

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

南航^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 佟首峰^{1,2}, 马婷婷^{1,2}, 全光恒^{1,2}, 曹海帅^{1,2}, 范雪冰^{1,2}

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学空间光电技术国家与地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 研究了光学元件装调加工误差引起的光斑尺寸和光轴偏转对空间光混频器混频效率的影响。推导了高斯模型下的光混频效率表达式, 得到当光斑尺寸与靶面尺寸的比例为 0.64 时, 混频效率最高。在此基础上推导了光斑尺寸偏差、光轴偏转与光混频效率的表达式。并进行仿真分析, 得到光斑尺寸偏差、光轴偏转与光混频效率变化曲线。当混频效率大于 10% 时, 光斑尺寸偏差范围为 $-42 \sim 250 \mu\text{m}$, 光轴偏转范围为 $203 \mu\text{rad}$ 。通过计算光斑尺寸偏差和光轴偏转综合误差发现, 调整光斑尺寸偏差可以改善光轴偏转带来的混频效率恶化。进一步搭建空间光混频器影响因素实验平台, 进行了三种光斑尺寸偏差下光混频效率随光轴偏转变化的实验。实验所测曲线与仿真结果趋势一致, 受实验器件插入损耗的影响, 实验值略低于仿真值。所得影响规律为空间光混频器设计、装调和加工提供了一定参考。

关键词: 光混频效率; 光斑尺寸; 光轴偏转; 空间光混频器

中图分类号: TN929.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0422001

Analysis of the effect of light spot size and ray axis deflection on heterodyne efficiency of space optical hybrid

Nan Hang^{1,2}, Zhang Peng^{1,2}, Tong Shoufeng^{1,2}, Ma Tingting^{1,2},
Tong Guangheng^{1,2}, Cao Haishuai^{1,2}, Fan Xuebing^{1,2}

(1. College of Optoelectronic 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)

Abstract: Effect of light spot size and optical axis deflection on heterodyne efficiency of space optical hybrid was focused on in this paper. With deduction of the heterodyne efficiency expression based on Gaussian model, the result shows that when the proportion of the light spot size and target plane equals 0.64, the heterodyne efficiency reaches optimal. Then by calculating and simulating the expressions which included spot size deviation and optical axis deflection, the curve of relation between heterodyne efficiency and spot size deviation and optical axis deflection was obtained. By these works several results can be shown: Firstly, the scope of spot size deviation is between $-42 \mu\text{m}$ and $250 \mu\text{m}$ and the scope of axis deflection is $203 \mu\text{rad}$ when heterodyne efficiency is 10%. Besides, by calculating the spot size

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(91438204); 吉林省教育厅基金(2015-77); 吉林省优秀青年人才项目(20170520161JH)

作者简介: 南航(1988-), 男, 博士生, 主要从事相干光通信、空间光混频技术方面的研究。Email: sirsam@163.com

导师简介: 佟首峰(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事航天遥感、卫星激光通信方面的研究。Email: tsf1998@sina.com

deviation and comprehensive optical axis deflection error, negative influence of heterodyne caused by axis error can be improved with modulating the light spot size deviation. In order to test the theoretical result, an experimental platform of influence factor of spatial optical hybrid was built up and an experiment of deflection angle of optical axis with choosing three light spot sizes was implemented. The result is consistent with that of the simulation. The curves of actual measurement are slightly less than the theoretical value because of the influence of insertion loss caused by experiment components. These influence obtained may provide technical reference for the design, adjustment and process of spatial optical hybrid.

Key words: heterodyne efficiency; light spot size; ray axis deflection; space optical hybrid

0 引言

空间相干光通信利用自身特殊的调制和接收方式,具备高速率,远距离传输的能力,克服了传统光通信方式无法逾越的瓶颈^[1]。光混频效率是空间相干通信系统中光混频器的重要指标,光混频效率直接影响相干接收系统对微弱信号光的高探测灵敏度^[2]。因此提高光混频效率是相干接收系统的重要任务之一。

