

激光与光电子学进展

带有整形元件的相干探测混频系统

戴正爽¹, 江伦^{2,3*}, 宋志化¹, 代天君¹, 于鑫¹, 王超², 宋延嵩^{2,3}, 佟首峰^{2,3}

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022;

³鹏城实验室, 广东 深圳 518000

摘要 相干探测混频器是空间相干光通信系统的重要组件, 主要作用是将信号光和本振光进行混频得到中频信号, 进而对光信号进行放大, 使探测器的灵敏度达到量子噪声极限。混频效率对中频信号的强度尤其重要, 因此, 假设本振光为理想高斯分布时, 计算了信号光的不同振幅分布对混频效率的影响。通过设计一组光束整形镜将信号光的振幅分布变为高斯分布, 从而实现高斯光和高斯光的相干混频。实验结果表明, 带有整形元件的相干探测混频器可实现信号光与本振光相似的振幅分布, 且相比均匀分布的信号光, 混频效率提高了 17 个百分点。

关键词 相干光学; 空间光混频器; 混频效率; 光束整形; 数值模拟

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0706001

Coherent Detection Mixing Systems with Shaping Elements

Dai Zhengshuang¹, Jiang Lun^{2,3*}, Song Zhihua¹, Dai Tianjun¹, Yu Xin¹, Wang Chao²,
Song Yansong^{2,3}, Tong Shoufeng^{2,3}

¹College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

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

³Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract Coherent detection mixer is an essential component of spatial coherent light communication system. Its main function is to mix signal and local oscillator lights to obtain an intermediate frequency signal and then enlarge the optical signal so that the sensitivity of the detector reaches the quantum noise limit. The mixing efficiency is vital for the intensity of the intermediate frequency signal. Therefore, we assume that the local oscillator light has an ideal Gaussian distribution and calculate the influence of different amplitude distributions of the signal light on the mixing efficiency. By designing a set of beam-shaping mirrors, the amplitude distribution of the signal light is changed to a Gaussian distribution, coherent mixing of Gaussian light and Gaussian light is achieved. Experiment results show that the coherent detection mixer with shaping elements can achieve the similar amplitude distribution of the signal light and the local oscillator light, and the mixing efficiency is improved by 17 percentage points compared with the uniformly distributed signal light.

Key words coherence optics; space optical mixer; mixing efficiency; beam shaping; simulation

OCIS codes 060.1660; 250.0040; 060.4510

收稿日期: 2020-05-25; 修回日期: 2020-06-17; 录用日期: 2020-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(61701045, 61805028, 91838301)、海洋立体通信网络验证示范平台项目(LZC0020)

*E-mail: jlcimp@163.com

1 引言

随着传输数据量的不断增加,人们对空间光通信信道带宽的要求也越来越高,相干光通信技术可以更好地利用激光的频带资源,因此得到了广泛应用^[1]。相干光技术的原理是将接收到的光信号与振幅分布、相位、偏振方向一致的本振光进行干涉混频,进而增强信号光、提高通信质量^[2]。空间光混频器能将本振光的相位与信号光调整为一致,从而进行相位锁定并解调出光载波中携带的信息。李向阳等^[3]研究了信号光和本振光的混频特性,并给出了两高斯光束的束腰半径、光敏面半径等因素对混频效率的影响。Wei 等^[4-6]给出了信号光和本振光的光场分布对探测器探测性能的影响。南航等^[7]分析了光斑尺寸偏差和光轴偏转对光混频器混频效率的影响,为光混频器的设计、加工提供了一定参考。研究表明,当两束光都为高斯分布时可实现较高的混频效率,但考虑到信号光经远距离传输后进入接收天线的光斑只是实际光斑的一小部分,振幅分布常被近似为均匀分布,目前并没有可实现两束高斯光混频的混频器设计方案。

本文计算了不同信号光的振幅分布对混频效率的影响,并在此基础上设计一种带有透射式整形元件的空间光混频器。该混频器可用于信号光-本振光混频系统,提高信号光和本振光的光场振幅分布、几何中心重合度,从而实现更高的混频效率即中频信号功率,解决了现有混频系统中由两光场振幅模式不匹配导致的信号光-本振光混频效率低问题。

