

# 基于声光效应的同源共束相干探测方法研究

何 宁,周 江,廖 欣

(桂林电子科技大学信息与通信学院,广西 桂林 541004)

**摘 要:**以声光衍射为基础,提出一种基于声光效应的同源共束相干探测方法,对衍射光束特性及应用于相干光探测系统进行描述,分析了高斯光斑和平顶光斑实现相干探测的特征,给出系统实现的条件和依据,得出光斑均匀化与两束光斑的共轴位置关系,验证了这种方法的实现基础,实验测试表明声光互作用与相干探测技术结合在通信探测系统应用中具有一定优势,采用均匀化光斑可提高相干光探测的效果,接收性能可靠。

**关键词:**声光效应;同源共束;布拉格衍射;光斑均匀化;相干探测

**中图分类号:**TN911 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.018

## Research on coherent detection method with one source and collinear beam based on acousto-optic effect

HE Ning, ZHOU Jiang, LIAO Xin

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

**Abstract:** Based on the acousto-optic effect, this paper presents a new coherent detection method with a same source and a common beam. It describes the characteristics of diffraction beam for coherent optical detection system. And it analyzes the characteristics of coherent detection by using a Gaussian spot and a flattened spot respectively. Given the conditions and methods of realizing this system, it obtains the homogenization and the coaxial relations between the two spots, which can verify the feasibility of this method. The experiments prove that there are advantages in the communication detection system by using the acousto-optic interaction and coherent detection technology. With the effect of homogenized spot, the effectiveness of optical coherent detection can be improved, which can make the receiver performance more reliable.

**Key words:** acousto-optic effect; same source and collinear beam; Bragg diffraction; spot homogenization; coherent detection

### 1 引言

声光器件是非线性器件,它可作为信号调制器件被用于通信系统中,其衍射效率受控于被承载信号的幅度、频率和相位,利用光栅特性可进行光域中的信号处理,广泛运用在电子侦察、雷达测距等声光信号处理中。相干光探测的高灵敏度和优越的信号选择性,非常适用于现代通信领域以及弱信号环境下的通信技术,近几年受到业内人士的极大关注<sup>[1]</sup>。运用声光器件可以快速并有效地控制光束的频率、相位和振幅,并随机改变光束的传播方向。

本文基于声光衍射和相干光探测基本原理,在常规相干光探测基础上,提出一种基于声光效应的同源共束相干光探测的系统和方法。

### 2 声光衍射及应用<sup>[1]</sup>

声光效应是声波在介质中传播引起介质折射率发生周期性变化,使通过介质的光波发生衍射。

**基金项目:**国家高技术研究项目(No. 2007AA0860)资助。

**作者简介:**何 宁(1958 -),男,研究员,主要从事光通信方向的教学和研究。E-mail: eicnhe@guet.edu.cn

**收稿日期:**2012-03-23

图 1 为声光衍射原理。

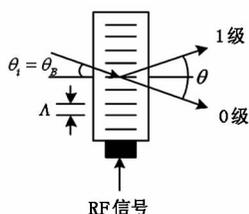


图 1 声光衍射原理图

Fig.1 principle diagram of Acousto-optic diffraction

根据布拉格衍射的产生条件和图中几何关系，

能够得出布拉格方程

$$\begin{cases} \sin\theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda} \\ \theta_i = \theta_B \end{cases}$$

图 1 中,  $\theta$  为声光偏转角,  $\theta_B$  为布拉格角, 由于布拉格角一般很小, 所以有  $\theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda}$ , 其中  $\lambda$  为光波在介质中的波长,  $\Lambda$  为声波在介质中的波长, 则:

$$\theta = 2\theta_B = \frac{\lambda}{\Lambda} = \frac{\lambda_0}{nvf} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_0$  为光波在真空中的波长;  $n$  为晶体的折射率;  $v$  为介质中的声速;  $f$  为介质中的超声波频率。由式(1)可知, 随着超声波频率的改变, 衍射角也发生相应变化, 利用频率和衍射角的这种变化关系可以达到控制激光束方向的目的。

声光衍射输出的 0 级光斑和 1 级光斑存在一个固定衍射角关系, 通过适当的光学处理可将这两束光斑传输方向实现共轴, 用于实现相干光探测。同时, 对于正常布拉格衍射, 入射光束与出射光束具有相同的偏振状态。由于入射激光是同一个光源, 其频率、相位差和偏振态的变化是一致的, 两束光沿着同一方向平行传输正好满足相干条件, 采用光电探测器可完成两光束混频, 获得所需的相关信息。