国内外对于光混频系统性能影响因素的分析做了很多有意义的研究。Chongjin Xie 研究了偏振对相干光通信性能的影响^[3];Hongzhou Dong^[4]等对相干光通信的频域进行了详尽的分析;刘宏展^[5]等分析了振幅分布对光混频效率的影响;么周石^[6]等研究了跟瞄误差产生的相位失配对光混频效率的影响;刘超^[7]等研究了大气湍流对光混频效率的影响;Guo Wei^[8]研究了高斯等相面曲率半径对光混频效率的影响。Takashi^[9]等研究了基于高斯-高斯模型的光混频效率。上述文章对振幅分布、光轴振动、光波前相差、大气湍流等对光混频效率的影响进行了详细的分析,为空间相干光通信系统的设计提供了理论依据。大多数文献在讨论光混频效率时,都会选择在信号光与本振光的光斑尺寸相等,光斑几何中心重合的条件下进行研究。但实际的空间光混频系统中,由于光学元件的加工和装调误差,信号光与本振光的光斑尺寸和几何中心通常并不一致。这两个因素都与光混频效率有关,因此研究光斑尺寸和位置对光混频效率的影响对公差分配和器件设计时必要的。暂时没有发现关于研究光斑尺寸和光轴偏转对光混频效率影响的报道。此外,信号光和本振光在相同的误差条

件下对光混频效率的影响并不相同,该方面并未有人对其产生原因进行分析或从理论给出解释。

文中推导了高斯模型下的光混频效率表达式和光斑尺寸偏差、光轴偏转与光混频效率的表达式,并仿真计算不同光斑尺寸偏差及光轴偏转下空间光混频器的混频效率变化曲线。同时搭建空间光混频器影响因素实验平台进行实验并验证了仿真结果。

1 理论分析

1.1 空间光混频器的光混频效率公式推导

光混频效率被定义为系统的实际信噪比(SNR)与理想情况下的信噪比的比值^[10]。光混频效率可以反映出微弱信号光在光混频器中实际混频放大的程度。

根据坡印廷定理,投射到探测器表面的光电流可以表示为:

$$i=C \int_S \eta(E_T \times H_T) dS \quad (1)$$

式中: E_T 、 H_T 分别为传输光的电场分布和磁场分布; η 为量子效率; S 为探测器表面面积。空间光混频器输出端的光经过平衡探测器和处理电路,将相对相差为 180° 的两束混频光进行光电转换和电学处理,得到中频电流和系统噪声为:

$$\langle i_{IF}^2 \rangle = 2\pi^2 (ec\epsilon_0/h\nu)^2 \left[\int_0^{r_0} \eta(r) U_s(r) U_{l_0}(r) r dr \right]^2 \quad (2)$$

$$\langle i_n^2 \rangle = 2eI_{l_0}B = 2\pi(e^2c\epsilon_0/h\nu)B \int_0^{r_0} \eta(r) [U_{l_0}(r)]^2 r dr \quad (3)$$

式中: U_s 和 U_{l_0} 为信号光和本振光电场的振幅分布; e 为电子电荷; ϵ 为介电常数; ν 为光频率; h 为普朗克常数; B 为探测器噪声带宽; I_{l_0} 为本振光照射在探测器表面产生的电流。系统信噪比 SNR 可以由中频信号功率与噪声功率之比得到。通过公式(2)与公

式(3)可以得到输出端的信噪比为:

$$SNR = (\eta_{\text{coherent}} P) / (h\nu B) = \langle i_{\text{IF}}^2 \rangle / \langle i_n^2 \rangle = \left(\frac{\pi c \epsilon_0}{h\nu B} \right) \frac{\left[\int_0^{r_0} \eta(r) U_s(r) U_{lo}(r) r dr \right]^2}{\int_0^{r_0} \eta(r) [U_{lo}(r)]^2 r dr} \quad (4)$$

根据 David Fink 的相干混频模型^[11], η_{coherent} 为系统的光混频效率:

$$\eta_{\text{coherent}} = \frac{\left[\int_0^{r_0} U_s(r) U_{lo}(r) r dr \right]^2}{\int_0^{r_0} [U_{lo}(r)]^2 r dr \int_0^{\infty} [U_s(r)]^2 r dr} \quad (5)$$

