

文章编号 1004-924X(2014)10-2622-05

精密光纤延迟线的设计及实验验证

赵新才*, 陶世兴, 刘宁文, 温伟峰, 彭其先
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要:为了解决光纤延迟线研制中高延迟精度和低插入损耗相互矛盾的问题,提高延迟线制作的工程可行性,提出了基于光纤组合透镜准直器,角锥棱镜反射镜的光学结构和滚珠丝杠等机械结构组成的延迟线系统模型。介绍了光纤延迟线的构成和基本原理;根据项目研制的具体要求,重点设计了波长在1550 nm的关键器件——光纤准直器和角锥棱镜;然后,进行了光学辅助机械结构的设计和组装;最后,采用光纤激光器完成了光学校准和数据测试。实验结果表明:该延迟线在延迟距离为1~9.6 cm时,耦合效率均在80.6%以上,并且时延的重复性很好,精度较高,可以满足雷达、通讯、电子对抗等各种不同电子系统的需求。

关键词:光纤延迟线;角锥棱镜;延迟精度;插入损耗

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142210.2622

Design and experimental verification of precision optical fiber delay line

ZHAO Xin-cai*, TAO Shi-xing, LIU Ning-wen, WEN Wei-feng, PENG Qi-xian

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: zxceric@163.com

Abstract: To solve the contradiction between high delay accuracy and low insertion loss in the development of an optical fiber delay line and to improve the engineering feasibility of the delay line production, a delay line system model based on collimators, a cube-corner prism and a ball screw was proposed. The composition and the basic principle of the optical fiber delay line were introduced. Then, the two key components, optical fiber collimators and cube-corner prism, were designed according to the specific requirements of the project development. After that, an optical aided mechanical structure was designed and assembled. Finally, optical correction and data testing were finished by using an optical fiber laser. Experimental results indicate that the coupling efficiency of the delay line is better than 80.6% within the delay distance from 1 to 9.6 cm meanwhile maintaining higher time delay repeatability and higher accuracy, which satisfies the requirements of radar, communications, electronic warfare for electric systems.

Key words: optical fiber delay line; cube-corner prism; delay precision; insertion loss

收稿日期:2013-12-06;修订日期:2014-02-06.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项(No. 2011YQ130019);国家自然科学基金仪器专项(No. 069830);中国工程物理研究院 909 专项基金资助项目(No. 991100)

1 引言

光纤具有重量轻、体积小、抗干扰性强、损耗低与色散小等诸多优点。自光纤技术发明以来,各种光纤器件层出不穷,并在通信、雷达及电子技术等领域有着广泛的应用,因此越来越被世人关注。随着光纤通信技术的发展,高速激光器、探测器和光电开关等光电器件已成为光纤信息处理的研究热点。其中,光纤延迟线作为一种新型的信号处理器件,已从最初极其简单的一段光纤,发展到目前具有多种复杂结构的独立器件,并成为光信息处理的关键器件之一。它具备多种信号处理功能,如在光学测量与光纤传感中参与测量信号的采集与传输,在光纤通信系统中用于信号的编码与缓存,在光控相控阵天线系统中实现微波信号的精确相位分配与控制以及雷达回波信号的除噪等^[1-3]。与传统的延迟线相比,光纤延迟线具有体积小、重量轻、带宽大、损耗低、结构简单、抗干扰能力强、保密性好、易实现多位延迟等特点,并被应用于相控阵雷达技术、光分组交换技术、光学相干层析技术以及光采样技术领域^[4-11]。

在光采样中,采样精度直接决定于延迟精度,而延迟精度与光纤延迟线的研制方法相关。目前,光学延迟主要通过拉伸光纤,采用三棱镜等方法来实现。由于拉伸光纤的方法具有损耗大、不可控、不可恢复等缺点,而自由空间延迟方法需要极强的可操作性,因此一般采用三棱镜反射法实现光学延迟。但该方法对三棱镜装调精度的要求非常高,且在前后移动过程中插损较大,加之机械结构的运动精度等问题,此种方法在延迟精度和插入损耗方面一直存在较大的问题。

为了解决光纤延迟线研制中高延迟精度和低插入损耗这两个相互矛盾的问题,提高延迟线制作的工程可行性,本文提出了基于光纤组合透镜准直器,角锥棱镜反射镜的光学结构和滚珠丝杠的机械结构的延迟线系统模型,并完成了准直器、角锥棱镜以及光学辅助结构的设计及调试。

2 光纤延迟线的构成及其工作原理

本文提出的光纤延迟线由准直器、角锥棱镜、机械辅助结构以及调试用激光器光源组成。

光纤延迟线的原理非常简单^[3],光在真空中以 3×10^8 m/s 的速度传播,当光脉冲信号在光纤中以群速度 v_g 传播时,脉冲时间延迟的长度 $\Delta\tau$ 正比于光纤的长度 L ,即:

$$\Delta\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{L \cdot n_g}{c}, \quad (1)$$

