

基于声光偏转的载频相干探测研究

何 宁, 蒋红艳

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘 要:基于声光偏转和相干光探测原理, 构建了频率测量系统。从改善空间光相干探测效率出发, 提出一种将空间光经声光偏转后注入保偏光纤的信号处理方法, 并具体讨论了如何利用准直-聚焦透镜的注入系统保证带宽内信号光的注入效率。实验结果表明, 此测频系统能准确、实时测量信号的频率, 在测频带宽内其截获率达到 100%。

关键词:声光偏转; 激光注入; 保偏; 相干探测; 频率测量

中图分类号: TN247

文献标识码: A

Research on the coherent detection for frequency based on acousto-optic deflection

HE Ning, JIANG Hong-yan

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

Abstract: Based on the principles of acousto-optic deflection and coherent optical detection, a frequency measurement system is established. In order to improve the efficiency of space optical coherent detection, a method that signal and reference beams are respectively injected into corresponding polarization-maintaining (PM) fibers before combining is proposed. Meanwhile, how to use collimating and focusing lens to ensure the injection efficiency of the signal beam over the whole frequency band of operation is discussed in detail. Experimental results show that the system can achieve accurate and real-time frequency measurement, and its interception rate reach to 100% within the frequency bandwidth of measurement.

Key words: acousto-optic deflection; laser injection; polarization maintaining; coherent detection; frequency measurement

1 引 言

20 世纪 30 年代初, 科学家就已在实验中论证了声光互作用现象。但由于声光互作用所引起光的频率和方向的变化均很小, 对非相干光没有什么使用价值。直到 20 世纪 60 年代, 激光的问世促进了声光效应理论和应用研究的迅速发展, 利用声光效应制成的声光偏转器的应用十分广泛。它是一种很有实用价值的光学信号处理器, 用在光信息处理、光通信、光学传感方面, 同时也是集成光学频谱仪、可调谐滤波器、扫描仪、卷积器、光开关等光学器件的重要组件。在军事上, 利用声光偏转器的声光技术是现代电子战的关键技术之一。同时随着激光的问

世, 相干光探测技术也快速发展并得到广泛应用。相干光探测技术, 可用来实现高灵敏度信号接收或处理频率、相位等信息, 改善信号处理系统的频率选择性, 增强信号传输的抗干扰能力。利用声光偏转效应和相干光探测技术建立的信号频率测量系统具有实时性好、高速并行处理能力、截获率高、带宽大、灵敏度高等特点, 同时可以分析处理原始信号的其他信息, 如幅度、位相、到达方向 (DOA) 以及到达时间 (TOA) 等, 在现代信号密集、形式复杂的大带宽

作者简介: 何 宁 (1958 -), 研究员, 主要从事光通信方向的教学和研究。E-mail: ofca@163.com

收稿日期: 2009-06-02

通信和雷达应用等信号接收处理领域中显示出了巨大的优势^[1-2]。

2 系统实现原理

2.1 声光偏转原理

声光器件将电信号转换成携带其振幅和相位信息的超声波。超声波在介质中传播时通过光弹效应引起介质折射率变化。这种折射率变化载有声音的振幅和相位信息,效果上相当于建立了折射光栅,其间隔等于声波的波长(它与接收的 RF 信号的波长成正比)。这种光栅效应引起的衍射光的振幅和相位正比于输入的原始信号。超声波频率随不同频率的接收信号改变时,光栅间隔也跟着改变。由于光束偏转角度与光栅间隔成比例,所以它也正比于接收的 RF 信号频率^[2]。

声光衍射分为拉曼-奈斯(Raman-Nath)衍射和布拉格(Bragg)衍射两类。在低声频和相互作用长度不太大的情况下,发生拉曼-奈斯衍射。当光垂直于声波传播方向入射时,拉曼-奈斯衍射光谱为对称排列在光束通过的两边、且间距相等的衍射极值分布,其中零级光强度最大,且衍射级数越高,相对光强越小。在高声频和相互作用长度较大的情况下,发生布拉格衍射,其衍射光谱由两个相应于 $m=0$ 和 $m=1$ (或 $m=-1$) 的极值组成,不存在 $m>1$ 或 $m<-1$ 的高级衍射极值^[3]。