2 理论基础

2.1 混频效率的计算

在空间相干光通信中,信号光经过远距离传输到达接收端,与本振激光器发出的本振光进行光学混频,混频效率指两束光实际混频得到的中频信号功率与理想状态下混频得到的中频信号功率之比。本振激光器发出的光一般为高斯分布,对应的光场分布可表示为

$$u_l(r_l) = \exp\left(-\frac{r_l^2}{\omega_l^2}\right), \quad (1)$$

式中, r_l 、 ω_l 分别为本振光的光束半径和束腰半径。信号光到达接收端的光斑只是实际光斑的一小部分,光场近似为均匀分布^[8],可表示为

$$u_s(r_s) = 1, \quad (2)$$

式中, r_s 为信号光的光束半径。假设信号光为高斯

分布,则光场分布可表示为

$$u_{sg}(r_s) = \exp\left(-\frac{r_s^2}{\omega_{sg}^2}\right), \quad (3)$$

式中, ω_{sg} 为信号光高斯分布时的束腰半径。假设信号光与本振光的相位完全配合且两者的几何中心重合,则混频效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{\left| \int_0^{r_0} u_l(r) u_s(r) r dr \right|^2}{\int_0^{r_0} u_l^2(r) r dr \int_0^{r_0} u_s^2(r) r dr}, \quad (4)$$

式中, r_0 为探测器的半径, u_l 、 u_s 分别为本振光和信号光的光场分布。将(1)式和(3)式代入(4)式,可得到出射面高斯分布信号光和高斯分布本振光的混频效率。作为对比,假设信号光为均匀分布,将(1)式和(2)式代入(4)式,得到出射面均匀分布信号光和高斯分布本振光的混频效率。假设波长 $\lambda=1550$ nm,探测器半径 $r_0 \leq 8 \mu\text{m}$, $\omega_l = \omega_{sg} = 3 \mu\text{m}$,当信号光和本振光的束腰半径相等时,混频效率能达到最大值,计算得到的混频效率如图 1 所示。可以发现,随着探测器半径的增大,均匀分布信号光和高斯分布本振光的混频效率先增大后减小,最大为 81.4%;高斯分布信号光和高斯分布本振光的混频效率始终呈增大趋势,当探测器半径 $r_0 \approx 4.8 \mu\text{m}$ 时,混频效率接近于 1,此时 $r_0/\omega_l = 1.6$,即探测器半径与束腰半径的最佳比值为 1.6。

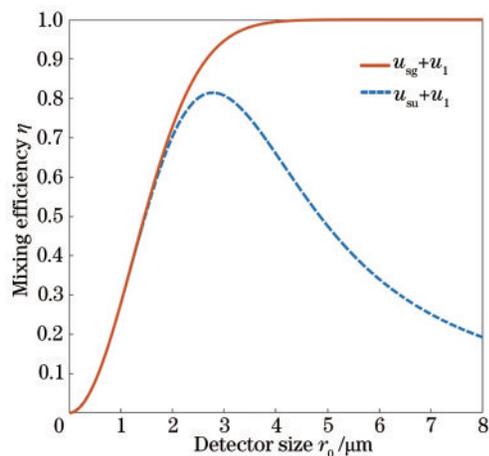


图 1 本振光与信号光的混频效率

Fig. 1 Mixing efficiency of the local oscillator light and signal light

2.2 整形镜的设计

光束整形元件可将信号光的分布变为高斯分布,具体实现方法:用非球面透镜组对入射光束进行整形得到高斯光束,再与本振光进行混频。非球

面截面曲线的计算方法:根据能量守恒定律可知,任意模式的入射光和出射光在入射面和出射面的能量积分是相等的^[9],可表示为

$$2\pi \int_0^R I_{in}(R) R dR = 2\pi \int_0^r I_{out}(r) r dr = 1, \quad (5)$$

式中, R 为入射面的半径, r_{out} 为出射面的半径, $I_{in}(R)$ 为入射面的光强分布, $I_{out}(r)$ 为出射面的光强分布。入射光束为均匀分布时,可用平顶洛伦兹函数将光强表示为

$$I_{FL} = \left[1 + \left(\frac{R}{R_{FL}} \right)^q \right]^{-(1+2/q)}, \quad (6)$$