式中: n_g 为光纤的群折射率, c 为光在真空中的传播速度。因此,通过改变光纤的长度能够实现不同的延迟。当 $n_g = 1.5$ 时,光纤的延迟时间大约是 4.89 ns/km,所能获得的最大延迟时间范围基本取决于光纤对信号的衰减,对于普通的通信光纤,延迟时间可达 200~300 μ s。

3 关键器件设计

3.1 准直器设计

如图 1 所示,准直器包括单模光纤、自聚焦透镜、球透镜等,其中自聚焦透镜和球透镜均为光纤微透镜,体积小。本文针对 1 550 nm 波长进行测试(可根据需求自由选择波长)。其工作方式:光波在单模光纤中传输,经过自聚焦透镜后,束腰半径明显减小,但光束的发散角在原有基础上有了一定的增加,所以在自聚焦透镜之后加入球透镜,其作用是减小输入光束的发散角。通过上述自聚焦透镜与球透镜的组合,改变入射光束的束腰半径和发散角,使光束尽量平行出射,自聚焦透镜和球透镜均固定在不锈钢管中,并与单模光纤连接。

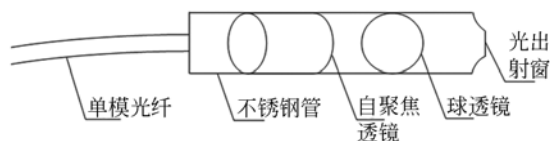


图 1 准直器结构图

Fig. 1 Framework of collimator

准直器的设计指标为:发射光斑直径 4.2 mm,准直器插入损耗小于 0.2 dB,出射光发散角小于 0.0166° ,在 0~1 m 光纤准直器的耦合损耗低于 0.8 dB。

3.2 角锥棱镜设计

角锥棱镜是光纤延迟线中的关键器件。作为反射元件,角锥棱镜的弦面镀有增透膜,锥面镀有高反膜,并且锥面是两两垂直的,其优点在于:不

管入射光束以何种角度入射,反射光都和入射光平行,并且和入射光束相对于角锥棱镜中心对称。由此保证了入射光和出射光的绝对平行。

图 2 是光学反射原理示意图,入射光经过角锥棱镜的弦面以 45° 入射角照射在其锥面上,因为锥面镀有高反膜,因此可将锥面当成一块镜子,这样光在角锥棱镜内经过两次反射,然后与入射光平行从弦面出射。本文中,角锥棱镜的弦面镀 $1\ 550\ \text{nm}$ 增透膜,3 个锥面镀 $1\ 550\ \text{nm}$ 增反膜,反射率达到 95% 以上。通过光学胶将角锥棱镜直接固定于透镜架中。

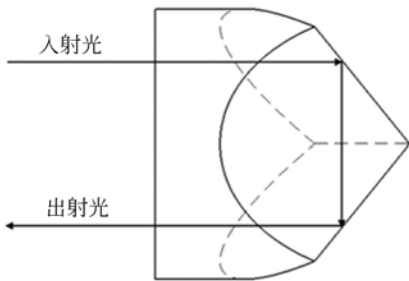


图 2 光学反射原理图

Fig. 2 Principle diagram of optical reflection

3.3 机械辅助结构设计

光纤延迟线的运动机构采用滚珠丝杠结构。如图 3 所示,滚珠丝杠移动结构包括:调节旋钮、联轴器、滚珠丝杠、丝杆螺母 I、丝杆螺母 II、运动圈、连接块、透镜架和角锥棱镜等。此部分工作时,调节旋钮通过联轴器和滚珠丝杠联接,丝杆螺母 II 固定在运动圈上,运动圈和透镜架通过连接块联接(简称为延迟组合体),角锥棱镜固定在透镜架里面。扭动调节旋钮,滚珠丝杠即可带动延迟组合体来回移动,实现位移的改变,丝杆螺母 I 将滚珠丝杠的旋转运动转化为直线运动。通过转动调节旋钮进行延时调节,调谐速度取决于转动的快慢,滚珠丝杠每旋进一圈的步距为 $50\ \mu\text{m}$,其圆周等分为 100 个分格,则每个分格的延迟步距为 $0.5\ \mu\text{m}$ 。

图 4 是光纤延迟线的总体结构图,该部分由滚珠丝杠移动组件、单模光纤带、准直器、壳体和前后面板组成。光波通过一路单模光纤准直出射,打在角锥棱镜上,然后经两次反射平行于入射光返回,并进入另一路单模光纤输出,扭动调节旋