由于空间光混频器中信号激光器和本振激光器输出光为高斯光, 选用高斯光可以减小光束整形带来的损耗, 同时用最小尺寸的接收靶面获得最大的光混频效率。所以信号光和本振光的振幅分布设为高斯分布, 表达式为 $U_s(r) = C_s \exp(-r^2/\omega_s^2)$ 和 $U_{lo}(r) = C_{lo} \exp(-r^2/\omega_{lo}^2)$, 其中 r 为接收靶面半径; ω_s, ω_{lo} 为信号光和本振光的束腰半径; C_s, C_{lo} 为常数。将公式(1)和(2)代入公式(5), 得到高斯-高斯模型下的光混频效率公式:

$$\eta_{\text{coherent}} = \frac{\left[\int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{lo}^2}\right) r dr \right]^2}{\int_0^{r_0} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{lo}^2}\right) \right]^2 r dr \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega_s^2}\right) \right]^2 r dr} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{coherent}} = \frac{\left[\int_0^{r_0} \exp\left(-\frac{r^2}{(\omega_{lo} + \Delta\omega)^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{lo}^2}\right) r dr \right]^2}{\int_0^{r_0} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{\omega_{lo}^2}\right) \right]^2 r dr \int_0^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{r^2}{(\omega_{lo} + \Delta\omega)^2}\right) \right]^2 r dr} \quad (8)$$

空间光混频器的实际装调过程中, 由于装调误差导致器件内部信号光与本振光光轴不再重合, 使接收靶面上信号光与本振光出现光斑位置的偏移, 导致光混频效率恶化。常见装调误差有三种, 分别为光轴径向偏移、光轴角度偏转和综合偏转^[13]。综合偏转在实际情况中最常出现, 因此主要分析该种情况下光混频效率的变化趋势。综合偏转情况如图 1 所示。

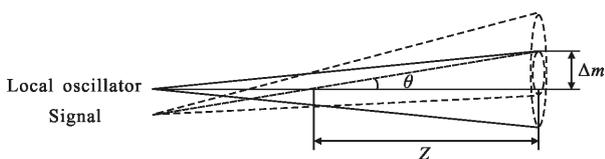


图 1 偏转示意图

Fig.1 Schematic diagram of deflection

由公式(6)可知, 空间光混频器的光混频效率由靶面半径 r_0 和信号光、本振光的高斯束腰半径 ω_s, ω_{lo} 决定。在高斯-高斯模型中, 系统理想情况下 $\omega = \omega_s = \omega_{lo}$, 系统的最大光混频效率为 1, 代入公式(6)后计算得到:

$$\begin{cases} \eta = 1 & \omega/r_0 \leq 0.64 \\ \eta < 1 & \omega/r_0 > 0.64 \end{cases} \quad (7)$$

由于实际应用中, 有限靶面尺寸下, 光斑尺寸的选择会影响光混频器的混频效率, 因此需要确定靶面尺寸与光斑尺寸的关系。上述结果可知光斑尺寸与靶面半径的最佳比例为 0.64, 下面计算分析均在此基础上进行。

1.2 光斑尺寸偏差和光斑位置偏差与光混频效率关系理论推导

为获得最好的光束质量, 空间光混频器接收靶面通常位于入射光束的束腰处, 因此用信号光与本振光的束腰半径的大小表征光斑尺寸^[12]。

由于光学元件的加工误差, 使入射光束不再是平行光, 存在发散和压缩, 导致接收靶面处信号光与本振光的光斑尺寸不相等, 即光斑尺寸偏差。以本振光的光斑尺寸为基准, 光斑尺寸偏差为 $\Delta\omega = \omega_s - \omega_{lo}$, 将其代入公式(6)中, 得到带光斑尺寸偏差的光混频效率公式:

信号光轴相对本振光轴存在夹角, 导致光轴偏转, 同时光斑发生偏移^[14]。设光轴偏转角为 θ , 光轴交点与靶面距离为 z , 靶面上信号光斑相对于本振光斑的偏移量 Δm 。根据物理光学中波前夹角的计算方法, 得到偏移的计算公式为:

$$\Delta m = J_0(\vec{k} \cdot \vec{r}) \approx J_0(C_p k r \theta) \quad (9)$$

式中: $J_0(\cdot)$ 为零阶贝塞尔函数; C_p 为常数。由公式(5)可知光斑偏移量正比于光轴偏转角, 因此用光轴偏转角表示光斑偏移的大小。根据公式(9), 信号光的光场分布表达式变为 $U_s(r) = C_s \exp[-(r^2/\omega_s^2)] \cdot J_0(C_p k r \theta)$, 代入公式(6)得到带光斑位置偏差光混频表达式为:

$$\eta = \frac{\left[\int_0^{r_0} \exp(-r^2/\omega_{lo}^2) \cdot \exp(-r^2/\omega_s^2) \cdot J_0(C_p k r \theta) r dr \right]^2}{\left[\int_0^{r_0} [\exp(-r^2/\omega_{lo}^2)]^2 r dr \right] \left[\int_0^{\infty} [\exp(-r^2/\omega_s^2)]^2 r dr \right]} \quad (10)$$