式中, R_{FL} 为入射光束的半径, q 为平顶洛伦兹函数的阶数,实验取 $q=10$ 。出射光束为超高斯分布,其光强分布可表示为

$$I_{SG} = \exp \left[-2 \left(\frac{r_{out}}{r_{SG}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

式中, r_{SG} 为出射光束的半径。强度的几何光学定律要求强度乘以光束的横截面积沿光束传播方向上是恒定的,可通过旋转对称光束表示为

$$\int_0^R 2\pi I_{FL} \left(\frac{R}{R_{FL}} \right) R dR = \int_0^{r_{out}} 2\pi I_{SG} \left(\frac{r_{out}}{r_{SG}} \right) r dr, \quad (8)$$

特定超高斯光束到平顶洛伦兹光束的变换可表示为

$$\left[1 + \left(\frac{R}{R_{FL}} \right)^q \right]^{-2/q} = 1 - \exp \left[-2 \left(\frac{r_{out}}{r_{SG}} \right)^2 \right]. \quad (9)$$

非球面透镜组由两个高阶偶次非球面透镜组成,可分为开普勒型和伽利略型两种结构,实验采用伽利略型结构,根据(8)式得到光束在入射面和出射面上与投射高度的关系为 $R = h(r_{out})$ 。 $R = h(r_{out})$ 只能给出数值解,由于等式两边都是单调连续递增函数,对于任意 r_{out} ,只能得到唯一数值解 R ,进而得到 $h(r_{out})$ 。对于 $r_{out} = h^{-1}(R)$,根据(8)式和(9)式,可以得到

$$h^{-1}(R) = r_{SG} \sqrt{-\frac{1}{2} \ln \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{R}{R_{FL}} \right)^q \right]^{-2/q} \right\}}. \quad (10)$$

根据光线追迹函数得到两片非球面透镜截面曲线的函数表达式为

$$Z(R) = \int_0^R \frac{\{R - [h^{-1}(R)]\} dR}{\sqrt{t^2(1-n)^2 + (n^2-1)\{R - [h^{-1}(R)]\}^2}}, \quad (11)$$

$$z(r) = \int_0^r \frac{[h(r) - r] dR}{\sqrt{t^2(1-n)^2 + (n^2-1)[h(r) - r]^2}}, \quad (12)$$

式中, $Z(R)$, $z(r)$ 分别为两个非球面镜的矢高, t 为两片镜之间的距离, n 为镜片的折射率。利用 Matlab 对(12)式、(13)式用高阶偶次函数进行曲线拟合,得到高阶偶次项系数,并输入 ZEMAX 中得到需要的非球面透镜^[10]。

3 系统方案

3.1 混频器的工作原理

目前常用的混频器类型为 90° 空间光混频器,主要作用是对光束进行偏振态旋转和相位延迟^[11-13]。本系统的 90° 空间光混频器工作原理和对应的坐标系示意图如图 2 所示。其中,实线箭头表示本振光的偏振方向,虚线箭头表示信号光的偏振方向。

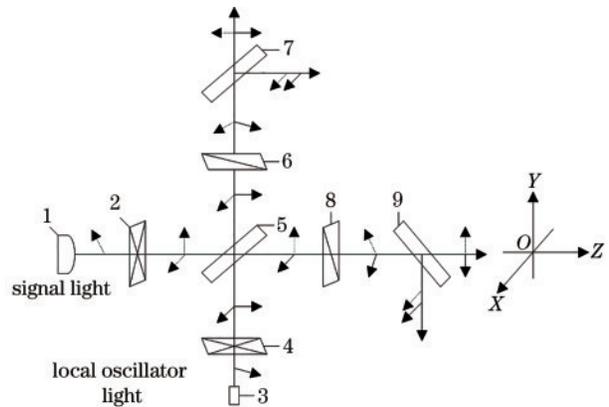


图 2 光混频器的工作原理及对应的坐标示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of the optical mixer and the corresponding coordinate