### 3 相干光探测原理<sup>[2]</sup>

光相干探测的工作原理框图如图 2 所示。假设同偏振方向的信号光和本振光的电场分别为:

$$E_s(t) = A_s \cos(\omega_s t + \varphi_s) \quad (2)$$

$$E_L(t) = A_L \cos(\omega_L t + \varphi_L)$$

式中,  $A_s$  和  $A_L$ ,  $\omega_s$  和  $\omega_L$ ,  $\varphi_s$  和  $\varphi_L$  分别是信号光与本振光的振幅、角频率和位相。光电探测器的响应度设为  $R$ , 用平均光功率表示的输出电流为:

$$I(t) = RP_s + RP_L + 2R\sqrt{P_s P_L} \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)] \quad (3)$$

再将这个电流经过有限宽带的中频滤波器, 将直流成分滤出后得到的中频输出电流  $I(t)$  为:

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_L} \cos[(\omega_L - \omega_s)t + (\varphi_L - \varphi_s)] \quad (4)$$

公式(4)表明, 中频电流与本振光功率的平方根成正比, 所以只要本振光功率足够大, 就算信号光功率非常小, 仍然可以实现对微弱信号的探测, 这个中频信号包含了信号光所携带的振幅、频率和相位全部信息。

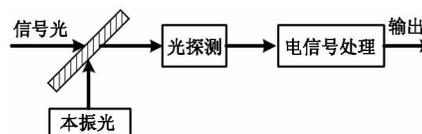


图 2 光相干探测的工作原理框图

Fig.2 principle diagram of optical coherent detection

### 4 光斑特性分析<sup>[5-8]</sup>

一般情况下激光器输出的光斑为高斯光斑, 其功率为非均匀分布, 中间强两边弱, 若要实现相干光探测, 两束光斑的共轴性和光斑分布的均匀性则是体现探测效果的关键。经布拉格衍射后除了 0 级光斑外, 只存在 +1 级光斑或 -1 级光斑, 这些光斑有共性也有个性, 其共性是相位和偏振态是一致的, 且能量分布是相同的。个性是光强和光斑大小不一致, 0 级光斑的强度远大于 1 级光斑, 且光斑尺寸也大于 1 级光斑, 0 级光斑不携带信息, 1 级光斑携带信息。若将这两束光斑进行光学处理使其产生一定的共轴和重合, 把 0 级光斑作为相干光探测的本振光, 而 1 级光斑作为相干光探测的信号光, 可实现相干光探测。针对高斯光斑和平顶光斑两种条件, 分别对相干光探测效果进行分析。

#### 4.1 高斯光斑<sup>[3]</sup>

高斯光束在空间中以非均匀高斯球面波的形式传播, 在传播过程中曲率中心不断改变, 其基模激光束光强在横截面内的分布规律在数学上表现为高斯函数。高斯光束的振幅表示为:

$$A(r, z) = \frac{A_0 \omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{r^2}{\omega^2(z)}} \cdot e^{-i \cdot [\frac{kz}{2} - \psi]} \quad (5)$$

其中,  $A_0$  为振幅常数, 束腰  $\omega_0$  为  $z=0$  处的场振幅减少到最大值的  $1/e$  倍时的  $r$  值, 它是高斯光束光斑半径的最小值。瑞利距离  $Z_0$  表示光束从束腰处开始传播到光斑面积增大到最小值的 2 倍时所经过的距离,  $Z_0 = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$ 。高斯光束的光斑半径  $\omega(z) =$

$\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{Z_0}\right)^2}$ 。图 3 所示是束腰半径为 0.5 mm 的高斯光束在束腰处的光强分布图。激光光强分布的非均匀性, 限制了激光的应用范围。如果采用能量分布为高斯型的光束进行相干光探测, 由于光斑能量在横截面的分布是中间强, 两边弱, 实现相干的两

