

声光偏转效应在相干光检测的应用

廖 欣 何 宁 陈 明 陈名松

(桂林电子科技大学信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

摘要 为使现代电子侦察技术能适应信号密集、宽频谱、大动态的电磁环境,提出了一种基于声光偏转器实现相关光信号处理的方法,分析了射频信号频率变化与布拉格衍射角的关系,讨论了声光偏转效应对信号频率的空间滤波特性;在理论分析的基础上,构建了在可见光范围内实现声光偏转的相干光信号探测的实验系统,并通过计算机仿真对比,验证了这种方法的可行性。实验表明,采用波长为 630 nm 的单频激光,带宽为 200 MHz 的声光偏转器,其频率分辨率优于 1 MHz,频率信号的空间分离效果明显,接收灵敏度和信噪比得到改善。

关键词 声光偏转;相干光探测;频率测量;频谱;灵敏度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0278

Application of Coherent Optical Detection Technology Based on Acousto-optic Deflecting Effect

Liao Xin He Ning Chen Ming Chen Mingsong

(Information and Communication College,

Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract To adapt modern electronic reconnaissance techniques to the electromagnetic environment of dense signal, broadband spectrum, and large dynamic range, a coherent optical signal processing method based on acousto-optic deflector is presented. The relationship between the changes of radio-frequency signal frequency and Bragg diffraction angle is analyzed, spatial filtering characteristic resulted from acousto-optic deflection effects is discussed. On the basis of theoretical analysis, the experimental system using acousto-optic technique is established to achieve coherent optical signal detection in the visible light range. The feasibility of this method is proved by computer simulation results. Experimental results show that if the system uses a single-frequency laser with wavelength of 630 nm and a acousto-optic deflector with bandwidth of 200 MHz, the frequency resolution is better than 1 MHz, the space separation effect of frequency signal is obvious, and the received sensitivity and signal-to-noise ratio (SNR) are improved.

Key words acousto-optic deflection; coherent optical detection; frequency measurement; spectrum; sensitivity

1 引 言

20 世纪 30 年代声光效应开始进行了实验研究;60 年代,激光器的问世为声光现象的研究提供了理想的光源,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器件,如声光调制器、声光偏转器和可调谐滤光器等,在激光技术、光信号处理和集成光通讯技术等方面有着重要的应用。近年来,声光电技术结合的先进信号处理系统,可以实现许多其他技术所不能实现的功能。随着现代通信技术和雷达技术的发展,频率捷变技术和脉冲重复周期跳变技术在军事上得以广泛应

用,使用的电磁频谱正在日益变宽,对雷达信号的侦测和干扰提出了新的要求,传统的电子侦察接收机已经不能完全适应信号密集而复杂的电磁环境的要求^[1,2]。利用声光技术实现信号载频的测量具有分辨率高、带宽大、实时性好,可广泛应用于雷达信号处理、光电对抗等侦察技术中,为信号频率、相位、到达角的分析提供一种有效手段。本文讨论了声光效应和相干检测技术的基本原理,设计了一套能实现射频(RF)信号频率检测的实验系统,对系统应用的关键技术和参数进行了理论分析和实验仿真,系统的测量灵敏度和频率分辨率可以得到较大的提高。

基金项目:国家 863 计划(2007AA0860)资助项目。

作者简介:廖 欣(1968—),男,工程师,主要从事光电实验教学和科研工作。E-mail:liaoshin@guet.edu.cn

2 声光测量的基本原理

2.1 声光衍射机制

声光效应是指光通过某一受到超声波扰动的介质所发生的衍射现象。由于声光效应,当超声纵波以行波形式在介质中传播时,将引起介质的弹性应变作时间上和空间上的周期性变化,导致介质折射率也相应地产生正弦或余弦规律变化,当激光通过该介质后,会产生衍射现象,即声光衍射。衍射光的强度、频率和方向等随超声波场而变化,其中,衍射光的偏转角随超声波频率变化现象称为声光偏转;衍射光强度随超声波功率变化的现象称为声光调制^[3]。

