

文章编号:1001-5078(2013)12-1351-04

· 激光应用技术 ·

光斑均匀化在声光偏转相干探测系统的应用研究

何 宁, 谢朝玲, 郭求实

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:针对声光偏转效应相干探测系统信号光斑随射频信号变化的偏移特性,利用光斑重叠物理模型,研究光斑结构与混频效率的关系,分析光轴偏移、探测器有效光敏面半径以及本振光能量匹配等因素对相干光探测效率的影响。计算机仿真和实验测试验证表明,以能量分布均匀光斑作为本振光斑,有利于在一定范围内漂移的信号光与参考光重叠相干混频效率改善,当信号光偏移量 ± 0.5 mm内,重叠效率下降不到5%,通过光斑结构及能量分布的研究,为后续实际应用提供参考依据。

关键词:声光偏转;相干探测;光斑均匀化;光斑重叠;探测效率;光学匹配

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2013.12.07

Study on beam uniformity for the coherent optical detection system based on acousto-optic deflection

HE Ning, XIE Zhao-ling, GUO Qiu-shi

(School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: For signal light spot based on the acousto-optic deflection with RF signal changing in the coherent optical detection system, the relationship between spots structure and mixing efficiency is studied by using spots overlapping physical model, effects of optical axis deviation, active photosensitive surface radius, and local oscillator energy match are analyzed on coherent detection efficiency. The computer simulation and experiment test show that, using uniform energy distribution spots as local oscillator, this is very helpful for coherent mixing efficiency improvement within a certain range drift of signal light spot, when the signal light axis deviation is in the range $-0.5 \sim 0.5$ mm, the overlapping efficiency declines only by less than 5%. Through study of energy distribution and spots structure, the basis reference for subsequent applications can be provided.

Key words: acousto-optic deflection; coherent detection; beam uniformity; light spots overlapping; detection efficiency; optical matching

1 引 言

相干光探测具有灵敏度高、转换增益高、滤波性能好、抗干扰能力强、信噪比高等优点,已经被广泛应用于通信、超精密测量、信号分析、激光雷达等重要领域,与常规直接探测相比,其探测灵敏度可提高20dB左右^[1-2]。在实际应用中,经传输到达探测器光敏面上信号光与参考光的波形形状、能量匹配、位相差、偏振态、光轴角度差、光学匹配及光敏面半径等因素都会使探测效率受到影响^[3-5]。声光技术推

动了电子侦察测频技术的发展,基于声光偏转器构建相干光探测系统可进行全息探测,其高速并行处理、带宽大等优点,被应用于声光信号处理中。由于系统中信号光会随着射频信号在一定范围内动态变化,导致两束光重叠后的混频效果受到一定程度影

基金项目:国家863计划项目(No. 2007AA0860)资助。

作者简介:何 宁(1958-),男,研究员,硕士生导师,主要从事光通信方面的研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

收稿日期:2013-04-23

响。本文针对所研究的声光偏转系统的光束特征,通过仿真构建混频光斑不同结构,研究高斯光斑与矩形光斑的匹配特性,分析不同光束结构对相干光探测效率的影响。

2 理论分析

2.1 声光偏转效应相干光探测原理

基于声光偏转效应的相干光探测系统工作原理如图 1 所示。激光器 1 输出光束在声光偏转器发生声光相互作用,衍射后的 1 级信号光斑受射频信号(RF)控制在一定角度范围移动,在分光片与经过均匀化处理作为本振光的激光器 2 输出光束合路传输,通过准直和透镜压缩处理送光电探测器完成光电转换进行信号测量与处理。

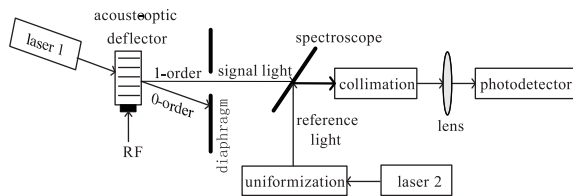


图 1 声光偏转空间相干光探测工作原理框图
Fig. 1 Schematic of coherent optical detection based on the acousto-optic diffraction effect

在声光偏转系统中,参考光的位置是相对固定的,但作用于声光偏转器的射频信号频率变化导致 1 级衍射光角度在一定范围内变化,入射到光电探测器上的信号光准直性也将发生变化,在一定程度上影响了两束光重叠后的混频效果。本振光采用均匀化处理,使衍射信号光在本振光中移动后重叠效率能保持一致,为了减小衍射光的变化角度,保证混频光束与探测器光敏面匹配,因此,需要对这种状态下的衍射信号光适当进行压缩和准直光学处理。