从图 2 可以发现,激光器(3)发出的线偏振光经过 $1/4$ 波片(4)后变为圆偏振光,偏振方向分别指向 X 轴正方向和 Z 轴正方向,相位差为 90° 。整形元件(1)出射的信号光经偏振片(2)变为圆偏振光,偏振方向分别指向 X 轴正方向和 Y 轴正方向。经过偏振分光棱镜(5)后,沿 Y 轴正方向传播的光束偏振方向分别为信号光沿 X 轴正方向的偏振光和本振光沿 Z 轴正方向的偏振光,两束偏振光经过 $1/2$ 波片(6)后偏振方向均发生 45° 偏转,偏转方向为顺时针方向(从 Y 轴正方向观察);经过偏振分光棱镜(7)后,偏振方向被分解为两束分开的线偏振光,出射光束分别沿 Z 轴正方向和 Y 轴正方向,偏振方向分别在 X 轴和 Z 轴上,出射光束的相位差分别为 0° 和 180° ;经偏振分光棱镜(5)后,沿 Z 轴正方向传播的

光束偏振方向分别为信号光沿 Y 轴正方向的偏振光和本振光沿 X 轴正方向的偏振光, 两束偏振光经过 1/2 波片(8)后偏振方向都发生 45° 偏转, 偏转方向为逆时针方向(从 Z 轴正方向观察); 经过偏振分光棱镜(9)后, 偏振方向被分解为两束分开的线偏振光, 出射光束分别沿 Z 轴正方向和 Y 轴负方向, 偏振方向分别在 Y 轴和 X 轴上, 出射光束的相位差分别为 90° 和 270°。

3.2 混频系统的设计

根据混频器的工作原理进行系统设计, 主要部件包括一个非球面整形透镜组、一个球面透镜组、一个偏振片、三个不同类型的波片和偏振分光棱镜。入射的信号光首先经过非球面透镜组进行整形缩束, 将光场分布由平顶分布变为高斯分布, 进入偏振片和偏振分光棱镜后, 线性本振光经过球面透镜组进行准直; 然后进入 1/4 波片变为圆偏振光, 并产生 $\pi/2$ 奇数倍的相位延迟, 再进入偏振分光棱镜。本振光和信号光的光轴方向相互垂直, 会

聚交点在偏振分光棱镜中心位置, 入射在棱镜中的光斑尺寸一致且几何中心重合。从偏振分光棱镜出射的两束混频光束处理方法基本相似, 均先经过快轴与入射偏振光振动方向有一定角度的 1/2 波片, 使偏振方向偏转一定角度, 并产生 π 奇数倍的相位延迟。两束光再经过偏振分光棱镜, 最终进入光电接收器的有四束出射光, 相位差分别为 0°, 90°, 180°, 270°。

4 分析与讨论

4.1 整形效果

图 3 为带有整形元件的光混频器结构示意图, 可以发现, 入射到混频器的信号光和本振光光束尺寸相同, 考虑到两束光束腰半径一致时混频效率最高, 进行光学系统设计时可将本振光扩束准直镜组和信号光缩束整形准直镜组放在一个光学系统中进行优化, 如图 4 所示。设计完成后再进行拆分, 以保证光束尺寸和束腰半径具有较好的一致性。

