

光锁相环路中声光移频器插入损耗特性研究及优化

曲正¹, 张磊^{1*}, 佟首峰¹, 常帅¹, 刘洋¹, 董毅²

¹ 长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;

² 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240

摘要 为了将声光移频器(AOFS)应用至光锁相环路中实现锁相环路快速精密调谐, 并保证相干接收机接收信号的质量, 介绍了 AOFS 的移频原理以及在锁相环路中的动态工作模式, 对 AOFS 的插入损耗特性进行了系统的研究, 着重分析了 AOFS 驱动器功率变化以及移频过程中频率变化对插入损耗的影响。设计并搭建了基于光拍频方法的 1550 nm AOFS 插入损耗测量实验系统, 测试得出 AOFS 在各种外界调制信号影响下插入损耗的变化规律, 分析了多种影响因素共同作用下插入损耗的整体动态变化趋势并进行实验验证。根据实验分析结果对 AOFS 驱动功率进行优化, 结果表明, 将驱动器功率设置为 1 W, 相比于 25 mW 驱动功率, AOFS 插入损耗值在移频范围内整体下降 15 dB, 最大相对插入损耗值下降 1 dB。

关键词 光通信; 声光移频器; 插入损耗; 声光偏转; 布拉格衍射

中图分类号 TN929.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.100609

Insertion Loss Characteristics of Acousto-Optic Frequency Shifter in Optical Phase-Locked Loop and Its Optimization

Qu Zheng¹, Zhang Lei¹, Tong Shoufeng¹, Chang Shuai¹, Liu Yang¹, Dong Yi²

¹ National Defense Key Discipline Laboratory on Space-Ground Laser Communication, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract In order to apply the acousto-optic frequency shifter (AOFS) to the optical phase-locked loop for the fast and accurate tuning and to ensure the quality of the signal received by coherent receiver, we introduce the frequency shift principle and the dynamic operation mode of the AOFS in the phase-locked loop, study the insertion loss characteristics of the AOFS systematically, and analyze the effects of power variation of driver and frequency variation in frequency shift process on insertion loss. We design and build a test system for the insertion loss measurement of 1550 nm AOFS based on the beat frequency method. The test results show the variation in the insertion loss under the influence of various modulation signals, and the global dynamic variation trend of insertion loss under multiple influencing factors is also analyzed and verified experimentally. The driving power is optimized according to the experimental results of the AOFS. The optimization results show that the AOFS insertion loss declines by 15 dB in the range of frequency shift when the driving power increases from 25 mW to 1 W, and the maximum relative insertion loss declines by 1 dB.

Key words optical communications; acousto-optic frequency shifter; insertion loss; acousto-optic deflection; Bragg diffraction

OCIS codes 060.4510; 230.1040; 060.4256

收稿日期: 2017-04-26; **收到修改稿日期:** 2017-05-26

基金项目: 国家自然科学基金(91438204)

作者简介: 曲正(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事空间光通信方面的研究。E-mail: qizhi1994@126.com

导师简介: 佟首峰(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事空间遥感与激光通信等方面的研究。

E-mail: tsf1998@sina.com

* 通信联系人。E-mail: zhanglei004171@163.com

1 引言

激光通信是一种利用激光传输信息的通信方式。其中,空间激光通信系统按接收端探测方式的不同可分为两种:基于直接探测的空间激光通信系统以及基于相干探测的空间激光通信系统^[1]。零差锁相接收系统作为相干探测激光通信系统的一种,通过锁相环路对信号光进行相位捕获和跟踪,再利用本振光与信号光进行相干解调,可以最大程度地降低相位噪声并提高系统信噪比^[2-3]。在锁相环路中,本振激光器通常会选用调谐范围很大的可调谐窄线宽激光器,但其调谐精度和调谐速率很难达到锁相环对信号光进行相位捕获和跟踪所需的指标要求。

与电光移频器和旋转光栅等频移器件相比,声光频移器(AOFS)具有移频速率快、调谐范围大、插入损耗小等特点^[4],近年来被广泛应用于零差相干探测及微多普勒探测等光通信系统中^[5-7]。在 AOFS 的特性参数中,AOFS 的插入损耗特性直接影响探测系统的功耗要求,除此之外,在 AOFS 的工作过程中,插入损耗的动态变化直接影响本振光的输出功率抖动情况,这也说明移频器插入损耗的动态变化对相干接收系统解调信号的质量具有十分重要的影响。

本文对 AOFS 的工作机理及其在锁相环中的应用进行了阐述,分析了 AOFS 的插入损耗和影响因素并予以实验验证,提出对锁相环路精密调谐环节的插入损耗进行有效抑制的优化方案,从而提升整个零差锁相接收的解调信号质量。

