4): 198-205.
- [14] ZHANG Peng, QIN Kaiyu, HUANG Jian, et al. Influences of hybrid phase-shift error on the performance of optical coherent receivers[J]. *Optics Communications*, 2015, 344: 113-119.
- [15] WANG Yongben, ZHAO Ningbo, YANG Zhiqun, et al. Few-mode SDM receivers exploiting parallelism of free space [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019: 1-11.
- [16] WEN He, LIU Huiyuan, ZHANG Yuanhang, et al. Mode demultiplexing hybrids for mode-division multiplexing coherent receivers[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(8): 917-925.
- [17] XIANG Jinsong, PAN Lechun. Heterodyne efficiency and the effects of aberration for space coherent optical communication[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(11): 53-57.
向劲松, 潘乐春. 空间相干光通信外差效率及天线像差的影响[J]. *光电工程*, 2009, 36(11): 53-57.
- [18] YANG Yufei, YAN Changxiang, HU Chunhui, et al. Modified heterodyne efficiency for coherent laser communication in the presence of polarization aberrations [J]. *Optics Express*, 2017, 25(7): 7567-7591.
- [19] YANG Yufei, YAN Changxiang, HU Chunhui, et al. Polarization aberration analysis of coherent laser communication system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106003.
杨宇飞, 颜昌翔, 胡春晖, 等. 相干激光通信光学系统偏振像差研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106003.
- [20] DELAUTRE D, BREUGNOT S, LAUDE V. Measurement of the sensitivity of heterodyne detection to aberrations using a programmable liquid-crystal modulator[J]. *Optics communications*, 1999, 160(1-3): 61-65.
- [21] 郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 机械工业出版社: 北京, 2016: 509-514.
- [22] COHEN S C. Heterodyne detection: phase front alignment, beam spot size, and detector uniformity [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(8): 1953-1959.
- [23] KONG Yingxiu, KE Xizheng, YANG Yuan. Influence research of atmospheric turbulence on space coherent optical communications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(8): 95-101.
孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 大气湍流对空间相干光通信的影响研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(8): 95-101.
- [24] 王圆鑫. 空间光混频器性能的影响因素研究[D]. 长春理工大学, 2019.
- [25] WINZER P J, LEEB W R. Fiber coupling efficiency for random light and its applications to lidar [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(13): 986-988.
- [26] LUO Wen, GENG Chao, LI Xinyang. Simulation and experimental study of single-mode fiber coupling efficiency affected by atmospheric turbulence aberration[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 46-52.
罗文, 耿超, 李新阳. 大气湍流像差对单模光纤耦合效率的影响分析及实验研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 46-52.
- [27] YANG Yuqiang, TAN Liying, MA Jing, et al. Influence of spherical aberration and coma on far-field behavior of signal beam in intersatellite optical communications[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(s1): 129-133.
杨玉强, 谭立英, 马晶, 等. 星间光通信中球差和彗差对信号光远场特性的影响[J]. *中国激光*, 2008, 35(s1): 129-133.
- [28] WANG J Y, SILVA D E. Wave-front interpretation with Zernike polynomials[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(9): 1510-1518.
- [29] MAEDA P Y. Zernike polynomials and their use in describing the wavefront aberrations of the human eye [J]. *Course Project, Applied Vision and Imaging Systems Psych*, 2003, 221: 362.
- [30] THOMAS S. A simple turbulence simulator for adaptive optics [C]. *Advancements in Adaptive Optics*, International Society for Optics and Photonics, 2004, 5490: 766-773.