在实际情况下, 由于空间光混频器内部的光学元件存在加工和装调误差均不可避免, 因此光斑位置偏移和尺寸失配在接收靶面同时存在, 光混频效率与接收靶面上信号光与本振光光波前的重合区域大小直接相关, 光轴偏转让信号光与本振光的光斑

位置发生分离使两束光的重合区域面积变小, 而信号光与本振光的光斑尺寸差异会改变这种影响的程度, 所以综合考虑两种因素对光混频效率的影响是有必要的。综合公式(8)和(10), 得到带光斑尺寸偏差和光斑位置偏差的光混频效率表达式为:

$$\eta = \frac{[\int_0^{r_0} \exp(-r^2/\omega_s^2) \cdot \exp(-r^2/(\omega_o + \Delta\omega)^2) \cdot J_0(C_r k r \theta) r dr]^2}{[\int_0^{r_0} [\exp(-r^2/\omega_s^2)]^2 r dr] [\int_0^\infty [\exp(-r^2/(\omega_o + \Delta\omega)^2)]^2 r dr]} \quad (11)$$

2 数值分析

2.1 光斑尺寸偏差对光混频效率的影响分析

根据公式(8), 光斑尺寸与靶面半径比例为0.64, 接收靶面半径 $r_0=100 \mu\text{m}$, 信号光和本振光光斑尺寸为 $64 \mu\text{m}$, 和存在光斑尺寸偏差(信号光与本振光的光斑尺寸差异设为 $\Delta\omega$, 即 $\Delta\omega=\omega_s-\omega_o$)时, 光混频效率的恶化情况, 如图 2 所示, 图中实线为光斑尺寸与系统混频效率的关系曲线, 虚线为光斑尺寸差与系统混频效率的关系曲线。对比两条曲线可知, 光斑尺寸存在偏差时光混频效率的恶化程度更大。

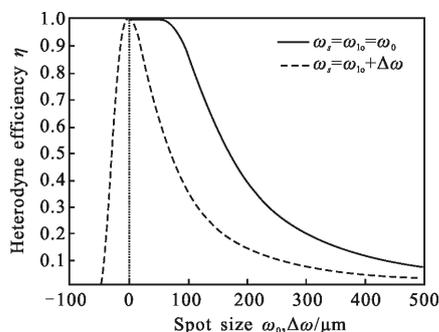


图 2 光斑尺寸、光斑尺寸差与系统混频效率的关系曲线
Fig.2 Heterodyne efficiency as the function of spot size and difference of spot size

两光束光斑尺寸相同时, 光混频效率在光斑尺寸为 $0\sim 64 \mu\text{m}$ 范围内为 100%, 该结论验证了公式(8)中光斑尺寸与靶面尺寸的最佳比例; 当光斑尺寸超出上述范围, 由于靶面尺寸限制, 信号光与本振光均有一部分能量因无法进入靶面而损失, 从曲线上表示为光混频效率的下降。设光混频效率 $\eta=10\%$ 时为空间光混频器实现混频功能的最小值, 由此得到光斑尺寸的允许范围为 $433 \mu\text{m}$ 。

光斑尺寸存在偏差时, $\Delta\omega$ 的正负表示信号光斑

与本振光斑的相对大小。光混频效率随着光斑尺寸差的增大快速下降。根据 $\Delta\omega < 0$ 和 $\Delta\omega > 0$ 时曲线的变化, 由图可知两段曲线在光混频效率 $\eta=10\%$ 的条件下光斑尺寸偏差范围为 $-42\sim 250 \mu\text{m}$ 。当本振光光斑尺寸大于信号光时对系统光混频效率的影响较大, 这是由于信号光从远方入射到接收机, 光学天线的尺寸远小于接收光束尺寸, 在空间光混频器中, 信号光波前会存在一定的匀化现象, 因此信号光光斑尺寸增大对于光混频效率的影响要小于本振光。