2 AOFS 移频原理及其在锁相环中的应用

2.1 AOFS 移频原理

AOFS 的工作过程建立在声光相互作用的基础上。声光相互作用是指光波在声光介质传播的过程中,在超声波场内发生的衍射或散射现象^[8]。超声波与光波入射参数满足一定条件时,各级衍射光会相互干涉并相互抵消,此时光场中只存在 0 级和 1(或-1)级衍射光,这类衍射为布拉格衍射,AOFS 主要利用布拉格衍射来实现光信号的移频工作。

AOFS 的移频原理如图 1 所示。

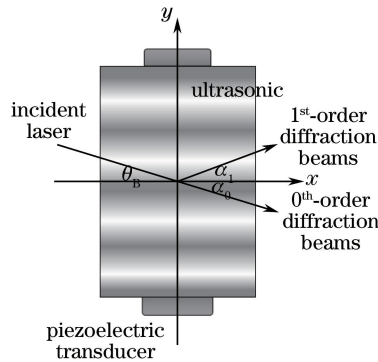


图 1 AOFS 移频示意图

Fig. 1 Schematic of frequency shift of AOFS

如图 1 所示, x 轴方向为光场方向, y 轴方向为经压电换能器转换后的超声波传播方向。在 AOFS 的工作过程中,为实现布拉格衍射,光入射角满足

$$\sin \theta_B = \frac{k_s}{2k} = \frac{\lambda}{2\lambda_s}, \quad (1)$$

式中 θ_B 为满足布拉格衍射的布拉格角, k 、 k_s 分别为光波矢量和声波矢量, λ 和 λ_s 分别为光波波长和声波波长。此时 0 级和 1 级衍射光动量匹配,同相叠加使光强增大,其他衍射级的光的非同相叠加使光强变小,故出射光主要为 0 级光和 1 级光。此时由能量守恒定律可得

$$\begin{cases} \omega_0 = \omega_1 + \omega_s, \\ \mathbf{k}_0 = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_s, \end{cases} \quad (2)$$

式中 ω_1 为出射光波频率, k_1 为出射光波波矢量。通过(1)式可以看出, 声波频率不同时, 布拉格衍射所需的布拉格角也会发生变化。布拉格角的变化量为

$$\Delta\theta_B = \frac{\lambda}{2nv_s} \Delta f_s, \quad (3)$$

式中 n 为声光介质的折射率, v_s 为超声波声速, f_s 为声波频率, Δf_s 为超声波频率变化值。由于声波频率变化时 $\Delta\theta_B$ 很小, 因此, 在一定的声波频率变化范围内仍然可以完成布拉格衍射, 故定义满足布拉格衍射的声波频率范围为布拉格带宽。由(2)式得到 AOFS 的移频过程: 在 AOFS 满足布拉格衍射的条件下, 通过调节驱动器加载到压电换能器上的射频信号频率来改变介质内的超声波频率, 使入射光完成频移过程, 进而使输出光的移频量等于超声波频率。