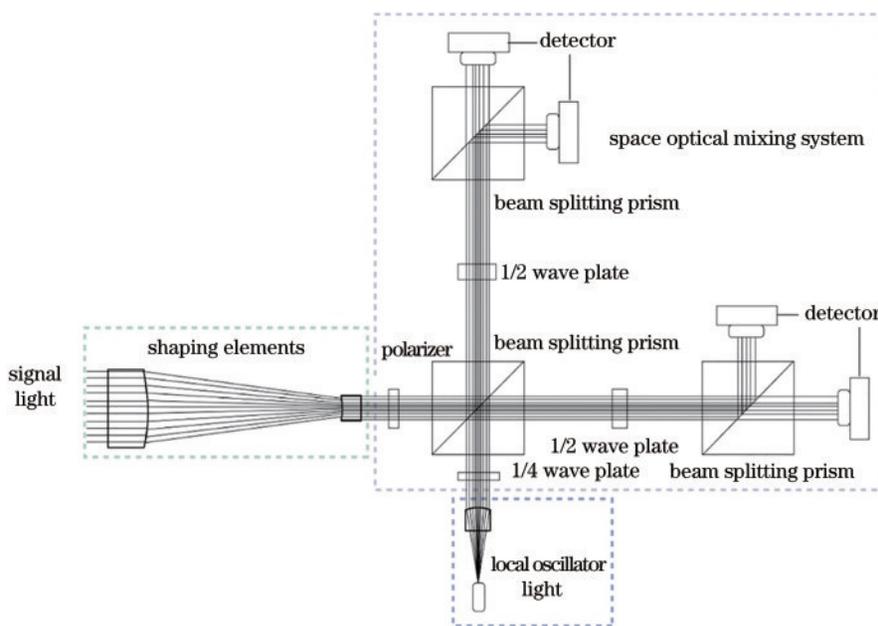


图 3 带有整形元件的光混频器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the optical mixer with shaping elements

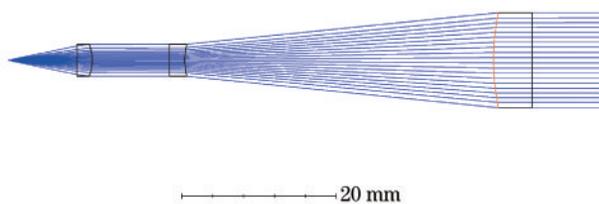


图 4 光学系统的整体结构

Fig. 4 Overall structure of the optical system

设系统发出的光波长为 1550 nm, 物方空间数值孔径 $NA=0.2$, 切趾类型为高斯分布, 以模拟本振激光器发出的光。光束先通过准直镜组平行出射, 出射光束的直径为 4 mm; 然后通过整形镜组以 12 mm 的口径平行出射, 透镜的 $n=1.5168$, 根据(11)式、(12)式计算得到的整形镜高阶偶次项参数如表 1 所示。

对整体系统进行优化后将系统拆分为本振光

表 1 非球面镜的高阶偶次项参数

Tab.1 High-order even-order parameters of the aspheric mirrors

| Surface | 2nd order | 4th order | 6th order | 8th order | 10th order | 12th order | 14th order | 16th order |
|---------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|
| 1 | 7.843×10^{-2} | -7.025×10^{-3} | 6.199×10^{-4} | -3.705×10^{-5} | 2.488×10^{-5} | -1.027×10^{-5} | 1.744×10^{-6} | -1.103×10^{-7} |
| 2 | 1.849×10^{-2} | -2.933×10^{-5} | 2.281×10^{-8} | -1.262×10^{-8} | 1.846×10^{-10} | 0 | 0 | 0 |

扩束准直镜组和信号光缩束整形镜组,具体结构如图 5、图 6 所示。其中,扩束准直镜组对本振激光器发出的光束进行处理,缩束整形镜组对光学天线入射的均匀分布信号光进行整形处理。

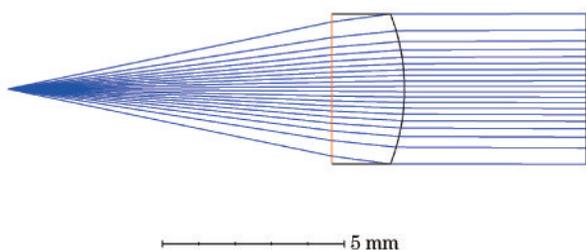


图 5 扩束准直镜组的结构

Fig. 5 Structure of the beam expanding collimator lens group

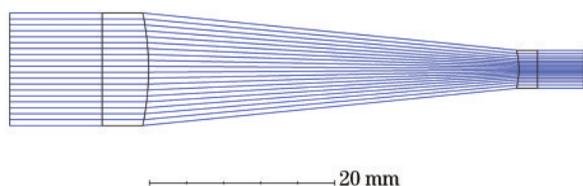


图 6 缩束整形镜组的结构

Fig. 6 Structure of the beam-shrinking and shaping lens group

为检验光学设计优化的效果,即两束光的口径、束腰半径是否相似,将 ZEMAX 中两束光的物理光学振幅分布数据导入 Matlab 中,得到两者的振幅分布如图 7 所示。可以发现,本振光的波形分布较好,信号光中心位置的整形效果较差,二者的波形虽有一定偏差,但总体比较接近。