2.2 光斑均匀化

光斑均匀化,即将输入光束的光强分布进行均匀化处理,以得到光强分布较均匀的光束,其中最典型的应用是将高斯光束处理为平顶光束。1965 年, M. F. Frieden 首次提出了非球面透镜法,是最早的无能量损失的相位型光束整形系统^[7-9]。非球面透镜法基于简单的几何光学原理,系统结构简单,能量损失小,因此得到了广泛应用^[10]。该方法的光斑均匀化原理如图 2 所示,图中 x_1 为入射面上任意一光线的坐标值, x_2 为与之对应的出射平面的坐标值,并且假设输入光束的垂轴截面上 x_1 处的光强分布为 $f_G(x_1)$,输出光束的光强分布为 $f_P(x_2)$ 。由能量守恒定律可知,包含在 x_1 范围内的能量与 x_2 范围

内的能量相等,即 $E_{in} = E_{out}$,亦即:

$$\int_0^{\infty} 2\pi f_G(x_1) x_1 dx_1 = \int_0^{\infty} 2\pi f_P(x_2) x_2 dx_2 \quad (1)$$

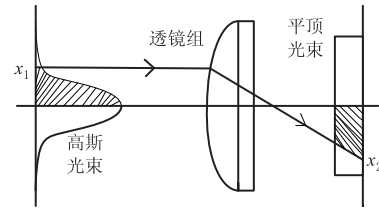


图 2 光斑均匀化原理图
Fig. 2 Scheme of beam uniformity

3 重叠光斑模型分析

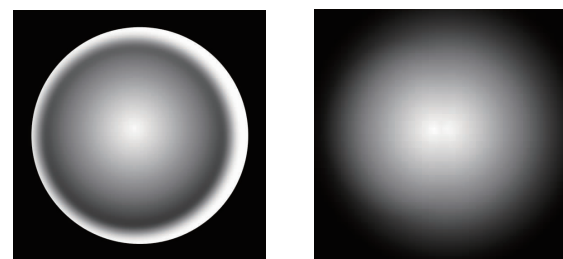
相干光探测是利用两个光斑的重叠部分进行相干,重叠部分的面积即为相干光探测的有效面积。光斑能量等同于光强分布下的面积,对于连续光来说能量等效为平均光功率,设重叠部分能量与两光斑的总能量之比 k ,即重叠效率。则 k 的表达式为:

$$k = \frac{E_0}{E_1 + E_2} \quad (2)$$

式中, E_0 为两光斑的重叠部分的能量; E_1 为光斑 1 的总能量; E_2 为光斑 2 的总能量。

由式(2)可知,重叠效率与重叠光斑能量大小成正比,探测效率则与重叠光斑入射到光电探测器的有效光敏面成正比。当参考光的能量小于信号光时,重叠效率将会降低,相干作用不明显,此时探测效率主要取决于信号光,相当于光强探测。一般情况下本振光的能量至少会比信号光大一个数量级,重叠效率将随着本振光能量提高而增加,变化趋势与两混频光能量相等的情况一致。为了分析方便,这里主要针对两束光能量相等的情况,数值仿真分析光轴偏移对光斑重叠效率的影响。

设两混频光斑总能量相等,光电探测器在光斑中心位置,光敏面的大小等于共轴时两光斑重叠覆盖面,则当光轴发生偏移时有一部分重叠面积不能落到光敏面上。如图 3 所示,图 3(a) 给出矩形本振光和高斯信号光混频时光轴偏移情况;图 3(b) 给出高斯本振光和高斯信号光混频时光轴偏移情况。



(a) 矩形光斑和高斯光斑 (b) 高斯光斑和高斯光斑
(a) Rectangle spot and Gaussian spot (b) Gaussian spot and Gaussian spot
图 3 不同光斑叠加时光轴偏移情况

Fig. 3 Different spots structure overlapping with optical axis deviation

图4给出了不同结构光斑重叠时效率 k 随光轴偏移量 r_0 变化的曲线,从图中可以看出:随着偏移量的增大,重叠效率 k 不断减小;当偏移量在 ± 0.5 mm内时,Rect + Guass曲线较为平坦;Rect + Guass的重叠效率 k 从0.796开始减小,当偏移量增大到0.4 mm时, k 就降到0.75,增大到1 mm, k 降低到0.55; Gauss + Gauss在没有偏移的理想情况下 k 为1,当偏移量增大到0.4 mm时, k 就降低到0.72,增大到1 mm, k 就已经降低到0.45左右。分析表明,实际上很难做到光斑共轴,采用能量均匀分布的光束对相干光探测光路对准有利,只要偏移量控制在一定范围可保持较高的探测效率。