2.2 声光移频器在光锁相环中的动态工作模式

在零差相干探测接收系统中, 光锁相环的作用是利用电反馈技术实现本振光与信号光的相位跟踪锁定^[9]。以声光移频器为精密调谐器件的光锁相环基本结构如图 2 所示。

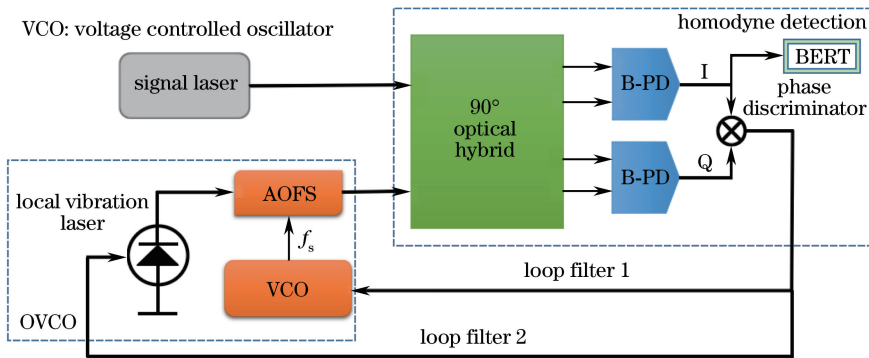


图 2 基于 AOFS 的光锁相环结构示意图

Fig. 2 Schematic of optical phase-locked loop based on AOFS

由图 2 可以看出, 光锁相环为负反馈闭环系统, 本振光激光器和 AOFS 构成光压控振荡模块 (OVCO), 90° 混频器、平衡探测器 (B-PD)、鉴相器以及误码分析仪 (BERT) 构成零差探测模块, 信号光与本振光在 90° 混频器混频后输出 I 路信号和 Q 路信号, 将 2 路信号接入鉴相器并计算相差信息和输出对应的误差反馈信号。通过环路滤波器的滤波、积分处理生成 OVCO 的控制信号, 以控制本振光的频率变化量; 再将调谐后的本振光输入混频器中, 以构成光锁相闭合回路, 最终使鉴相器输出为 0, 并在一定频率范围的锁定带内实现相位跟踪, 完成零差相干探测的锁相环节。在 OVCO 中, 可调谐本振激光器的调谐范围很宽, 但调谐精度较低、速度较慢。在光锁相环中将 AOFS 作为快速精密调谐元件, 提高了环路带宽, 对环路的相位噪声进行更高精度的抑制。如图 2 所示, 采用频率变化范围与移频器移频量匹配的压控振荡电路作为 AOFS 的驱动器, 该振荡电路的振荡频率随控制电平的变化而变化, 将其加载到 AOFS 的压电换能器中便可以输出等频率的超声波, 进而使移频器快速移频, 达到本振光在锁相环捕获带内快速锁相跟踪信号光的目的。

3 AOFS 插入损耗特性及影响因素

AOFS 移频过程中, 通常利用 AOFS 的插入损耗来评价整体移频质量。AOFS 的插入损耗包括衍射损耗、声光移频过程中造成的准直器耦合损耗和高次衍射损耗、晶体反射吸收损耗等, 实际工作中晶体反射吸收损耗很小, 故对插入损耗影响因素的分析主要从衍射损耗和声光偏转等方面考虑。

3.1 AOFS 的衍射损耗

发生布拉格衍射时, 衍射效率为

$$\eta = \frac{I_o}{I_i} = \sin^2\left(\frac{\xi}{2}\right) = \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_0} \sqrt{\frac{MLP_s}{2H}}\right), \quad (4)$$

式中 M 为只与介质本身参数有关的品质因数, $M = n^6 p^2 / (\rho v_s^3)$, H 为声光晶体长度, L 为声光晶体宽度, P_s

为换能器输出的超声功率, ξ 为声光偏转弧度参数, I_o 为声光移频器输出光功率, I_i 为声光移频器入射光功率, λ_o 为光波波长。由(4)式可以看出, 当给定介质及驱动器参数后, 移频器的衍射效率仅与超声波频率有关, 通过调整换能器的功率改变超声波功率, 就可以改变移频器的衍射效率。此时衍射造成的插入损耗 L_{id} 为

$$L_{id} = 10\lg(1 - \eta) = -10\lg\left[\sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda_o} \sqrt{\frac{MLP_s}{2H}}\right)\right] \quad (5)$$

根据实际情况对(5)式进行数值仿真, 仿真参数如下: 光波波长为 1550 nm, 光速为 3×10^8 m/s, 换能器长度和宽度分别为 2 cm 和 0.5 cm; 声光介质为二氧化碲(TeO_2), 查表可得, 介质折射率为 2.386, 弹光系数为 0.24, 介质密度为 6950 kg/m³, 超声波在该介质中的声速为 3632 m/s, 计算得到声光介质的品质因数 $M = 3.192 \times 10^{14}$ s³/kg。超声波功率范围取 0 ~ 8 W 时, AOFS 插入损耗与超声波功率的关系曲线如图 3 所示。

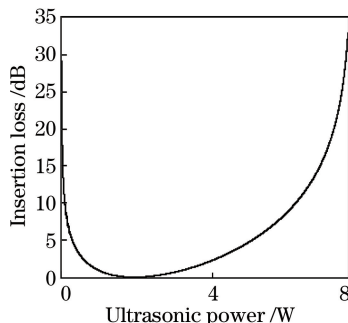


图 3 超声波功率为 0~8 W 时 AOFS 插入损耗变化的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of AOFS insertion loss in the ultrasonic power range from 0 W to 8 W

由图 3 可以看出, 移频器的插入损耗与超声波功率之间的关系为非线性调制曲线形式, 且由(5)式可知, 该非线性曲线呈周期性变化, 当功率在适当范围内变化时, 移频器的插入损耗随着功率的增大而逐渐减小, 直至达到插入损耗的最小值, 此时 0 级衍射光的光强为 0。在实际应用中, 如果移频器的驱动功率可以调节, 通常将其设定在一个从 0 W 开始的有效变化范围内, 这样既可保证功率随插入损耗呈单调性变化, 也可保证声光介质不会因声波功率过大而被损坏。