设声光介质中的超声行波为沿 y 方向传播的平面纵波,其角频率为 ω_s ,波长为 λ_s ,波矢为 \mathbf{k}_s 。入射光为沿 x 方向传播的平面波,其角频率为 ω ,在介质中波长为 λ ,波矢为 \mathbf{k} 。当声光作用的距离满足 $L > 2\lambda_s^2/\lambda$,而且光束相对于超声波波面以某一角度斜入射时,在理想情况下除了非衍射(0级)光束之外,只出现1级(或-1级)衍射光束,如图1所示。这种衍射与晶体对X光的布拉格衍射很类似,故称为布拉格衍射。能产生这种衍射的光束入射角称为布拉格角。可以证明,布拉格角满足

$$\sin i_B = \frac{\lambda}{2\lambda_s}, \quad (1)$$

(1)式又称为布拉格条件。因为布拉格角一般都很小(几十毫弧度),衍射光相对于入射光的偏转角 φ 为

$$\varphi = 2i_B \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{V_s} f_s, \quad (2)$$

式中 V_s 为超声波波速, f_s 为超声波频率。在布拉格衍射的情况下,一级衍射光的衍射效率为

$$\eta = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{M_2 LP_s}{2H}}\right), \quad (3)$$

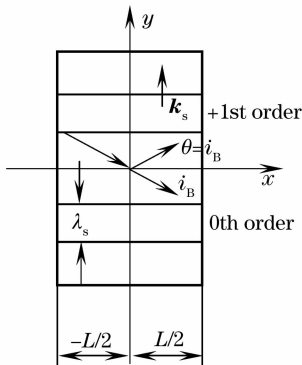


图1 布拉格衍射

Fig. 1 Bragg diffraction geometry

式中, P_s 为超声波功率, L 和 H 为超声换能器的长和宽, $M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho V_s}$ 为反映声光介质本身性质的常数, ρ 为介质密度, p 为光弹系数。

发生布拉格衍射时,一级衍射光的强度 I_1 为

$$I_1 = I_i \sin^2(\delta/2), \quad (4)$$

式中 δ 为与介质折射率和器件长度有关的参数

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(\Delta n) \frac{L}{\cos \theta_B}, \quad (5)$$

由(4)式可见,当 $\delta = \pi$ 时,有 $I_1 = I_i$,即入射光的全部光能由于布拉格衍射全部转移到一级衍射上,因此,理想的布拉格声光衍射的效率可达到100%。

2.2 相干光检测原理

频率相同、振动方向相同、相位差恒定的两束光称为相干光。相干光检测技术,不但可以大大提高信号探测的灵敏度,而且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。

典型的光相干探测系统如图2所示。在发送端,采用外光调制方式将信号以调幅、调相或调频的方式调制到光载波上,进行传输;当信号光传输到达接收端时,与一本振光信号进行相干混合,然后由探测器进行探测。设入射光场为 $V_i(t) = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)$,本振光场为 $V_o(t) = A_o \sin(\omega_o t + \varphi_o)$,则探测器的输出为两光波波频差的拍频信号。

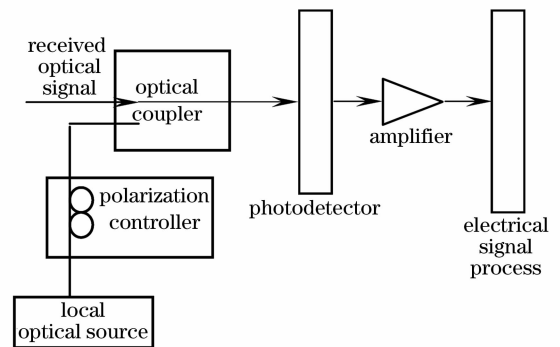


图2 典型的相干光探测系统

Fig. 2 Representative system of coherent optical detection

混频后的光电信号包括直流分量、二倍本振光频和二倍信号光频以及本振光和信号光的和频与差频分量,其中倍频项与和频项不能被光电器件接收,只有当 ω_0 和 ω_1 足够接近时,其差频 $\Delta\omega = |\omega_i - \omega_o|$ 处于光电探测器的通频带范围内才能响应,这样就能测量到信号光。