2.2 光轴偏转对光混频效率的影响分析

根据公式(10), 光斑尺寸与靶面半径比例为0.64, 接收靶面半径 $r_0=100 \mu\text{m}$, 信号光和本振光光斑尺寸为 $64 \mu\text{m}$, 仿真结果如图 3 所示。x 轴为光轴偏转角, 代表实际光轴相对理想光轴的偏离程度, y 轴为光混频效率。如图可知随着光轴偏转角的增大, 光混频效率快速下降; 在 $\eta=10\%$ 的条件下偏转角 θ 的范围为 0.0116° (约 $203 \mu\text{rad}$)。由于空间光混频系统中存在光学压束系统, 系统角放大倍率一般为 $5\sim 30$ 倍, 偏转角压缩后会减小光束入射的角度。因此装调过程中需严格控制光轴偏转角。

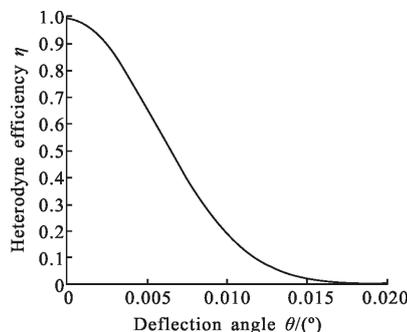


图 3 混频效率 η 随光轴偏转角 θ 变化的关系曲线
Fig.3 Heterodyne efficiency η as the function of deflection angle θ

对比光斑尺寸对光混频效率的影响和对实际系

统的研究^[15-16],发现空间光混频器中光斑尺寸偏差通常小于 10 μm ,对光混频效率的影响较小,而由于空间光混频器的装调引起的光轴偏转范围通常大于 100 μrad ,对光混频效率的影响相比光斑尺寸偏差更大。

2.3 综合偏差对光混频效率的影响分析

根据公式(11),分析光斑尺寸偏差、光轴偏转角度与光混频效率的关系。设靶面尺寸为 100 μm ,对不同偏转角度下光斑尺寸偏差与光混频效率的影响进行仿真分析,光斑尺寸偏差,光轴偏转与光混频效率的关系如图 4 所示。如图可知光斑尺寸偏差与光轴偏转的关系是非线性的,为进一步分析两者的关系,对不同光斑尺寸偏差下光轴偏转与光混频效率的关系进行仿真,如图 5 所示。

图 5 中实线表示没有光斑尺寸偏差的情况,虚线表示存在光斑尺寸偏差的情况,两条曲线存在交点,其代表的光轴偏转角约为 60 μrad ,该坐标为光斑尺寸偏差改变光轴偏转对光混频效率影响的边界条件。光斑尺寸偏差对光轴偏转的影响如图 6 所示。

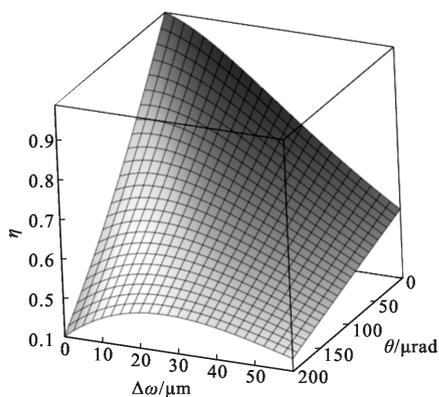


图 4 光斑尺寸偏差,光轴偏转角与光混频效率关系的 3D 示意图
Fig.4 3D diagrammatic of relationship among spot size deviation, deflection angle and heterodyne efficiency

如图 6 可知当光轴偏转角为 60 μrad 时,光混频效率在光斑尺寸偏差为 0 时达到最大值,说明信号光与本振光的光斑尺寸相同时可获得最大光混频效率。当光轴偏转角为 90 μrad 时,光混频效率在光斑尺寸偏差为 24.87 μm 处达到最大值,相比光斑尺寸相同时增大了 18%。此时光斑尺寸偏差可以减小光轴偏转对光混频效率恶化程度。根据仿真结果可以推断,当光轴偏转角达到一定程度时,可以通过增加光