3.2 声光移频过程中的损耗

在 AOFS 移频过程中, 分析准直器耦合损耗需要从声光偏转的角度进行建模分析。发生布拉格衍射时, 0 级与 1 级衍射光动量匹配, 此时在各向同性介质中动量关系如图 4 所示。

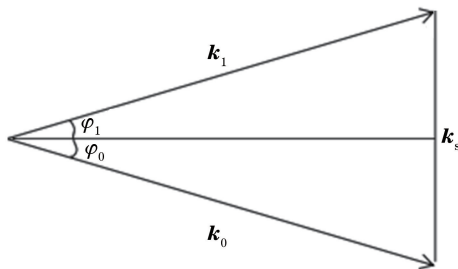


图 4 布拉格衍射光动量关系示意图

Fig. 4 Schematic of Bragg diffraction beam momentum relation

如图 4 所示, 由 1 级衍射光、0 级衍射光以及声波的波矢量共同构成一个等腰三角形, 图中 φ_1 和 φ_0 分别为 1 级衍射光和 0 级衍射光在介质中的偏转角度, 可以看出此时两者偏转角度相等, 又因为 0 级衍射光偏转角度恒等于入射光的入射角(此处入射角指在介质中折射后与光轴的夹角), 故发生布拉格衍射时

$$\varphi_0 = \varphi_1 = \theta_B, \quad (6)$$

1 级衍射光相对于入射光的偏转角 ϕ 等于 1 级衍射光与 0 级衍射光之间的夹角, 即

$$\phi = \varphi_0 + \varphi_1 = 2\theta_B = \frac{\lambda}{\lambda_s} = \frac{\lambda_0}{nv_s} f_s. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,衍射光的偏转角度与声波频率呈线性关系。AOFS工作时,在布拉格带宽范围内改变超声波的频率,衍射光光束的偏转角度也会随之改变,偏转角变化量即声光扫描角为

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{v_s} \Delta f_s. \quad (8)$$

AOFS 移频的过程也是 1 级布拉格衍射光线性偏转的过程,AOFS 移频过程如图 5 所示。

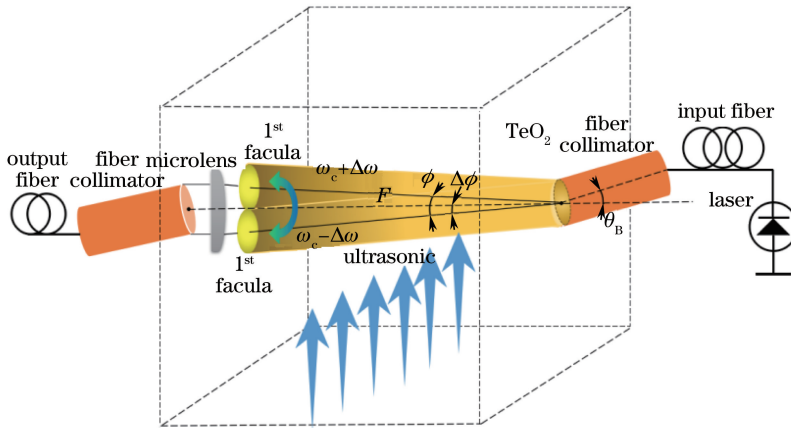


图 5 AOFS 移频过程示意图

Fig. 5 Schematic of frequency shift process of AOFS

如图 5 所示,光纤激光器输出光束在移频器内部进入准直器,输出平行光角度为折射前的布拉格角,在移频器的输出端通过微型棱镜将偏转的光斑会聚为平行光,此时光束正常折射,被输出端准直器接收。可以看出,移频过程中,准直器耦合效率主要由准直器接收面与出射光斑的重叠面积决定,移频器从移频量下边频 $\omega_c - \Delta\omega$ 移至上边频 $\omega_c + \Delta\omega$ (ω_c 为声光移频器中心频率, $\Delta\omega$ 为声光移频量,正负号代表移频方向),对应的光束偏转使得准直器接收面重叠面积与整个光斑面积的比值发生从小到大再变小的非线性变化,对于单模光纤移频器,在超声波声场功率稳定的情况下,输出的 1 级衍射光能量分布可近似为高斯分布。除此之外,在声光偏转过程中,(3)式中提到的布拉格带宽问题同样是影响插入损耗变化的重要因素,结合(3)式和(8)式可知,移频过程中布拉格角的变化范围是声光偏转扫描角的 1/2,虽然在一定移频范围即布拉格带宽内可以发生布拉格衍射,但是仍有一部分光能会由于动量的微量失配而转移到高阶衍射级上。由此可知,在移频过程中光能会在中心频率两侧呈现非线性递减的变化曲线,这种光能的衰减会作用到移频范围内各个频率微分点上,与准直器与光斑耦合情况共同组成随着移频量增加从大变小再变大的非线性插入损耗变化曲线。具体变化曲线由后续实验测量结果给出。