在相干检测中,需要保证已调制光波的偏振状态和单模光纤中的本征偏振状态相匹配。相干光探

测根据本振光信号频率与接收到的信号光频率是否相等,可分为外差检测和零差检测。而零差检测要求本振光频率与信号光频率严格匹配,并且要求本振光与信号光的相位锁定。

光相干探测技术在光信号接收和处理方面的优越性能使其可用来实现高灵敏度信号接收或处理频率、相位等信息。在一些非通信技术领域,如光纤传感、信号分析及测量等方面,光相干探测技术已经得到了很好的应用。

3 系统组成和关键技术

3.1 系统组成

频率测量系统的组成如图3所示。激光器采用谱线宽度满足相干光信号处理的单频激光器,经偏

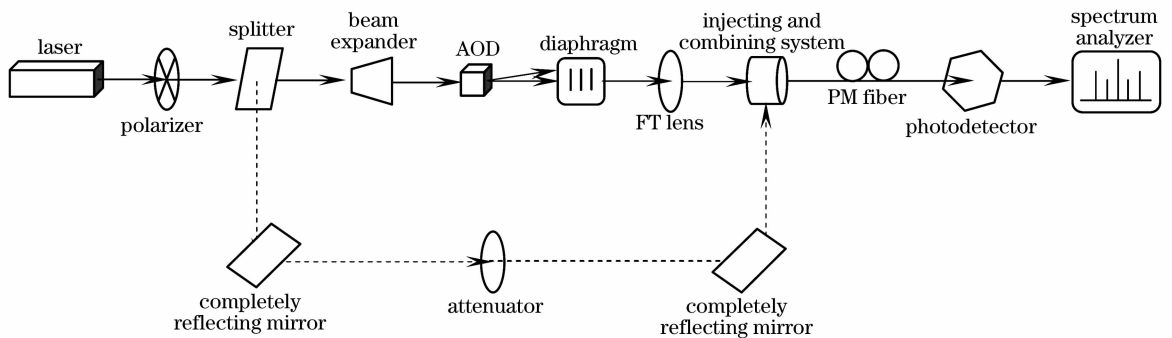


图3 测量系统组成

Fig. 3 Measuring setup

系统中的激光器波长为633 nm,输出功率为50 mW,考虑到实际应用中附加损耗影响,分光比2:8,即信号光为10 mW左右,参考光为40 mW左右。声光偏转器的频率分辨率可达1 MHz(晶体长度为8 mm),渡越时间为2 μ s。

声频信号动态范围大于50 dB,即声频信号可在10~5000 mV之间变化(功率2 μ W~500 mW)。实验系统主要验证激光器谱线宽、信号功率分光比、信号幅度对相干探测信噪比的影响,并对比直接光强度探测与相干光探测的改善程度,为后续研究奠定基础。

3.2 关键技术

3.2.1 对激光器的要求

由于采用相干光通信方法测量,激光器的频率稳定性是相当重要的。对于零差检测相干光通信系统,若激光器的频率(或波长)随工作条件的不同而发生漂移,就很难保证本振光与接收光信号之间的频率相对稳定性。外差相干光通信系统也是如此。