工作于 Bragg 模式的声光偏转器模型如图 1 所示。由 Bragg 衍射理论分析可知,光束以 θ_i 角入射产生衍射极值应满足布拉格条件^[4]: $\theta_i = \theta_d = \theta_B$ 和 $\sin\theta_B \frac{\lambda}{2n\lambda_s}$ 。

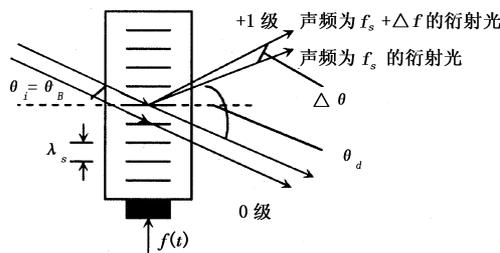


图 1 声光偏转器模型

Fig.1 model of acousto-optic deflector

布拉格角一般很小,可写为:

$$\theta_B \approx \frac{\lambda}{2n\lambda_s} = \frac{\lambda}{2n\nu_s} f_s \quad (1)$$

衍射光与入射光间的夹角为偏转角,它等于布拉格角 θ_B 的 2 倍,即:

$$\theta_d = 2\theta_B = \frac{\lambda}{n\nu_s} f_s \quad (2)$$

其中, θ_d 为声光偏转角; θ_B 为布拉格角; n 为晶体的折射率; λ_s 为声波波长; λ 为光束的波长; f_s 为介质中的声频, ν_s 为介质中的声速。

若同一时间在换能器上加多个不同频率的电信号,则介质中将同时得到对应于每个信号频率的一列超声波。每列超声波与入射光束相互作用产生相应的一阶主衍射束,其方向偏离入射光束的角度 θ_i 为^[5]:

$$\theta_i = \frac{\lambda}{n\nu_s} f_i \quad (i=1,2,3,\dots,N) \quad (3)$$

可以看出:改变超声波的频率,就可以改变其偏转角,从而达到控制光束传播方向的目的。超声频率改变 Δf 引起光束偏转角的变化为:

$$\Delta\theta = \frac{\lambda}{n\nu_s} \Delta f_s \quad (4)$$

所以,当声光器件工作于布拉格模式时,衍射光束的方向与超声波的频率和入射光束的方向有关,而且偏转范围的大小和频率改变的大小成正比。

2.2 激光注入与光相干探测

在光电检测器接收端面,光束应尽可能地会被聚成理想的光斑,然而光在空间传输时极易受外界环境影响,如背景杂光、大气湍流等,从而引起光斑闪烁、光束漂移和光斑分裂。此测频系统中,为了使后端光学系统调整简单,降低背景光及振动对合路的影响,从改善空间相干光探测效率出发,将经声光衍射后的空间光注入保偏光纤进行传输与合路,克服了传统相干探测中光偏振态难控制的缺点,使信号光和参考光偏振态和传输方向能更好保持,提高相干光探测信噪比。激光注入的关键就是使得工作带宽内所有的一级偏转光都能通过注入系统耦合进光纤,保证一定的激光注入效率,进一步提高相干光探测效果。为了实现这一目的,必须使经过注入系统(准直、聚焦透镜组)作用后的束腰和数值孔径分别小于保偏光纤的相应参数,即要求适当控制声光偏转器、准直透镜、聚焦透镜、光纤端面间的距离关系。

沿 z 轴传播的基模高斯光束在自由空间传播时是由束腰逐渐向两边发散的,发散程度用发散角 θ 来衡量,其定义为:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2w(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (5)$$

如果高斯光束在空间传输时遇到透镜,光束参数就要改变。图 2 所示为透镜对高斯光束的变换。图中, w_0 为入射高斯光束束腰半径; w'_0 为出射高斯

光束束腰半径; l 为 w_0 与透镜 M 的距离; l' 为 w'_0 与透镜 M 的距离。它们之间满足下面关系:

$$w'_0 = \frac{Fw_0}{\sqrt{(F-l)^2 + f_0^2}} \quad (6)$$

$$l' = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + f_0^2} \quad (7)$$

式中, F 为透镜的焦距; λ 为高斯光波长; f_0 为高斯光束的共焦参数,且 $f_0 = \pi w_0^2/\lambda$ 。

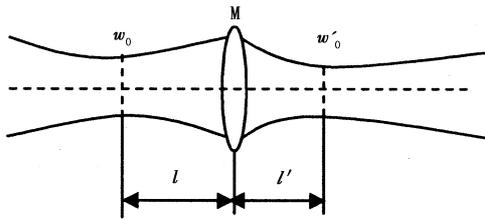


图2 高斯光束通过透镜后的变换

Fig.2 Gaussian beam's change through lens

式(6)、式(7)表征了高斯光束的成像规律,即物高为 $2w_0$,物距为 l 的高斯光束经过焦距为 F 的透镜的变换规律。由式(6)可看出,像方束腰半径 w'_0 由物方束腰半径 w_0 、焦距 F 、物距 l 及共焦参数 f_0 共同决定。