4 AOFS 插入损耗影响因素实验

4.1 光拍频频差测量方法

根据第 3 节中对移频器插入损耗影响因素的分析,搭建不同条件下的插入损耗测试实验系统。由于移频器的移频范围很小,移频器作用在激光上产生的频率变化很难直接在光谱上探测到,为了提升测试系统的频率分辨能力,采用光拍频的方法对 MHz 量级的频率变化进行探测。

光拍频是指两束频差较小、偏振方向与传播方向相同的光合束后光束光强随时间呈周期性变化的现象^[10]。两束光合束后探测器得到的中频分量频率等于拍频的两束光的频差 $\omega_2 - \omega_1$,为了测量移频器的微小频移量,可以将一束光进行分束,其中一束接入移频器进行移频,移频后的光与本振光发生拍频后测量移频器的移频量。

4.2 AOFS 插入损耗测试实验系统

结合 AOFS 各类插入损耗的测试标准和光拍频频差测量方法,搭建如图 6 所示的 AOFS 插入损耗测量系统。

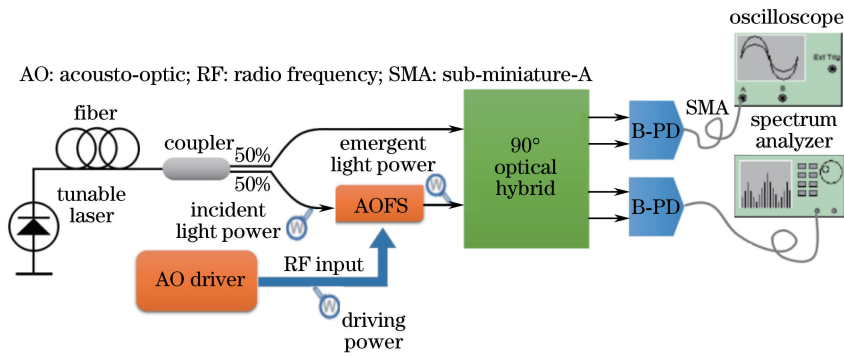


图 6 插入损耗测试系统结构示意图

Fig. 6 Schematic of insertion loss test system

实验所用的激光器为 1550 nm 可调谐光纤激光器 (NKT 公司, 德国), 输出光功率为 10 dBm~100 dBm, 输出激光线宽为 100 Hz。输出激光经光纤耦合器分为两束等光功率的激光, 其中一束不经任何处理, 作为本振光直接接入 90°混频器的一个输入端, 另一束光接入 AOFS 对光束进行移频处理, AOFS 输出端接入 90°混频器的另一个输入端, 与本振光进行混频。实验所用 AOFS 为 1550 nm 波段 AOFS (Brimrose 公司, 美国), 中心频率为 500 MHz, 移频范围为 (500±25) MHz, 移频器频率稳定度小于 10^{-6} , 驱动器输出最大射频功率为 1 W, 最大可承受光功率为 230 mW。在移频器的输入端和输出端设置光功率测试点, 在驱动器输出端设置射频功率测试点。实验中合束器件的混频器为 90°混频器 (Kyria 公司, 法国), 混频器本身具有保偏功能, 4 路输出分别是两路 I 路差分混频信号和两路 Q 路差分混频信号, 由于 I 路和 Q 路对混频光束频差分析没有差别, 因而将 I 路和 Q 路同时接入两个高速 B-PD 中, 将两探测器探测信号分别输入示波器和频谱仪中进行波形和频谱显示。

4.3 AOFS 驱动功率对插入损耗的影响

利用上述实验系统完成移频量固定、射频功率不同时 AOFS 插入损耗的测量实验。默认将 AOFS 的移频量固定在中心频率处, 即 500 MHz 处, 调整驱动器的功放电路, 在 20~1000 mW 之间记录多个不同驱动功率输出值 (25, 100, 220, 500, 750, 1000 mW), 在每个驱动功率输出条件下, 分别测量 AOFS 输出端和输入端的光功率, 其差值即为当前驱动功率下 (在移频器内体现为转换后的超声波功率) 移频器的插入损耗值。对这些测量值进行数据拟合, 得出图 7 所示关系曲线。

