

普通单膜光纤声光频率偏移装置的研究

向永江

(南京航空学院, 南京)

摘要: 本文介绍为实现全光纤功能型传感系统而研制的一种新颖光纤偏频装置。分析了此装置的设计理论和设计方法, 在实验基础上给出了实验研究结果, 并确定了某些重要设计参数。

Research on acoustic-optic frequency shifter using ordinary
single-mode fiber

Xiang Yongjiang

(Nanjing Aeronautical Institute)

Abstract: This paper presents a new kind of fiber frequency shifter to complete all-fiber functional sensor system. The design theory and method of the frequency shifter are demonstrated. The experimental results and some important design parameters are obtained.

一、引 言

在功能型光纤传感器中光纤本身就是敏感元件, 为构成全光纤系统创造了条件。但是在光纤传感系统中, 如果仍采用非光纤的光学元件(如波片, 布喇格声光频率偏移器等), 仍无法实现传感器系统的全光纤化。因此, 近年来研究由单模光纤构成光学元件成了国内外功能型光纤传感器研究领域中的重要课题。频率偏移装置是功能型光纤传感技术中常用的重要元件, 例如在光纤陀螺的外差系统中以及在光纤激光多普勒系统中为了实现速度方向的判别, 都需要频率偏移装置。但目前普遍采用的布喇格声光频率偏移器不是光纤元件, 无法实现全光纤系统。本文介绍基于单模光纤弯曲时的双折射效应及压电换能器声波经光纤的声光耦合效应而研制的光纤声光频率偏移装置。

二、原 理

普通单模光纤在弯曲状态下, 弯曲部分的光纤材料将由各向同性介质变为各向异性介质而具有双折射性质。如图1所示, 将普通单模光纤弯曲成具有曲率半径为 R 的弧形, 由光弹理论可知, 光纤材料沿 x' 轴及 y' 轴方向的折射率将受影响, 而沿 z' 轴方向的影响则可忽略不计。由于光纤弯曲产生的应力使光纤材料成为各向异性而引起线性双折射, 从而使在光纤中传播的线偏振光分解为两个正交的偏振模, 它们分别对应于两个互相正交的主轴, 一为快轴 x' , 对应于非寻常光; 另一为慢轴 y' , 对应于寻常光; 这两个偏振模在光纤中以不同的

速度传播,沿快轴方向的偏振模的传播速度比沿慢轴方向的传播速度略快。与未弯曲光纤材料的折射率 n 相比,折射率变化为^[1]

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= \frac{n^3}{4}(P_{11} - 2\sigma P_{12}) \left(\frac{r}{R}\right)^2 \\ \Delta n_y &= \frac{n^3}{4}(P_{12} - \sigma P_{11} - \sigma P_{11}) \left(\frac{r}{R}\right)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, r 为光纤半径, σ 为光纤材料的泊松比, P_{11} 和 P_{12} 为光弹系数,对硅材料的单模光纤可采用以下数值: $\sigma = 0.16$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $n = 1.46$ 。因此,

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= n_o - n = 0.027 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \\ \Delta n_y &= n_e - n = 0.16 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, n_e 和 n_o 分别为非寻常光和寻常光的折射率,则它们的折射率差为

$$\delta n = -\alpha \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad \alpha = 0.133 \quad (3)$$

两正交偏振模经光纤拍长 L_b 将产生 2π 的相位差,即经历拍长 L_b 的光纤长度,偏振态演变为整整一个周期。 $L_b = (\lambda/\delta n)$, λ 为光的波长。

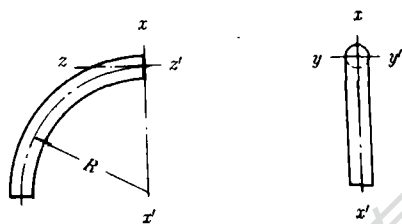


图1 弯曲光纤的示意图

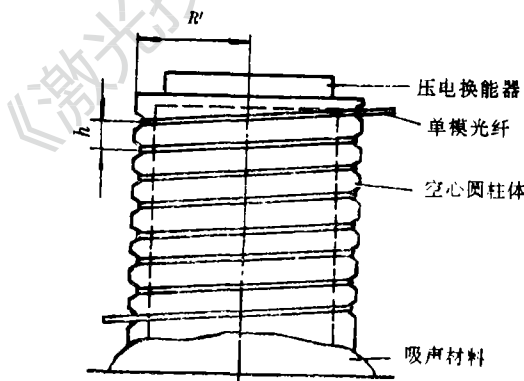


图2 单模光纤声光频率偏移器示意图

如图2所示,将单模光纤以螺旋线轨迹绕制在空心圆柱体上,则单模光纤因弯曲而产生双折射。已经证明^[2],当双折射光纤受到空间周期为光纤拍长 L_b 的周期性应力时,足以使一个偏振模的光功率相干耦合到另一个偏振模。在图2所示的装置中,周期性应力是由压电陶瓷换能器所产生的声波而形成,当该声波的空间周期与光纤拍长 L_b 匹配时,从一个偏振模耦合到另一个偏振模的光频将产生偏移,其偏移量为声波的频率,亦即压电换能器的激励电压频率。声波的空间周期与光纤拍长 L_b 匹配的条件为