束光斑的重合位置对探测效率影响较大,在中心位置探测效率高,而偏离中心位置探测效率低,这对光电探测器的位置放置存在一定局限。

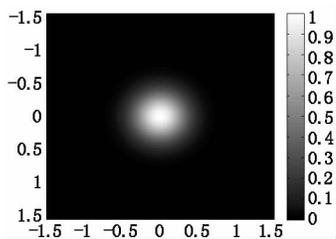


图3 束腰半径为0.5 mm的高斯光束在束腰处的光强分布

Fig. 3 the intensity distribution of Gaussian beam in the waist at the condition of  $\omega_0 = 0.5$  mm

### 4.2 平顶光斑

对于确定的高斯光束,激光束的腰斑半径  $\omega_0$  与远场发散角  $\theta$  的乘积是一个常数。可以通过聚焦或准直的方法来减小腰斑半径或压缩远场发散角<sup>[3]</sup>。因此,要实现光斑能量分布的均匀,应该将能量分布为高斯型的变成平顶型的。平顶光束数学物理模型的场分布可表示为:

$$E(x, 0) = \exp\left[-\frac{(N+1)x^2}{\omega_0^2}\right] \sum_{n=0}^N \frac{1}{n!} \left[\frac{(N+1)x^2}{\omega_0^2}\right]^n \quad (6)$$

因此,要实现光斑能量分布的均匀,应该将能量分布为高斯型的变成平顶型的。平顶光束数学物理模型的场分布可表示为式(6)中  $N$  和  $\omega_0$  分别是平顶高斯光束的阶数和束腰宽度。当  $N = 0$  时,平顶高斯光束将演变为基模高斯光束。当  $N \rightarrow +\infty$  时,平顶高斯光束将演变为宽度等于  $2\omega_0$  的截断平面波<sup>[4]</sup>。图4为平顶光斑能量分布。

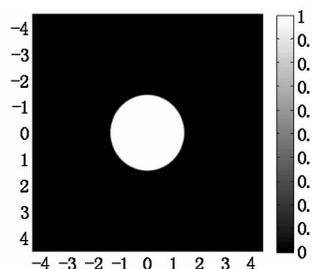
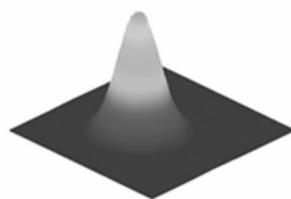


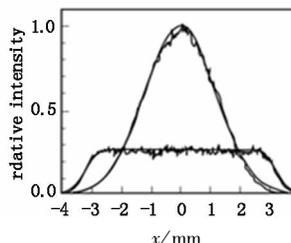
图4  $N = 4, \omega_0 = 0.5$  时的平顶高斯光束在束腰处的光强分布图

Fig. 4 the intensity distribution of flattened Gaussian beam in the waist at the condition of  $N = 4, \omega_0 = 0.5$

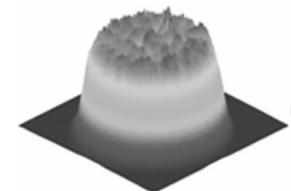
利用非球面透镜可以将高斯光束整形为平顶光束。图5为光斑整形原理,如果采用这种能量分布均匀的光斑进行相干光探测,其探测效果将会得到提高,接收端光路对准也容易实现,重合的光斑对位置没有严格要求。



(a) 高斯光束



(b) 整形系统



(c) 平顶光束

图5 光束整形原理

Fig. 5 principles of beam shaping

### 5 系统组成与实验

同源共束相干探测系统是在传统相干光探测系统的基础上,运用声光效应和激光束的传输变换等原理而改进的一种新型探测系统。这种探测方法区别于传统相干探测的特点是不需要使用两台功率与频率均相同的激光器,而是使用一台激光器实现同源传输。相干光探测系统的组成结构如图6所示,系统包括激光器、光斑扩束均匀化、柱面镜、声光偏转器、光路聚焦系统、光斑准直器及光电探测器。激光束发出的高斯光束经过光束整形,得到出射光束均匀化,使得光斑强度变换为径向均匀分布的矩形光束,并由柱面镜将光斑压缩成为适合于声光偏转器有效窗口的光斑。通过声光偏转器与输入的射频信号进行声光相互作用产生布拉格衍射效应,将这样的两路相干光束通过光路聚焦和准直系统,使得衍射输出的两条光束平行传输,最后利用光电探测器完成两路光信号混频,通过频谱仪可测量 RF 信号的变化。