数值孔径NA的表达式为:

$$NA = n \sin \frac{\theta}{2} = n \sin \frac{\lambda}{\pi w} \quad (8)$$

式中, n 为光波所在介质的折射率。可见,对于一定的光波长,束腰半径与数值孔径的变化趋势是相反的。把式(8)代入式(6)、式(7),得到数值孔径经透镜的变换规律(n 取为1):

$$NA' = \sin(\arcsin NA_0 \times \sqrt{\left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{F\pi \arcsin^2 NA_0}\right)^2}) \quad (9)$$

$$l'F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + (\lambda/\pi \arcsin^2 NA_0)^2} \quad (10)$$

选择准直和聚焦透镜组作为注入系统,如图3所示。

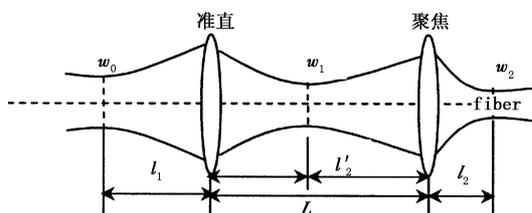


图3 注入系统

Fig.3 injection system with two lens

图3表示的过程为:入射光的束腰半径为 w_0 、数值孔径为 NA_0 的高斯光束,经准直、聚焦透镜作用后,束腰半径和数值孔径分别变为 w_2 和 NA_2 ,再由光纤接收。而光纤只能接收满足 $w_2 \leq w_f$ 和 $NA_2 \leq NA_f$ 的光束,其中, w_f 和 NA_f 由光纤决定。为将入射光全部耦合进光纤,需要确定合适的物距、像距、透镜间距、准直透镜焦距和聚焦透镜焦距^[6]。

将经过上面光学变换后的信号光注入光纤传输,通过光纤耦合器与本振光合路后在一段保偏光纤中实现相干,由光电探测器完成信号混频,得到的差频电信号由后端电路进行处理。在相干光探测情况下,可获得信号光的全部信息,包括振幅、频率和相位。下式表示相干光探测时光生电流与信号各参量间的关系,给定光电探测器的响应度为 R ,则其得到的含有信息的光电流可表示为:

$$I(t) = 2R\sqrt{P_s P_L} \cos[\omega_{IF}t + (\varphi_L - \varphi_s)] \quad (11)$$

式中, P_s 和 P_L , φ_s 和 φ_L 分别是信号光和本振光的功率和位相,中频 ω_{IF} 为信号光和本振光角频率之差即 $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_L$ 。当 $\omega_{IF} = 0$,即本振光频率与信号光频率相等时,称为零差探测。当 $\omega_{IF} \neq 0$,即为光外差探测。因此,一个振幅调制、频率调制以及相位调制的光波所携带的信息,都能通过光相干探测方式获得。而直接光探测中,只能获取信号的幅度信息。由于相干光探测中参考光的加入,光生电流在一定程度上取决于参考光功率,因此,相对直接探测来说,相干探测使探测灵敏度大大提高了。并且,相干探测的中频滤波器比起直接探测的窄带滤波片具有良好的滤波性能,可以改善信号处理系统的频率选择性,增强信号传输的抗干扰能力^[7-8]。

3 系统的建立与分析

为了能分析频率、幅度等信息,系统利用光相干探测技术和声光偏转原理建立了声光信号处理系统,如图4所示。信号光载波和参考光是同频激光器,为提高探测信噪比,要求采用高频率稳定性和窄线宽的激光器。经扩束后的光斑完全覆盖声光偏转器有效光孔,这有利于保证声光偏转的互作用长度,适当调整光入射角使其满足布拉格衍射条件。RF信号是由空间截获并经下变频的(被测)雷达信号,它具有连续或瞬时性的特点,在RF信号作用下,声光偏转器发生布拉格衍射,+1(或-1)级光斑偏转