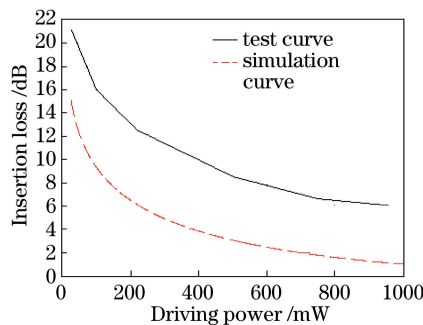


图 7 插入损耗与驱动功率之间的关系

Fig. 7 Relationship between insertion loss and driving power

由图 7 可以看出, 该变化曲线与第 3.1 节中的理论分析在一定范围内的变化趋势基本相同, 即 AOFS 的插入损耗值随驱动功率的增大而减小, 从 25 mW 驱动功率下的 21.1 dB 非线性递减至 1 W 驱动功率下的 5.9 dB。与仿真曲线相比, 实验结果仅在各功率点对应的插入损耗数值上存在约为 5 dB~6 dB 的差值。产生差值的原因包括移频器输入输出处准直器的插入损耗、光纤连接处产生的损耗以及晶体反射吸收损耗等。实验结果表明, 移频器移频量固定时, 在有效范围内增大驱动器的输出功率对移频器的插入损耗有较明显的抑制作用。

4.4 AOFS 移频量对插入损耗的影响

同样利用第 4.2 节所述实验系统得到驱动功率为定值时 AOFS 插入损耗在不同频移下的变化曲线。将驱动功率设定为 1 W, 从 AOFS 某一端边频极限开始向另一端调频, 并取等间距的频率点进行数据采样分析。调整声光驱动器压控电平, 将移频器从下边频极限移至上边频极限, 通过上述光拍频的方法在示波器中观察移频过程中频率的时域变化情况, 并通过频谱仪记录高精度的移频变化。以移频量为 500 MHz 时的拍频情况为例, 经两束光拍频后示波器和频谱仪的响应如图 8 所示。

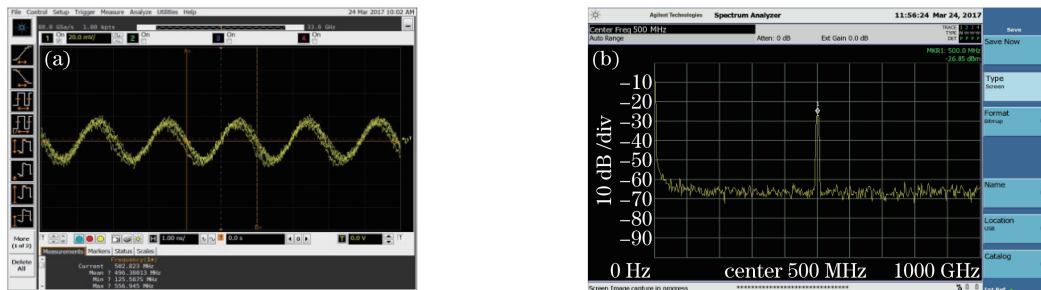


图 8 (a) 500 MHz 移频时拍频时域变化曲线; (b) 500 MHz 移频时拍频频谱

Fig. 8 (a) Beat frequency time domain curve at 500 MHz frequency shift; (b) beat frequency spectrum at 500 MHz frequency shift

由图 8 可见移频过程中 AOFS 高阶衍射所产生的噪声对频谱仪测试精度的影响。以 2 MHz 为叠加采样间隔, 在每个频率节点处分别测量移频后的衍射光功率, 记录后进行下一次采样, 直至达到 AOFS 的上边频极限。最后测量 AOFS 输入端的光功率, 计算所有频率扫描点处的输出端光功率与输入端光功率的差值, 即为所有扫描点的插入损耗值, 对其进行数据拟合, 得到图 9 所示关系曲线。

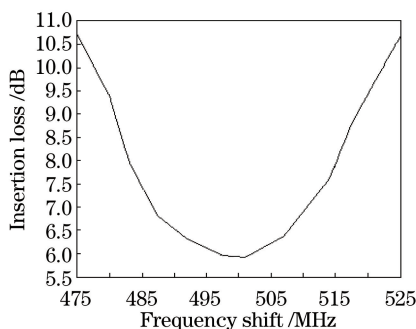


图 9 插入损耗与移频器移频量之间的关系

Fig. 9 Relationship between insertion loss and frequency shift of frequency shifter

由图 9 可以看出, 实验结果基本遵循第 3.2 节中所分析的插入损耗变化规律, 在 1 W 的驱动功率下, 移频器插入损耗的实际测量值在中心频率 500 MHz 处最小, 为 5.92 dB, 而在中心频率两侧逐渐递减, 直至 475 MHz 处的 10.7 dB 和 525 MHz 处的 10.9 dB。