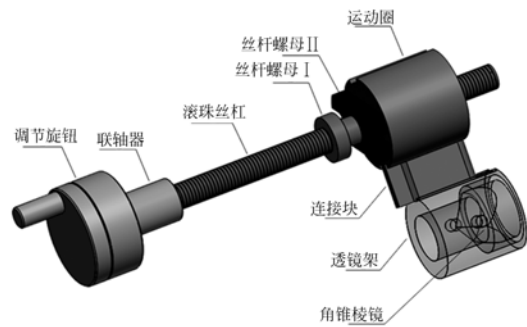


图 3 滚珠丝杠移动结构图

Fig. 3 Framework of ball-screw

钮即可调节光在自由空间中的传播距离实现延时,从而达到光学精密延迟的目的。

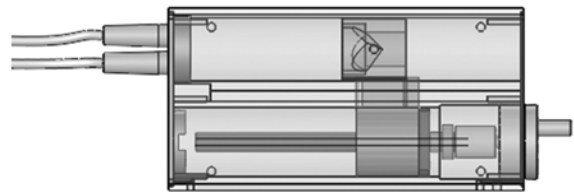


图 4 光纤延迟线总体结构图

Fig. 4 Overall structure of optical fiber delay line

另外,透镜架柱面部分有两个对称的小孔,孔中放置一个弹簧,弹簧上面放置一个钢珠,壳体与滚珠丝杠部分的移动结构通过两个钢珠连接在一起。该结构的优势在于通过选择紧密螺纹丝杠可以精密微调延迟距离,且加入钢珠结构可以实现平稳延迟调节,避免了由滚珠丝杠的机械抖动产生的不稳定性对延迟线的影响。

4 测量实验与结果

4.1 实验调试

实验调试的重点是光学校准,确保入射光和出射光平行,光从自由空间进入准直器的耦合效率极高。校准过程中接通光源,首先采用光功率计多次测量入射光的能量,确保激光器出射光能量稳定,其次在调试过程中采用光功率计实时监控从延迟线输出的光能量。如图 5 所示,光学校准步骤如下:

(1)将用于反射的角锥棱镜通过光学胶固定在透镜架中;

(2)光纤准直器加长设计,长度为 4 cm,平分为 AB,BC 段,用于入射光的光纤准直器位置固定不动,其尾纤连接激光器光源;使用夹具将用于收集光的光纤准直器固定于六维调节架上(夹于 AB 段),其尾纤连接光功率计,调节六维调节架,同时监控光功率计读数。当其读数为输出光功率 90% 以上时,仔细微调直到光功率读数最大。

(3)采用光学胶固定准直器 BC 段,直到光学胶完全凝固。取下六维调节架,从而避免光学胶凝固过程中由应力引起的准直器位置的变化。

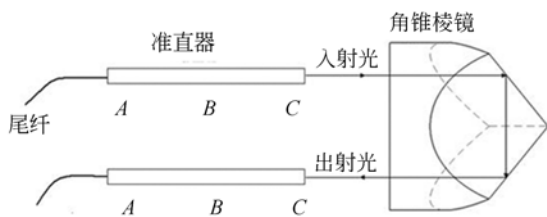


图 5 光学校准示意图

Fig. 5 Schematic of optical calibration

4.2 实验结果

光纤延迟线调试完毕后,对它进行测试。实验前测得入射光功率为 147.3 μW,此时测量不同延迟长度下的出射光能量,取其平均值,并计算光耦合效率,结果如表 1 所示。

表 1 实验数据

Tab. 1 Results of experiment

延迟长度/cm	出射光能量/μW				方差	光耦合效率/%
	第一次	第二次	第三次	平均值		
1	118.7	118.9	118.9	118.7	0.027	80.7
2	120.1	119.8	120.4	120.1	0.060	81.5
3	121.2	121.3	121.0	121.2	0.017	82.2
4	121.7	121.7	121.9	121.8	0.010	82.7
5	122.7	122.5	122.6	122.6	0.007	83.2
6	123.1	123.3	123.0	123.1	0.017	83.6
7	126.5	126.4	126.7	126.5	0.017	85.9
8	129.2	129.1	129.0	129.1	0.007	87.6
9	130.8	130.9	131.0	130.9	0.007	88.9
9.6	130.9	131.2	131.2	131.1	0.020	89.0