斑尺寸偏差的方法减缓光轴偏转对混频效率的影响。

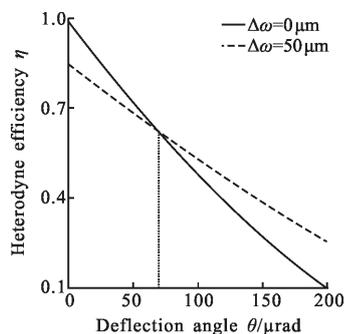


图 5 不同光斑尺寸偏差时,光轴偏转角与混频效率的关系曲线
Fig.5 Heterodyne efficiency as the function of deflection angle of ray axis with different spot size deviations

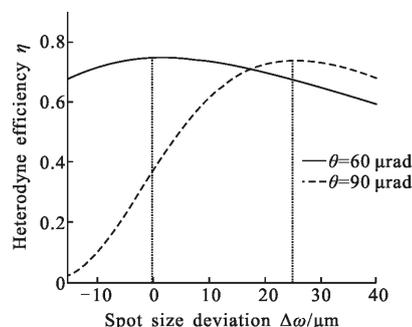


图 6 不同光轴偏转角时,光斑尺寸偏差与混频效率的关系曲线
Fig.6 Heterodyne efficiency as the function of spot size deviation with different deflection angles

3 实验测试

为验证影响规律,搭建了空间光混频器影响因素实验平台,原理如图 7 所示。实验系统由信号激光器、本振激光器、偏振控制器、准直组镜、电控振镜、空间光混频器、平衡探测器和示波器组成。信号流程:信号光和本振光通过偏振控制器将出射光偏振态调节为 45°线偏振光;信号光通过准直组镜把光纤传输的信号光变为空间平行光,通过选择不同焦距的组镜可以改变信号光的光斑尺寸;利用电控振镜对信号光进行偏转,为信号光引入光轴偏转量,信号光与本振光在 90°空间光混频器中进行光混频,接收靶面处放置的平衡探测器将四路相对相差分别为 0°,90°,180°,270°的混频光信号进行光电转换和差分处理,得到相对相差为 90°的中频电信号,并由示波器显示测试结果。使用示波器对本振光、信号光及待测信号的电压值进行测量,通过

计算得到系统光混频效率。

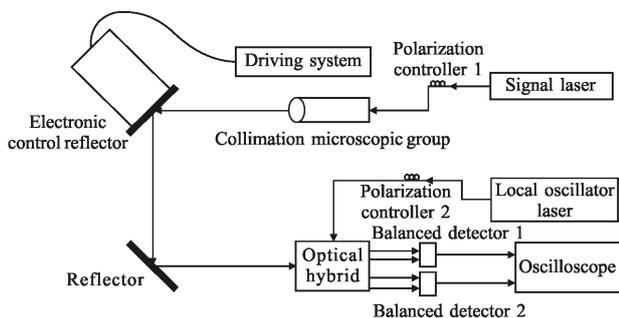


图 7 实验原理框图

Fig.7 Schematic of experiment principle

实验中信号光与本振光波长均为 1550 nm, 信号光与本振光频差为 2 GHz, 信号光功率为 5 dBm, 本振光功率为 10 dBm, 实验现场如图 8 所示。在电控振镜位于零位时, 对光路进行对准, 获得稳定的电学拍频现象, 频差为 3 GHz, IQ 支路位相差为 90.4°, 实现稳定的 90°混频功能, 测试结果如图 9 所示。为验