角度和强度与 RF 信号的频率和幅度成正比。利用上述激光注入系统对衍射光斑进行压缩变换,以便信号光有效耦合到保偏光纤中,在满足光纤束腰和数值孔径要求下,可有效提高激光注入效率。保偏光纤耦合器为 3 端口无源器件,其尾纤具有一定的保偏长度,采用保偏光纤合路是为了满足信号光和参考光的偏振特性及传输条件,有利于提高相干光探测信噪比和输出混频信号的稳定性。系统光路调整关键是要保证各光学器件的共轴,严格满足布拉格衍射条件和光束有效注入。根据器件参数和实验条件与目的,依据理论计算,仔细调整各光学器件之间的距离、角度及共轴性,适当控制信号光与参考光的功率比例关系,从而实现可靠、有效的相干光探测。

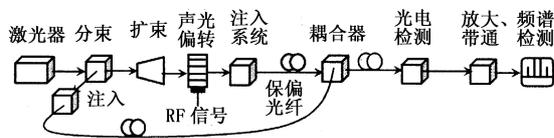


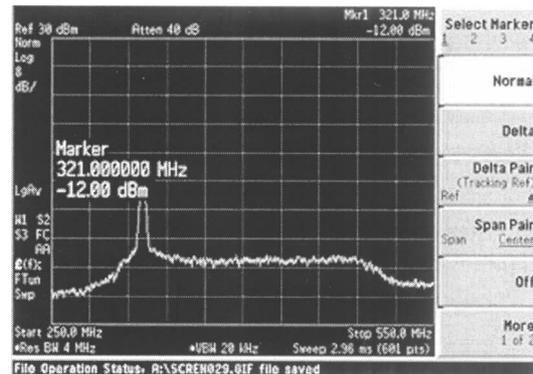
图 4 系统框图

Fig. 4 system block diagram

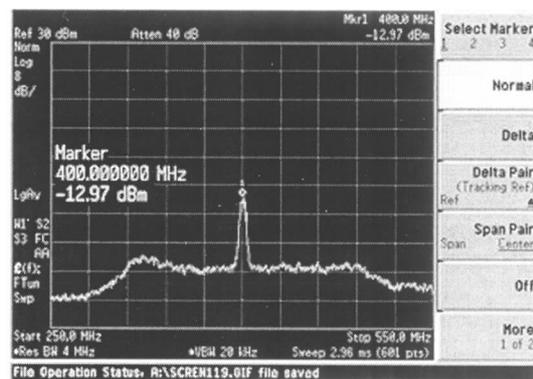
4 实验测试与结果

实验采用波长为 532 nm,谱宽为 10 MHz,输出功率为 50 mW 的单纵模激光器。声光偏转器的中心频率为 400 MHz,带宽为 200 MHz,布拉格入射角为 $\theta_B = 31$ mrad,渡越时间 $T = 2 \mu s$,可获得频率分辨率为 $\delta f = 1/T = 0.5$ MHz,最大偏转角 $\Delta\theta = 31$ mrad。中频滤波器的通带为 (300 ~ 500) MHz。考虑到实际操作中 0 级和 1 级衍射光斑是否可分和整个工作带宽内偏转的 1 级光斑都能有效耦合进保偏光纤,我们要求 1 级衍射光斑随着 RF 信号频率的改变限制在准直透镜中心附近小于 1 mm 的位置来回移动,保证激光光斑压缩和注入。由于带宽内 1 级光束偏转的范围很小,从而我们假设从声光偏转器出来的光束仍为高斯光束,且其发散角等于最大偏转角即 31 mrad。实验中的准直和聚焦透镜的焦距分别为 2.2 cm 和 1 cm,通过上述理论计算可知声光偏转器和准直透镜的距离应为 $l_1 = 6.5$ cm,聚焦透镜与准直透镜间距为 $L = 7.3$ cm,并使声光偏转器衍射光轴和两透镜同轴,同时保偏光纤入射端面与注入器相距 $l_2 = 1.7$ cm,这样经准直和聚焦后得到的数值孔径和束腰分别为 $NA_2 = 0.07$ 和 $w_2 = 2.4 \mu m$,且都分别小于光纤的相应参数,满足激光注入要求,实现