一般外差中频选择在0.2~2 GHz之间,当光

振镜起偏,产生水平偏振光,由分光器按照应用要求,将水平偏振光按一定比例分为信号光和参考光;信号光经准直均匀化之后变为适合声光偏转器输入的线型光斑,调整声光偏转器,使光能有效照射到声光偏转器的有效光孔并以布拉格角入射,在外加RF信号频率的控制下,声光偏转器的1级衍射光在声频带宽范围内偏转,且满足布拉格衍射条件要求,衍射光斑由光阑取出经FT透镜压缩处理后注入保偏光纤,在光纤合路器中与参考光合路,再经一段保偏光纤传输后,由PIN光电探测器完成光电转换(光信号混频)。参考光支路的衰减器用于适当控制参考光信号功率与信号光比例,以达到最佳探测。要实现相干光通信,信号光和参考光的光程要尽量接近,即光程差要小。

载波的波长为1.5 μ m时,其频率为200 THz,中频为载频的 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 。光载波与本振光的频率只要产生微小的变化,都将对中频产生很大的影响。因此,只有保证光载波振荡器和光本振振荡器的高频率稳定性,才能保证相干光通信系统的正常工作。

3.2.2 偏振保持技术

为了实现相干探测要求,信号光束与本振光束必须有相同的偏振方向,也就是说,两者的电矢量方向必须相同,才能获得相干接收所能提供的高灵敏度;否则,会使相干探测灵敏度下降。因为在这种情况下,只有信号光波电矢量在本振光波电矢量方向上的投影,才真正对混频产生的中频信号电流有贡献。若失配角度超过 60° ,则接收机的灵敏度几乎得不到任何改善,从而失去相干接收的优越性。因此,为了充分发挥相干接收的优越性,在相干光通信中应采取光波偏振稳定措施。目前,主要有两种方法:一是采用“保偏光纤”使光波在传输过程中保持光波的偏振态不变。而普通的单模光纤会由于光纤的机械振动或温度变化等因素使光波的偏振态发生

变化。“保偏光纤”与单模光纤相比,其损耗比较大,价格比较昂贵;二是使用普通的单模光纤,在接收端采用偏振分集技术,信号光与本振光混合后首先分成两路作为平衡接收,对每一路信号又采用偏振分束镜分成正交偏振的两路信号分别检测,然后进行平方求和,最后对两路平衡接收信号进行判决,选择较好的一路作为输出信号。此时的输出信号已与接收信号的偏振态无关,从而消除了信号在传输过程中偏振态的随机变化。

4 系统的仿真与分析

系统仿真主要采用 OptiWave 公司的 OptiSystem 6.0 作为仿真平台,通过计算机仿真进行相干光探测系统的性能研究。

4.1 激光器谱宽对系统性能的影响

由于激光器输出光谱的线宽对信号接收的灵敏度有较大影响,因此,在进行仿真时,首先通过改变激光器的输出光谱线宽,比较了激光器的输出光谱的线宽对接收信号波形和误码率的影响,实验结果如图 4 所示。结果表明,随着激光器线宽增加,接收端光信噪比下降,接收的光信号变差。

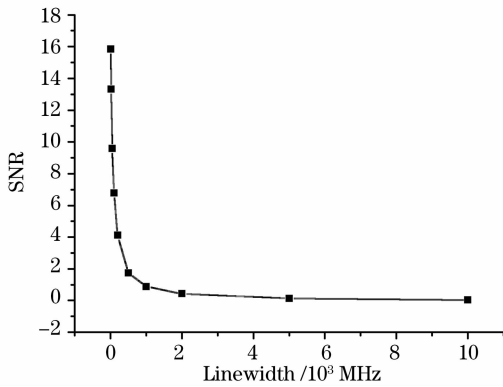


图 4 激光器谱宽对光信噪比的影响

Fig. 4 Influence of the laser linewidth on SNR

4.2 本振光强度对相干检测系统的影响

在仿真中,耦合器的信号光参考光分光比为 0.9,激光器的输出带宽取 100 MHz,将本振光支路衰减器衰减度从 100 dB 逐渐减小到 0 dB,系统中其他参数不变,实验结果如图 5 所示。结果表明,随着衰减器衰减度的增加,光信噪比迅速下降,当衰减下降到 40 dB 时,光信噪比降到接近最低,由于计算机的截断误差的原因,衰减器的衰减度大于 50 dB 时,信号光的强度比参考光的强度大 20 dB,参考光在计算中将被忽略。所以当衰减器的衰减度大于 50 dB 时,计算所得到的光信噪比的仿真值实际上就是强