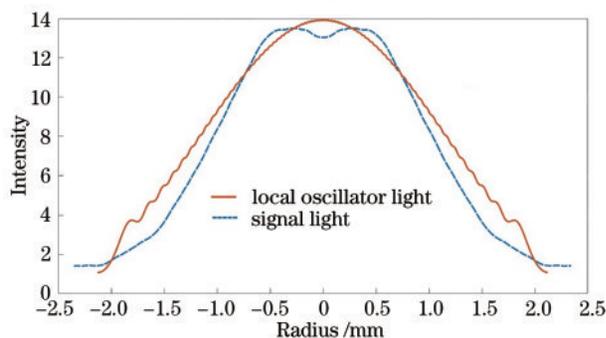


图 7 优化后本振光和信号光的振幅分布

Fig. 7 Amplitude distributions of the local oscillator light and signal light after optimization

4.2 混频效率的仿真计算

为对比信号光和本振光的波形差别,在 Matlab 中用信号光和本振光的物理光学振幅分布数据得到信号光和本振光的振幅分布拟合曲线,拟合效果如图 8 和图 9 所示。Matlab 中的确定系数(R-square)是通过数据的变化表征拟合曲线的好坏,正常取值范围为 [0, 1],其值越接近 1,表明方程的自变量对因变量的解释能力越强,拟合效果越好。本振光振幅分布拟合曲线的确定系数为 0.9948,信号光振幅分布拟合曲线的确定系数为 0.9894,均接近 1,这表明拟合曲线的表达式比较准确。实验得到的本振光和信号光的高斯分布为

$$u_1(r_1) = 14.06 \times \exp\left(-\frac{r_1^2}{1.521^2}\right), \quad (13)$$

$$u_{sg}(r_s) = 14.25 \times \exp\left(-\frac{r_s^2}{1.352^2}\right), \quad (14)$$

式中,本振光和信号光的束腰半径 $\omega_1 = 1.521, \omega_{sg} = 1.352$,束腰半径比 $\omega_1/\omega_{sg} = 1.125$ 。

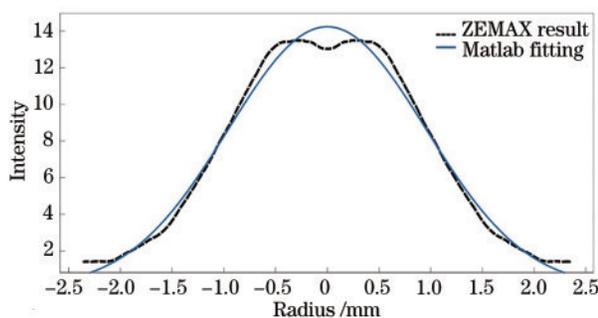


图 8 本振光曲线的拟合效果

Fig. 8 Fitting effect of the local vibration curve

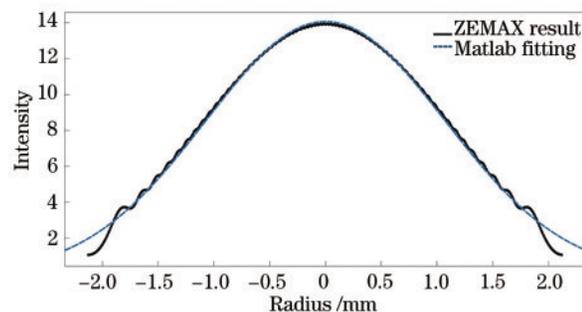


图 9 信号光曲线的拟合效果

Fig. 9 Fitting effect of the signal light curve

由图 1 可知,探测器半径与束腰半径的最佳比值为 1.6,以本振光的束腰半径为基础,固定探测器的半径为 4.8 mm,根据(4)式计算两束光的束腰半径比对混频效率的影响,结果如图 10 所示。可以发现,当 $\omega_1/\omega_{sg}=1.125$ 时,混频效率为 98.4%,比均匀分布信号光入射时的效率(81.4%)提高了 17 个百分点,这表明用本系统对信号光进行整形可明显提高相干光混频器的效率。