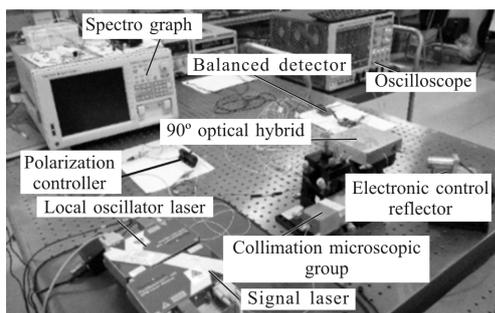


图 8 实验现场图

Fig.8 Scene of experiment

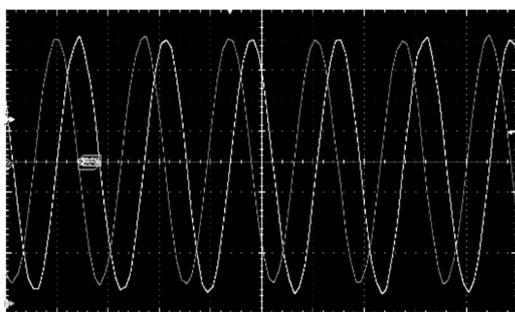
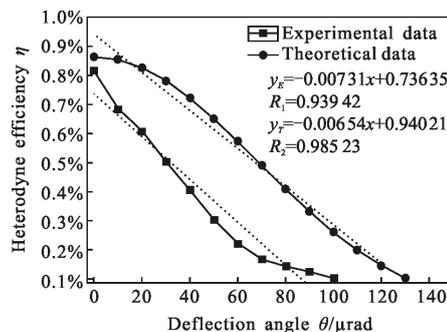


图 9 理想条件下 IQ 支路相差为 90°的拍频电信号

Fig.9 90° beat electrical signal of IQ branch in ideal condition

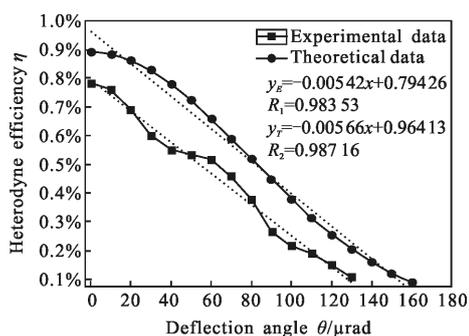
证光斑尺寸偏差和光轴偏转对系统混频效率的综合影响, 信号光光斑尺寸半径可变, 分别为 70、110 和 150 μm, 本振光光斑尺寸半径为 110 μm, 接收靶面

半径为 110 μm, 通过调节电控振镜, 以 10 μrad 为步长使信号光轴相对本振光轴发生偏转, 相对偏转角为 θ。对三种光斑尺寸下不同光轴对准误差角 θ 下系统光混频效率进行采点并拟合关系曲线如图 10 所示。



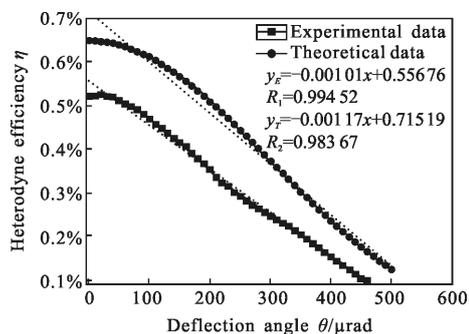
(a) 信号光光斑尺寸为 70 μm 时的理论与实验曲线

(a) Experimental and theoretical curve with spot sizes of 70 μm



(b) 信号光光斑尺寸为 110 μm 时的实验曲线与理论曲线

(b) Experimental and theoretical curve with spot sizes of 110 μm



(c) 信号光光斑尺寸为 150 μm 时的实验曲线与理论曲线

(c) Experimental and theoretical curve with spot sizes of 150 μm

图 10 光轴偏转角 θ 与系统混频效率 η 之间的关系曲线

Fig.10 Heterodyne efficiency η as the function of deflection angle θ

图 10(a)中理论和实验得到的光混频效率最大

值分别为 86.5% 和 81.56%，理论计算和实验获得的最大偏转角度分别为 128 μrad 和 100 μrad 。图 10(b) 中理论和实验得到的光混频效率最大值分别为 89% 和 78.3%，理论计算和实验获得的最大偏转角度分别为 160 μrad 和 130 μrad 。图 10(c) 中理论和实验得到的光混频效率最大值分别为 64% 和 52.2%，理论计算和实验获得的最大偏转角度分别为 500 μrad 和 460 μrad 。综上所述，实验结果与理论结果趋势基本一致，实验值略低于理论值，原因为实验系统中存在插入损耗，导致接收端的能量下降，使实验结果低于理论值。图 10(c) 中光混频效率最大值相对另外两条曲线有 25%~30% 的下降，但光轴偏转角度的范围提高了约 300 μrad 。对比分析三种情况，发现若光轴偏转范围小于 60 μrad ，应尽量保证信号光与本振光的光斑尺寸一致，以增大光混频效率；若光轴偏转范围大于 60 μrad ，通过增大信号光的光斑尺寸可提高光轴偏转范围，保证光混频器可以正常地工作。