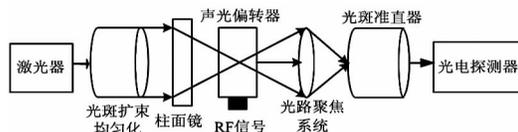


图6 同源共束相干光探测系统组成结构

Fig. 6 the structure of coherent optic detection system with a same source and a common beam

如果 0 级光斑在整形后的有效面积是均匀的,当射频信号频率变化时,1 级信号光光斑在参考光光斑内左右移动,并在光电探测器有效区域内,无论信号光落在参考光的任何区域,其功率的能量相同,相干探测的效果将是一致的。图 7 为实验系统,激光器的波长为 532 nm,光束整形器的波长为 520 ~ 550 nm,输入光斑和输出平顶光斑大小均为 6 mm,声光偏转器工作频率为 400 MHz,响应带宽为 200 MHz,有效光孔尺寸为 2 mm × 6 mm。

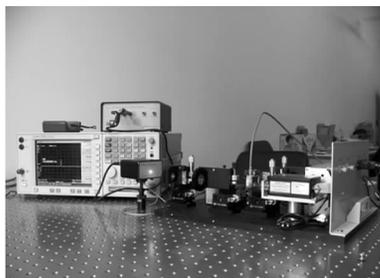


图 7 实验测试系统

Fig.7 experiment testing system

实验中对光斑整形、光斑形状及位置关系进行了测试,图 8 为测试光斑图,布拉格衍射中,0 级光斑的面积大于 1 级衍射光斑。



图 8 光斑位置关系

Fig.8 spot position relationship

图 8 中大光斑的能量分布具有较好的均匀化性,小光斑在其上的任何位置重合部分功率叠加具有相同效果,当频率变化时,1 级光斑在 0 级光斑内一定范围移动,只要将光斑重合部分对准光电探测器,便可实现光束的相干混频。系统能完成被测 RF 信号的频率跟踪,探测效果稳定可靠,灵敏度达到 -62 dBm。

## 6 结 论

从声光效应原理出发,利用声光测频原理和光学聚焦原理搭建同源共束相干探测系统,并对空间光束整形系统进行了理论分析,通过对两束高斯光束经过整形后的空间光能量分布情况分析,得到光

斑均匀化和两束光斑的共轴位置关系对信号探测带来的影响关系,保证带宽内相干探测的稳定可靠。该系统设计简单方便、结构紧凑、性能可靠,能更好的体现声光相互作用与相干探测技术相结合在通信接收系统应用的优势。

## 参考文献:

- [1] Fu Qiong, Jin Tao, Zhou Quan. Research of the beam steering theory based on acousto-optic effect [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36 (6): 1083 - 1087. (in Chinese)  
付琼,金韬,周诠. 基于声光效应的光束偏转控制理论研究[J]. 光子学报, 2007, 36(6): 1083 - 1087.
- [2] Xu Nan, Liu Liren, Wan Lingyu, et al. Coherent detection of position errors in space laser coherent communications [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30 (2): 347 - 351. (in Chinese)  
许楠,刘立人,万玲玉,等. 空间相干激光通信中目标位置误差的相干探测[J]. 光学学报, 2010, 30(2): 347 - 351.
- [3] Lü Baida. Laser Optics; Laser beam propagation and beam quality control [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. (in Chinese)  
吕百达. 激光光学: 激光束的传输变换和光束质量控制[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992.
- [4] Luo Shirong. Flat-topped beam characterization, simulation and Intensity-moments-based laser beam quality [D]. Chengdu: Sichuan University, 2003. (in Chinese)  
罗时荣. 平顶分布光束的描述, 计算模拟和基于强度矩方法的激光光束质量研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.
- [5] Chen Kai. The research and design of the system that converting a Gaussian to a flattop beam [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. (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.
- [6] Mohamed Salem, Jannick P Rolland. Hetero-dyne efficiency of a detection system for partially coherent beams [J]. Opt Soc Am, 2010, 27(5): 1111 - 1119.
- [7] Stefan Heinemann, Lars Leininger. Fiber coupled diode lasers and beam-shaped high-power stacks [C]. SPIE, 1998, 3267: 116 - 124.
- [8] F Daiminger, F Dorsch, D Lorenzen. High power laser diodes, laser diode modules and their application [C]. SPIE, 1998, 3682: 13 - 23.