$$\frac{v_s}{f_s} = L_b \sin \alpha \quad (4)$$

式中, v_s 为声波沿圆柱体壁方向的传播速度,它与圆柱体介质的材料有关, f_s 为声波频率, α 为声波波前与光纤之间的夹角。在圆柱体上光纤绕组的节距为

$$h = \tan \alpha \cdot (2\pi R') \quad (5)$$

式中, R' 为圆柱体半径。方程(3),(4)和(5)是设计圆筒形光纤声光偏频装置的基本关系式。

三、实验方案

为了验证和测试上述单模光纤声光频率偏移装置的性能, 我们采用了图3所示的激光外差干涉检测系统。

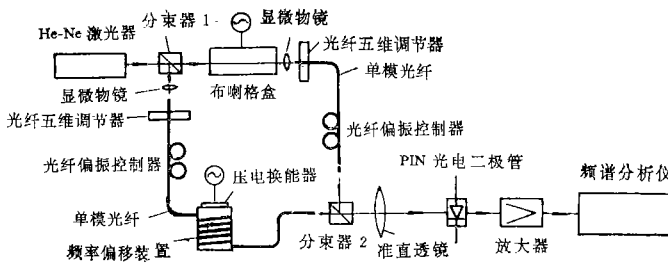


图3 测试频率偏移装置的外差干涉检测系统

外腔式氦氖气体激光器产生波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的线偏振光, 经棱镜分束器1后分成两束光, 它们分别经布喇格声光调制偏频器及被测试的光纤声光频率偏移器后到达棱镜分束器2, 构成马赫-曾特尔干涉系统。经分束器2后的两束光必须经

过仔细调整以实现外差探测的空间条件^[3], 然后经准直透镜会聚到光电探测器的光敏面, 光电探测器检测到的两束光外差信号经放大器输给频谱分析仪。

实验装置中的单模光纤偏振控制器^[4]用来调整和控制两路输出光的偏振度和偏振方向以实现最佳的相干检测。显微物镜和精密五维调节器用来实现激光束和单模光纤的耦合, 实验表明, 对波长为 $0.6328\mu\text{m}$ 的单模光纤, 放大倍率为25的显微物镜耦合率较高。

在本实验方案中, 采用了频移为40MHz的布喇格元件(Bragg Cell), 光电探测器为PIN型光电二极管, 单模光纤的芯径约为 $5\mu\text{m}$, 涂层直径为 $125\mu\text{m}$, 频谱分析仪型号为Tektronix 2710。

四、实验结果

根据(3)式~(5)式, 我们设计和试验了一系列不同频移量(f_0)的单模光纤声光频率偏移装置, 空心杯采用铝合金材料, 得到了以下三方面的实验结果。

1. 当压电晶体换能器的激励电压频率接近和等于设计的偏移频率 f_0 时, 即在(4)式所示的相位匹配条件下, 从频谱分析仪上均能得到频率等于 f_0 的单边带频率偏移(上边带或下边带), 另一边带被抑制, 所需的边带可借助于调整光纤偏振控制器的角度来实现。实验所得的结果与理论分析完全相符。图4是在压电换能器激励频率为1MHz时在频谱分析仪上拍摄

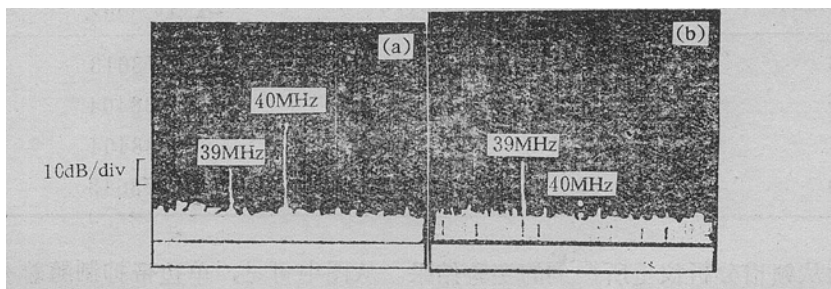


图4 频移为1MHz时频谱分析仪上显示的实验结果

(a)—上边带被抑制 (b)—上边带和载频信号同时得到抑制

到的实验结果, 实现了1MHz的单边带频率偏移, 而另一边带的抑制达20dB左右。在频谱分析仪上能观察到较强的载频信号(40MHz), 经分析这可能是由于光输入光导纤维时, 其偏振方向与光纤主轴方向对准偏差较大所致, 实验证明, 仔细地调整两个单模光纤偏振控制器, 载频信号同样能得到相当大的抑制, 如图4b所示。

2. 声波在纯铝中的传播速度为5200m/s, 在本实验中空心圆柱体的材料为铝合金, 而且做成开有螺旋槽的薄壁圆筒, 因此实际的声速可能偏离5200m/s。为了确定(4)式中的 v_a 值以实现相位匹配条件, 我们以 v_a 为变量设计和研制了不同的频率偏移装置, 设计参数见表1。