4.5 AOFS 最大相对插入损耗及影响因素

在光锁相环路的实际应用中, 需要对移频器移频范围内的插入损耗变化进行全面分析。在多种影响因素的共同作用下, 提出最大相对插入损耗的概念, 即在 AOFS 处于某一特定超声波功率时, 额定移频范围内动态插入损耗的峰峰值 $L_{\max} - L_{\min}$ 。综合分析影响插入损耗的多方面因素: 一方面, 从移频器移频结构示意图可知, 在超声波功率固定时, 通过适当增加出射光束处微型棱镜与准直器的横截面积, 可以在很大程度上减小移频器移频过程中产生的最大相对插入损耗; 另一方面, 声光衍射光斑的光场分布近似于高斯分布, 驱动功率变化导致的衍射效率变化会直接影响 1 级衍射光斑的光场分布, 这种光场变化与光斑偏转导致的准直器耦合损耗相互关联, 与移频器中高次衍射造成的损耗互不相关, 从而使部分相对插入损耗值随着超声波功率的改变发生相应的线性相关变化。经过分析可得, 移频器结构固定时最大相对插入损耗为

$$L_{\max} - L_{\min} = L_B + (1 - \eta)\rho_c L_c + (1 - \rho_c)L_c, \quad (9)$$

式中 L_B 为布拉格带宽内产生的损耗峰峰值, L_c 为移频范围内准直器耦合损耗峰峰值, ρ_c 为衍射损耗与移频范围内准直器耦合损耗之间的相关系数。对移频器最大相对插入损耗进行数值仿真, 设定超声波功率范围为 $0 \sim 8$ W, 布拉格带宽内产生的相对损耗为 3 dB, 耦合器损耗为 3 dB, 相关系数为 $1/2$, 可以得到如图 10 所示的移频器最大相对插入损耗与超声波功率的关系曲线。

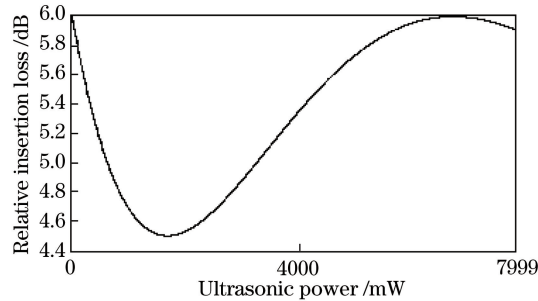


图 10 超声波功率变化范围为 $0 \sim 8$ W 时最大相对插入损耗变化的仿真曲线

Fig. 10 Simulation curve of maximum relative insertion loss in the ultrasonic power range from 0 W to 8 W

由图 10 可以看出, 最大相对插入损耗的量值呈周期性变化, 最大为 6 dB, 最小为 4.5 dB, 从而可以分析得出在保证不损坏晶体的驱动器功率调制范围内获得最大相对插入损耗的最优功率值。

利用上述实验系统对综合影响因素下的插入损耗进行测量验证, 测量曲线如图 11 所示。

从图 11 中 25, 220, 500, 1000 mW 驱动功率下 AOFS 插入损耗随移频量变化的关系曲线可以看出, 插入损耗曲线随超声波功率的增大呈整体下移趋势, 在插入损耗整体下移的基础上, 移频器最大相对插入损耗也在逐渐减小, 即对应的动态移频量与插入损耗的关系曲线逐渐平缓。测量可得最大相对插入损耗与驱动功率的关系曲线如图 12 所示。

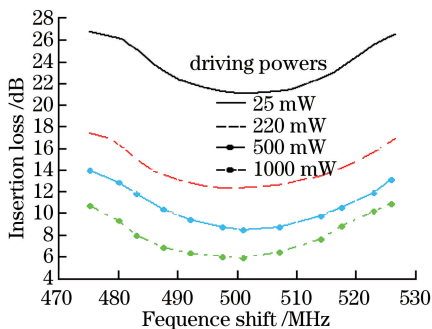


图 11 移频器插入损耗在不同驱动功率下的测试曲线

Fig. 11 Test curves of the frequency shifter insertion loss under different driving powers