有效耦合。此外,适当调整控制信号光与参考光的光功率分光比(信号光远小于参考光),可使相干光探测效果达到最佳。实验采用频谱分析仪对被测信号频谱监测跟踪,射频信号频率范围在 (300 ~ 500) MHz 调整,频谱仪上可观察到频谱的位置变化,图 5 (a)和图 5 (b)为 321 MHz 和 400 MHz 两个跟踪点频的信号频谱示意图。



(a) 321 MHz



(b) 400 MHz

图 5 信号测量频谱图

Fig. 5 signal spectrum

由实验可知,此系统能实时准确地测量微弱信号的频率,并且只要在测频范围内保证一定的衍射效率和注入效率,其截获率可达到 100%。由于声光器件衍射效率的不均匀性以及边频处光束注入效率较低,通带边缘的谱功率小于中心频率处的谱功率,但是只要在频谱仪上能观测到信号,且满足一定分辨幅度,这种在带宽范围内信号增益不一致的现象可在后续信号处理中得到改善。

5 结束语

以声光器件为基础的声光信号处理技术具有大瞬时带宽、大动态范围和高速并行处理能力,在完成各种信号处理任务方面具有巨大的潜在能力,并且非常适合解决目前复杂环境下电信号处理中的各种问题。这种技术已经广泛应用于雷达、通信、电子战

等领域以实现频谱分析、频率分道、卷积与相关等功能。另外,采用相干光探测方法使得声光信号处理系统具有高处理增益从而能够提取淹没在噪声中的微弱信号,并且除频率之外,还能获得振幅、方位向、到达时间等其他信息。因此,结合相干探测的声光信号处理技术在信号处理方面具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘娟娟,邹建. 声光偏转工作模式及其应用研究[J]. 信息通信,2008,(4):20-23.
- [2] 程乃平. 声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004:101-109,13-20.
- [3] 安毓英. 光电子技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002:361.
- [4] 安毓英,刘继芳,李庆辉. 光电子技术[M]. 北京:电子工业出版社,2002:98-99.
- [5] Hecht D L. Multifrequency acoustooptic diffraction[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1997, 24(1):7.
- [6] 吴俊芳,王英,张凌. 高斯光束在光纤间的耦合[J]. 激光技术,2004,28(2):181-183.
- [7] Senior John M. Optical fiber communications: Principles and practice[M]. New York:Prentice Hall,1992:701-723.
- [8] 王清正,胡渝,林崇杰. 光电探测技术[M]. 北京:电子工业出版社,1994:198-204.

“第十九届全国激光学术会议”在京召开



2009年10月18~21日,第十九届全国激光学术会议在北京建银大厦隆重召开。本次会议由中国光学学会和电子学会主办,中国电子科技集团公司第十一研究所和固体激光技术国家级重点实验室共同承办。大会共收报告论文350篇(录用249篇),涉及国家实验室及国家重点实验室、部级重点实验室、科研院所、大专院校、知名企业90多家单位,参会代表300余人。

中国工程院院士周寿桓主持了大会开幕式,范滇元院士为大会致开幕词,中国电子科技集团公司

第十一研究所所长韩建忠致欢迎词,大会秘书长陈念江介绍本次会议的组织情况。

中国工程院副院长杜祥琬院士和陈良惠院士、许祖彦院士、张小民研究员、李儒新研究员、刘泽金教授、吕跃广研究员、王清月教授、马龙生教授、巩马理教授等知名专家代表出席了会议,并为大会分别作了《影响高能激光系统核心特征量的要素》、《深紫外固态激光(DUV-DPL)及应用的进展》、《高平均功率激光技术研究》等特邀报告12篇。

大会从激光物理,非线性光学与量子光学,光纤激光器,全固态激光器及新型激光器,激光信息及处理技术,激光医学,工业激光及其应用,激光材料,薄膜及元器件,光束传输、控制及光束特性等专业领域,分四个会场进行专题报告和交流。

本次会议的召开,为与会者展示研究成果,交流学术思想,了解在激光领域的最新进展,增进各地区学者之间的相互接触和了解提供了一个平台。不仅加强了我国同行间的联系与学术交流,也对促进相关学科专业的发展起到积极的推进作用,大会主席范滇元院士和周寿桓院士对会议的举办都给予了很高的评价。

(本刊通讯员提供)