度调制-直接检测(IM-DD)的非相干光检测系统的光信噪比值。可以看出,采用相干检测系统可以使得光信噪比迅速增加。

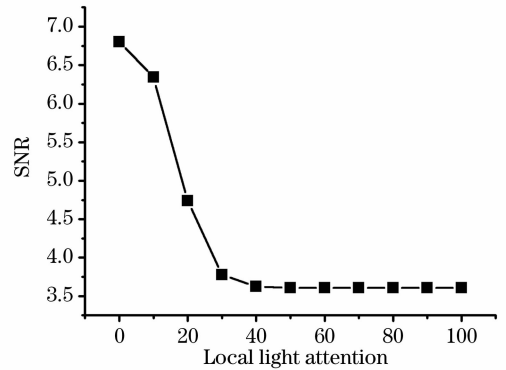


图 5 本振光强度对相干检测的影响

Fig. 5 Influence of the local light intensity on SNR

5 结 论

系统利用声光技术完成了相干光信号检测,通过声光偏转技术扩大了信号频率的检测范围,与光纤信号传输结合,根据波分复用和数字滤波原理,能有效实现多个同时到达的载波的频率测量,由于声光偏转器的晶体长度为 8 mm,声渡越时间达 2 μs,完全能满足信号测频精度的要求。从灵敏度考虑,计算机仿真和实验说明,在强度调制的极限灵敏度条件下,增加参考光支路,使之大于信号光功率 20 dB 左右,灵敏度明显提高,信噪比明显改善。而保证灵敏度提高和信噪比改善的前提是激光光源必须为单频单纵模,谱线宽度必须小于 0.05 pm,且输出光功率稳定。

采用声光效应的布拉格衍射可以对频率信号进行测量,具有简单、灵敏度高、频带宽等特点,可以实时准确测量多个 RF 信号的频率,适合于测量射频脉冲信号的载频、脉宽、占空周期、到达时间及到达角参数,具有实际的应用价值。

参 考 文 献

- Xu Haiquan, Jiang Yue. A Radar warning system based on acousto-optic deflection effect [J]. *Electronics Optics & Control*, 2006, **13**(6):75~77
徐海全,蒋跃. 利用声光偏转效应的雷达告警实验分析[J]. *光电与控制*, 2006, **13**(6):75~77
- Jiang Yue. Acousto-optic spectrum analyzer based on Bragg diffraction [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2006, **28**(3):269~271
蒋跃. 基于 Bragg 衍射的声光频谱分析仪[J]. *压电与声光*, 2006, **28**(3):269~271
- Li Ming, Li Guancheng. Experimental investigation of acoustooptic effect [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, **26**

- (6):23~27
- 李明,李冠成. 声光效应实验研究[J]. 应用光学, 2005, **26**(6):23~27
- 4 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
- 付琼,金韬,周诠. 基于声光偏转效应的光束偏转控制理论研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(6):1083~1087
- 5 Vladimir A. Kalinin. Spectral Measurement of Optical Radiations by Acousto-optic Methods [R]. Russia: State University of Aerospace Instrumentation Russia, 2003
- 6 Nir Friedman, Ariel Kaplan, Nir Davidson. Acousto-optic scanning system with very fast nonlinear scans [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(24):1762~1764
- 7 Xu Jieping. The Principles, Design and Applications of Acousto-optic Devices [M]. Beijing: Science Press, 1982
- 徐介平. 声光器件的原理、设计和应用[M]. 北京:科学出版社, 1982