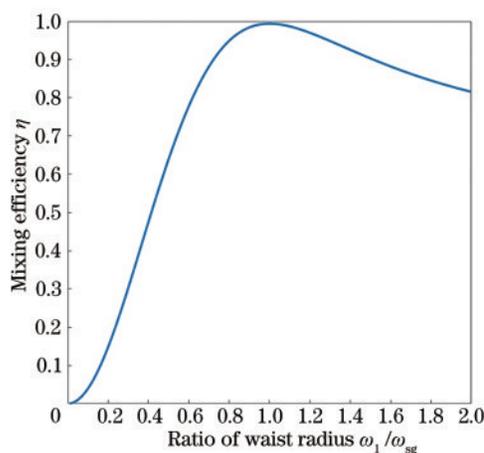


图 10 束腰半径之比对混频效率的影响

Fig. 10 Effect of the ratio of the waist radius on the mixing efficiency

5 结 论

提出了一种带有整形元件的相干探测混频器设计方法,计算了不同振幅分布的信号光对混频效率的影响,研究了光混频器的工作原理,设计了带有整形元件的混频器系统,并根据能量守恒定律求解出非球面镜的相关参数。将信号光和本振光的光束处理镜组在一个光学系统中进行优化,以保证两光束尺寸和束腰半径的一致性,提高整形设计效果。混频效率的仿真计算结果表明,相比均匀分布的信号光入射,相干光探测器的混频效率提高了 17 个百分点。

参 考 文 献

- [1] Zhang X Y, Cui S, Liu D M, et al. Performance analysis of multi-aperture coherent optical receiver for satellite-to-ground downlink[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(21): 210101.
张晓玉, 崔晟, 刘德明, 等. 星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(21): 210101.
- [2] Ma B B, Ke X Z, Zhang Y. Polarization control and

control algorithm of beams in coherent optical communication system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0106002.

马兵斌, 柯熙政, 张颖. 相干光通信系统中光束的偏振控制及控制算法研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0106002.

- [3] Li X Y, Ma Z F, Shi D L. Effect of Gaussian fields distribution on mixing efficiency for coherent detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 539-543.
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.
- [4] Wei G, Zhou J, Long X W. Analysis of signal-to-noise ratio and heterodyne efficiency for reference-beam laser Doppler velocimeter[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 108-113.
- [5] Liu H Z, Ji Y F, Xu N, 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): 1006001.
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): 1006001.
- [6] Tong G H. Analysis of mixing efficiency in satellite to ground coherent laser communication system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016.
全光恒. 高斯光束场分布对相干探测混频效率的影响[D]. 长春: 长春理工大学, 2016.
- [7] Nan H, Zhang P, Tong S F, 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): 205-212.
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): 205-212.
- [8] Xiang J S, Pan L C. 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.
- [9] Dickey F M. Laser beam shaping: theory and techniques[M]. Abingdon: CRC Press, 2018.
- [10] Song Z H, Jiang L, Cao H S, et al. Aspheric homogenizer applying in space laser communication

- terminal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100601.
- 宋志化, 江伦, 曹海帅, 等. 非球面整形镜在空间激光通信终端中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100601.
- [11] Zhou L Y. 90° optical mixer in coherent optical communication[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- 周凌尧. 相干光通信中的 90°光混频器[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [12] Cao H S. Design and test of high efficient space optical hybrid in homodyne coherent laser communication system [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- 曹海帅. 零差相干激光通信系统中高效率空间混频器设计与测试[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [13] Yue C L, Sun J F, Liu L, et al. High-sensitivity homodyne coherent receiver using EDFA as preamplifier [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(11): 1106001.
- 岳朝磊, 孙建锋, 刘磊, 等. 掺铒光纤放大器作为光学预放的高灵敏度零差相干接收机[J]. *中国激光*, 2019, 46(11): 1106001.