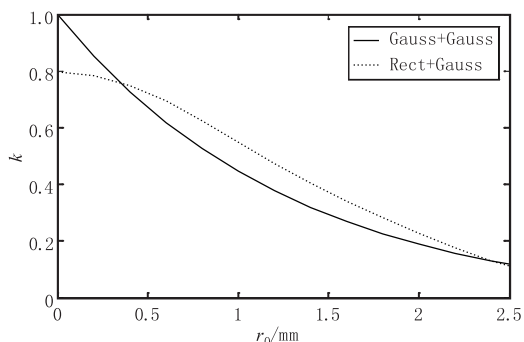


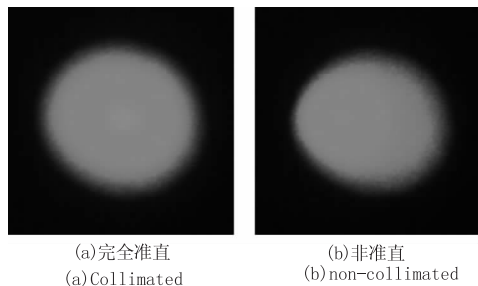
图4 重叠效率 k 与光轴偏移量 r_0 的关系
Fig. 4 Relation of k and optical axis deviation r_0

4 实验测试与分析

为了验证光斑重叠效率模型的有效性,搭建声光偏转效应相干光探测系统对光束特性进行实验测试。信号光直径为1.5 mm高斯光斑,参考光为经光束整形器输出获得直径为3 mm的均匀光斑,通过合路、压缩为2 mm的光斑入射到光电探测器。

4.1 光轴偏移与光电转换效率

实验中在射频信号作用下,衍射信号光在2 mm左右横向移动。图5为重叠光束到达光电探测器时的光斑,设定光电探测器光敏面在中心位置,图5(a)为完全准直状态下的图,此时重叠光斑可以全部落到光敏面;图5(b)为信号光左偏移1 mm的光斑,图中左边部分重叠光不能完全注入光敏面中。



(a)完全准直 (a)Collimated
(b)非准直 (b)non-collimated

图5 到达光电探测器光敏面的光斑图

Fig. 5 Image of coherent light beam arrive at photosensitive surface

图6为光电探测器的光电转换效率 η 随信号光光轴偏移变化的曲线。图中曲线与图4中Rect + Guass曲线形状相近,可见光电转换效率与光斑的重叠效率密切相关, η 随光斑在光电探测光敏面上的重叠效率增加而增加。由于重叠光斑偏离光敏面, η 从光束完全准直状态下的0.75随着偏移量 r_0 的增大而降低, r_0 越大对光斑相干混频的影响就越大。在 r_0 为0.1 mm内 η 下降缓慢趋于平缓,而大于0.1 mm时 η 迅速减小,所以在某种程度上可以说 r_0 为0.1 mm内时两光束都处于准直状态,选用能量分布均匀的光斑更有利于光束准直。

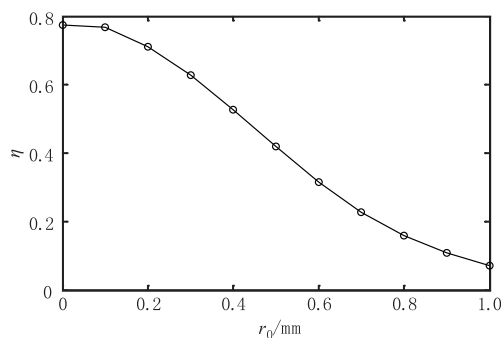
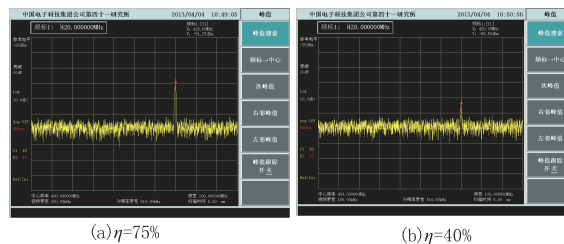


图6 光电转换效率与光轴偏移关系
Fig. 6 Relation of photoelectric conversion efficiency and optical axis deviation r_0