表1 取不同 v_a 值, 1MHz频率偏移装置的设计参数

v_a (m/s)	R' (mm)	$\delta n(10^{-6})$	$L_b(10^{-2}m)$	h (mm)
0.7×5200	18.6	1.502	421387	1
0.8×5200	17.2	1.756	360339	1.25
0.9×5200	16	2.029	311813	1.50
1×5200	15.4	2.190	288866	1.75

实验结果证明, 取 v_a 为5200m/s设计的光纤频率偏移器, 其频率偏移的单边带抑制效果最好(见图5)。这个结果说明, 尽管铝杯的材料不是纯铝, 而且是薄壁状, 但压电换能器产生的声波沿薄壁圆筒的传播速度仍与在纯铝中的声速基本相同, 这为设计这种类型的光纤偏频装置选取 v_a 值提供了实验依据。

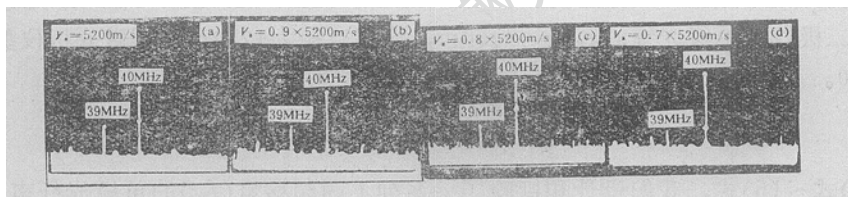


图5 v_a 值不同时, 1MHz偏频装置的实验结果

3. 在用实验确定了 v_a 为5200m/s的基础上, 分别设计和试验了频移量为0.3MHz, 0.5MHz, 0.7MHz和0.9MHz的光纤声光偏频装置, 设计参数见表2。

表2 不同频移量的频率偏移装置的设计参数

f_a (MHz)	R' (mm)	$\delta n(10^{-6})$	$L_b(10^{-2}m)$	h (mm)
0.3	15	2.313	273613	6
0.5	15.4	2.194	288404	3.5
0.7	15.4	2.194	288404	2.5
0.9	15	2.313	273613	2

图6为从频谱分析仪上所得到的实验结果。从图中可见, 单边带抑制随着频移量的变化有一最佳值。经反复试验发现, 在这种类型的装置中, 频移量为0.7MHz左右时单边带抑制效果最好, 可达30dB。从实验中还发现频移大于4MHz时, 单边带抑制效果就不很明显, 只

有10dB左右。这可能是由于在较大频移时,声波波前与光纤的夹角 α 大大减小而影响声光耦合效率的缘故。上述实验结果表明了这种光纤声光频率偏移装置在频移量较小时能产生很好的频率偏移效果,频移量大时效果不十分明显。

在具体制作光纤声光频率偏移器时,光纤与圆柱体壁接触是否良好将大大影响声光耦合效率,因此在圆柱体上绕制光纤时应设法使光纤与圆柱体壁有良好的接触,此外应保证圆柱体壁上螺旋槽深大于光纤直径,使光纤能埋置于圆柱体壁内。

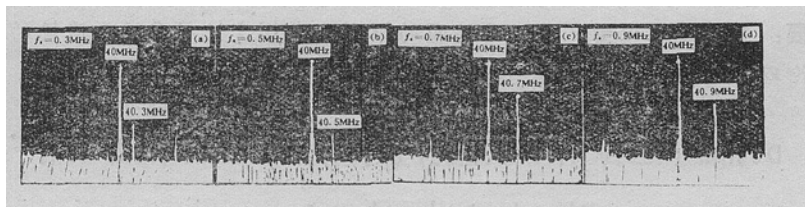


图6 频移值不同时的实验结果

五、结 论

利用普通单模光导纤维在弯曲时产生的模式双折射效应以及声光耦合效应,能成功的实现光的频率偏移,实验结果与理论分析结果完全相符。这种类型的光纤频移装置在频移量较小时性能良好,设计简单,结构紧凑,能作为全光纤系统的一个实用元件。但实验研究表明,在频移量较大时,这种光纤偏频装置的性能将下降,还有待于探索其它途径来实现大频移量的光纤偏频装置。

参 考 文 献

- [1] Ulrich R, Rashleigh S C, Eickhoff W. Opt Lett, 1980; 5(6): 273~275
- [2] Youngquist R C, Brooks J L, Shaw H J. Opt Lett, 1983; 8: 656~658
- [3] 王清正, 胡渝, 林崇杰编. 光电探测技术. 北京: 电子工业出版社, 1989: 162~165
- [4] Lefevre H C. Electron Lett, 1980; 16(20): 778~780

* * *

作者简介: 向永江, 男, 1937年11月出生。副教授, 副主任。1987年至1988年作为访问学者赴丹麦技术大学考察留学, 从事光纤传感技术的课题研究。现在从事测试计量研究工作, 侧重于激光测试及光纤传感技术的研究工作。

收稿日期: 1992年4月27日。