4 结论

推导了光斑尺寸偏差和光轴偏转与空间光混频器光混频效率之间的表达式，通过仿真分析可知，增加光斑尺寸偏差和光轴偏转将恶化光混频效率。当混频效率为 10% 时、光斑尺寸偏差范围为 -42~250 μm ，光轴偏转范围为 203 μrad 。当存在较大光轴偏转误差时，可增加光斑尺寸偏差来改善混频效率的恶化。进行了影响因素分析实验，实验结果与理论结果趋势基本一致。验证了理论计算结果。所得到影响规律将为空间光混频器的实用化提供一定参考。

参考文献：

[1] Zheng Yang, Jiang Huilin, Tong Shoufeng, et al. Opto-mechanical structure design of the space optical hybrid based on space coherent laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0906008. (in Chinese)
郑阳, 姜会林, 佟首峰, 等. 基于相干激光通信的空间光混频器光机结构设计 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0906008.

[2] 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): 0806003. (in Chinese)
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): 0806003.

[3] Xie Chongjin. Impact of nonlinear and polarization effects in coherent systems [J]. *Optics Express*, 2011, 19 (26): B915–B930.

[4] Dong Hongzhou, Yang Roufu, Yang Chunping, et al. Analysis of heterodyne detection in the frequency domain [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(33): 9883–9888.

[5] Liu Hongzhan, Ji Yuefeng, Xu Nan, et al. Effect of amplitude profile difference of signal and local oscillator wave on heterodyne efficiency in the inter-satellite coherent optical communication system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 100600. (in Chinese)
刘宏展, 纪越峰, 许楠, 等. 信号与本振光振幅分布对星间相干光通信系统混频效率的影响 [J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 100600.

[6] Yao Zhoushi, Deng Ke, Li Xiaofeng. The effect of pointing error on performance of satellite coherent laser communication link [J]. *Journal of Optoelectronics*, 2010, 21(6): 868–870. (in Chinese)
么周石, 邓科, 李晓峰. 卫星相干光通信跟瞄误差对链路性能的影响 [J]. *光电子·激光*, 2010, 21(6): 868–870.

[7] Liu Chao, Chen Shanqiu, Li Xinyang, et al. Performance evaluation of adaptive optics for atmospheric coherent laser communications [J]. *Optics Express*, 2014, 22(13): 15554–15563.

[8] Guo Wei, Jian Zhou, Xingwu Long. Analysis of signal-to-noise ratio and heterodyne efficiency for reference-beam laser Doppler velocimeter [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44: 108–113.

[9] Takashi Takenaka, Kazumasa Tanaka, Otozo Fukumitsu. Signal-to-noise ratio in optical heterodyne detection for Gaussian fields [J]. *Applied Optics*, 1978, 17(21): 3466–3471.

[10] Li Xiangyang, Ma Zongfeng, Shi Dele. Effect of Gaussian fields distribution on mixing efficiency for coherent detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 539–543. (in Chinese)
李向阳, 马宗峰, 石德乐. 高斯光束场分布对相干探测混频效率的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 539–543.

[11] David Fink. Coherent detection signal-to-noise [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(3): 689–690.

[12] Seok-Hwan Jeong, Ken Morito. Compact optical 90° hybrid employing a tapered 2×4 MMI coupler serially connected by a 2×2 MMI coupler [J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4275–4288.

- [13] Ma Jing, Li Kangning, Tan Liying, et al. Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(25): 7575–7585.
- [14] Zhang Kewei, Wang Wei, Zhao Wei, et al. Accurate frequency estimator for optical coherent M-PSK system based on FFT and multiple signal classification algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1593–1597. (in Chinese)
张珂卫, 汪伟, 赵卫, 等. 基于 FFT 和多重信号分类算法的高精度相干光相移键控信号频率偏移估计算法研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1593–1597.
- [15] Song Hongfei, Che Ying, Zhao Xin, et al. Improvement of fiber coupling efficiency in atmospheric turbulence [J]. *Opt Precision Eng*, 2014, 22(12): 3205–3211. (in Chinese)
宋鸿飞, 车英, 赵馨, 等. 湍流环境中光纤耦合效率的提高 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(12): 3205–3211.
- [16] Dong Lei. Measurement methods of optical spatial coherence and their comparison [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(6): 1020–1026. (in Chinese)
董磊. 光场空间相干性的测量方法及比较 [J]. 中国光学, 2015, 8(6): 1020–1026.