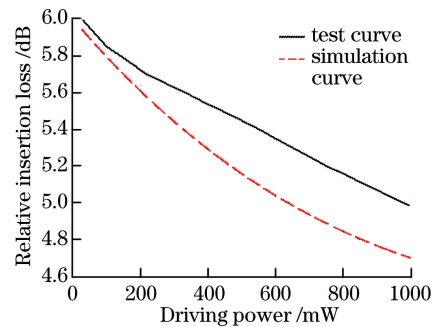


图 12 最大相对插入损耗与驱动功率之间的关系

Fig. 12 Relationship between maximum relative insertion loss and driving power

在图 12 中, 驱动功率从 25 mW 增大到 1000 mW 的过程中, 对应的移频器最大相对插入损耗从 6 dB 减小到 4.98 dB。实验测试曲线与仿真曲线之间存在差异的主要原因是仿真曲线对各方面插入损耗峰峰值以及相关因数的设置与实际移频器存在一定差异。对实验结果进行分析可知, 当控制驱动功率在有效范围 ($0 \sim 1$ W) 内达到最优值 (1 W) 时, 不但可以对移频器工作过程中整体的插入损耗产生 15 dB 左右的抑制作用, 还可对最大相对插入损耗产生 1 dB 左右的抑制作用。利用这一规律对移频器进行优化, 应用至锁相环中, 一方面降低了本振光的功耗, 另一方面在锁相环路动态跟踪信号光的过程中提升了本振输出光功率的稳定性, 抑制了解调信号幅值的时域抖动, 在一定程度上减小解调信号的误码率, 进而提高零差相干系统的探测灵敏度。

5 结 论

根据声光耦合波理论对 AOFS 的工作机理进行分析, 针对相干探测光锁相环精密调谐环节对 AOFS 各项损耗特性及其影响因素进行详细讨论, 设计了基于光拍频法的插入损耗测试实验系统, 对插入损耗进行分

情况测量,并对测量结果进行综合分析。通过实验结果分析得出如下结论及插入损耗的优化方法:AOFS 移频量固定时,驱动器驱动功率对移频器插入损耗值具有周期性影响,但当驱动功率从 0 W 开始变化时,在一定范围内,移频器的插入损耗是递减的,即在一定驱动功率范围内,可以通过提高驱动功率来抑制移频器的插入损耗;保持驱动功率不变,控制超声波频率使 AOFS 在布拉格带宽内扫频,移频器的插入损耗在中心频率处达到抑制极值,在中心频率两侧的插入损耗逐渐增大;为了掌握移频器插入损耗整体动态变化规律,提出最大相对插入损耗的概念,从声光偏转的角度来看,适当增大准直器接收截面面积可以抑制一部分由耦合损耗引起的最大相对插入损耗。在移频器结构参数固定的情况下,通过最大相对插入损耗优化实验可得,为保证声光晶体不被损坏,驱动功率范围为 0~1 W 时,驱动功率的最优值为 1 W,此时相较于 25 mW 驱动功率下的移频工作,优化后的移频器在 475~525 MHz 移频范围内插入损耗整体下移 15 dB 左右,抑制了约 1 dB 的最大相对插入损耗值。将上述优化设计应用至锁相环中,对动态本振光输出光功率进行抖动抑制,进而降低解调信号的误码率,这对零差相干探测的研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [2] Steed R J, Pozzi F, Fice M J, *et al.* Monolithically integrated heterodyne optical phase-lock loop with RF XOR phase detector[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 20018-20053.
- [3] Gregory M, Heine F, Kampfner H, *et al.* Coherent inter-satellite and satellite-ground laser links[C]. SPIE, 2011, 7923: 792303.
- [4] Gao Jing. The research of driver source and communication system of AOM[D]. Taiyuan: North University of China, 2013.
高晶. 声光调制器驱动源及其通信系统研究[D]. 太原: 中北大学, 2013.
- [5] Chang Shuai, Tong Shoufeng, Jiang Huilin, *et al.* Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206004.
常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004.
- [6] Guo Liren, Hu Yihua, Li Zheng, *et al.* Research on influence of acousto-optic frequency shifter to micro-Doppler effect detection[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0212006.
郭力仁, 胡以华, 李政, 等. 声光移频器对微多普勒效应探测的影响研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0212006.
- [7] Bai Y, Ren D M, Zhao W J, *et al.* Research on heterodyne detection of a mode-locked pulse laser based on an acousto-optic frequency shift[J]. Applied Optics, 2010, 49(20): 4018-4023.
- [8] Yu Weijuan. Experimental research on 1.55 μm all-fiber acousto-optic shifter diffraction efficiency and laser heterodyne [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
于维娟. 1.55 μm 全光纤声光移频器衍射效率及激光外差的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [9] Zhang Zhen, Sun Jianfeng, Lu Bin, *et al.* Costas optical phase lock loop system design in inter-orbit coherent laser communication[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805006.
张震, 孙建锋, 卢斌, 等. 星间相干激光通信中科斯塔斯锁相系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805006.
- [10] Wang Zhaolang. Research on laser communication system based on acoustic-optic frequency-shift technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
王兆浪. 基于声光频移技术激光通信系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.