4.2 中频信号频谱

系统在射频中心频率为400 MHz,带宽为100 MHz进行测试,用万用表监测光电探测器的直流输出端的随偏移量变化时电压值,经转换后得到电功率变化规律;同时采用频谱仪对比光电模块中频输出信号频谱进行监测,通过两种输出状态比较两者在光轴偏移与转换效率变化趋势的一致性。如图7所示,射频为420 MHz时光电转换效率为75%和40%两点的频谱。由图可见随着光电转换效率的降低,系统输出的中频信号功率也随之减小,电功率与中频信号功率输出的变化趋势是一致的。



(a) $\eta=75\%$ (b) $\eta=40\%$

图7 不同光电转换效率对应的频谱图

Fig. 7 Different photoelectric conversion efficiency corresponding spectrum

5 结 论

从高斯光斑和矩形光斑混频出发,分析了信号光偏移和本振光能量对相干光探测效率的影响,为后续相干光通信系统的构建提供了一些有益的参考。理论分析与实验结果表明,激光光束的准直性、均匀性以及本振光的能量直接影响相干光探测性能,采用能量分布均匀的光斑有利于光束对准和匹配。在实际应用中,相干光探测效率还与探测器的特性参数和光敏面尺寸的利用率有关,根据光电探测器的有效光孔可以适当调节光斑大小以及光轴位置,以确保系统获得最佳的探测效率。相干光探测技术在弱信号检测中具有极大优势,研究激光光束的空间传输能量分布特性对实际应用意义重大,在空间相干光探测系统应用中,应综合考虑各种因素,设计与之相匹配的光学系统,充分利用有效的光斑能量,使系统性能达到最优。

参考文献:

- [1] Wang Chunhui, Gao Long, Pang Yajun, et al. Experiment investigation for relation between beam splitter coefficient and signal-to-noise ratio of $2\mu\text{m}$ balanced coherent system [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1104002 - 1 ~ 1104002 - 6. (in Chinese)
王春晖, 高龙, 庞亚军, 等. 光束分束比对 $2\mu\text{m}$ 平衡式相干探测系统信噪比影响的实验研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1104002 - 1 ~ 1104002 - 6.
- [2] Kamal K Das, Khan M Iftekharuddin. Heterodyne detection using Hexagonal Detector: Effects of beam profiles and phase front misalignment [C]. Proceedings of the IEEE, 1997, 1: 476 - 478.
- [3] Liang Qiaochuan, Wang Ying, Chen Peifeng, et al. Investigation of spatial mismatch problems in laser heterodyne detection [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(1): 43 - 50. (in Chinese)
梁乔春, 王英, 陈培锋, 等. 激光外差探测中的空间失配问题研究[J]. 激光与红外, 2011, 41(1): 43 - 50.
- [4] Wang Qi, Wang Chunhui, Shang Tieliang. Heterodyne efficiency of coherent detection with Gaussian local - oscillator and airy spot signal beam [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30 (Suppl): 183 - 186. (in Chinese)
王琪, 王春晖, 尚铁梁. 高斯本振光和爱里斑信号光相干探测的外差效率[J]. 中国激光, 2003, 30(增刊): 183 - 186.
- [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): 1006001 - 1 ~ 1006001 - 6. (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): 1006001 - 1 ~ 1006001 - 6.
- [6] Li Xiaona, He Ning, Deng Deying. Research on phenomenon of intermodulation in detection of multi - frequency signals based on acousto-optic deflection [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2504 - 2507. (in Chinese)
李小纳, 何宁, 邓德迎. 声光偏转多频信号同时探测互调现象研究[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2504 - 2507.
- [7] DICKEY F M, HOLSWADE S C, et al. Laser beam shaping [J]. SPIE, 2000, 4095: 1 - 216.
- [8] Gao Yuhan, An Zhiyong, Li Nana, et al. Optical design of gaussian beam shaping [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1464 - 1470. (in Chinese)
高禹含, 安志勇, 李娜娜, 等. 高斯光束整形系统的光学设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1464 - 1470.
- [9] Chen Kai. The research and design of the system that converting a Gaussian to a flattop beam [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011: 11 - 22. (in Chinese)
陈凯. 高斯光束整形为平顶光束整形系统的研究与设计[D]. 北京: 北京工业大学, 2011: 11 - 22.
- [10] Pan Yisi. Laser beam shaping using aspheric optical system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010: 9 - 29. (in Chinese)
潘毅思. 采用非球面光学系统实现激光光束整形[D]. 大连: 大连理工大学, 2010: 9 - 29.