以延迟距离为横轴,耦合效率为纵轴绘制成折线图,如图 6 所示。实验选择 10 种不同的延迟长度,每种长度重复测量 3 次。由表 1 可知,对于

相同的延迟长度,测量得到的出射光能量的方差均小于 0.1,表明设计的延迟线重复性非常好,并且在 1~9.6 cm 的延迟距离内,耦合效率均在 80.6% 以上,甚至可达 89%,远高于在相同的实验条件下测量得到的国内同类产品的耦合效率(72.4%)。由图 6 可知,延迟距离越长,耦合效率越高,这说明从准直器输出的光束不是严格的平行光,而是有一定的发散角,因此在有效焦距范围内,用于接收光束的准直器端面越接近焦点,其耦合效率越高,并在焦点处达到最高值。最后,采用频域干涉法测量得到系统的延迟精度为 10 μm,延迟时间为 16 fs,说明系统的延迟精度很高。

本文设计的光纤延迟线的参数如下:输入光波长为 1 550 nm(可以根据需求改动,只需改动准直器光出射窗和角锥棱镜的镀膜波长,并不影响其余参数),延迟时间为 5~480 ps。

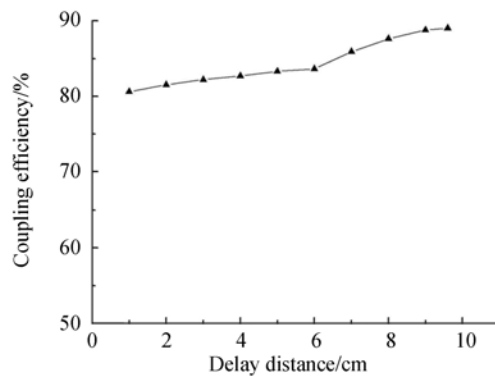


图 6 耦合效率曲线

Fig. 6 Curve of coupling efficiency

5 结 论

本文基于角锥棱镜的精密光纤延迟技术设计了一种光纤延迟方案,对该光纤延迟的原理和结构进行了介绍以及实验测试。实验结果表明,在 1~9.6 cm 的延迟长度内,光纤延迟线的耦合效率均在 80.6% 以上,并且延时的重复性好,精度较高,技术指标远高于国内同类产品,可以满足雷达、通讯、电子对抗等电子系统的需求。随着光学和光纤通信技术的发展,光纤延迟线的应用范围将越来越大,用光纤延迟线做成的器件也会越来越多,其发展前景十分广阔。

参考文献:

- [1] ZHANG X, ZHANG C, HU S, *et al.*. A novel method for measuring optical fiber delay lines based on the optical fiber low-coherence Young's interferometer[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2011, 122(10): 928-931.
- [2] 单秋山,赵庆添,邓维波. 40 μs 宽带光纤延迟线[J]. *系统工程与电子技术*, 1993(6): 1-5.
SHAN Q SH, ZHAO Q T, DENG W B. A 40 μs wideband optical fiber delay Line [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 1993(6): 1-5. (in Chinese)
- [3] 张春熹,张晓青,胡姝玲. 光纤延迟线应用研究动态[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2234-2244.
ZHANG CH X, ZHANG X Q, HU SH L. Development of application research on fiber delay lines [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2234-2244. (in Chinese)
- [4] CHAMOLA V, DUTTA M K, CHAUBEY V K. Performance analysis of optical burst switching (OBS) network using fiber delay line; a simulation approach [C]. *Communication, Information & Computing Technology (ICCICT)*, 2012 *International Conference on. IEEE*, 2012: 1-4.
- [5] 邵永红,何永红,王淑霞,等. 群相可控光学延迟线色散特性分析[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 965-968.
SHAO Y H, HE Y H, WANG SH X, *et al.*. Analysis on dispersion characteristics of group-phase-controllable optical delay line [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 965-968. (in Chinese)
- [6] WANG X, JIANG X, PATTAVINA A. Efficient designs of optical LIFO buffer with switches and fiber delay lines[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2011, 59(12): 3430-3439.
- [7] DUTTA M K, CHAUBEY V K. Modeling and performance analysis of optical packet switching network using fiber delay lines[C]. *India Conference (INDICON)*, 2011 *Annual IEEE, IEEE*, 2011: 1-4.
- [8] REZA A G, LIM H. Performance and optical cost analysis of shared fiber delay line based two-stage optical packet switch[C]. *Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2011 *International Conference on. IEEE*, 2011: 682-687.
- [9] 曾楠,何永红,马辉. 用于玉石结构分析的光学相干层析技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1335-1341.
ZENG N, HE Y H, MA H. Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1335-1341. (in Chinese)
- [10] 何卫红,何永红,李鹏,等. 眼底 OCT 成像系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(3): 438-443.
HE W H, HE Y H, LI P, *et al.*. Development of imaging system for optical coherence tomography in ophthalmology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3): 438-443. (in Chinese)
- [11] 吴彭生,谷一英,程旭升,等. 用于 X 波段相控阵天线的高速可调光纤延迟线[J]. *光通信技术*, 2013, 37(4): 5-7.
WU P SH, GU Y Y, CHENG X SH, *et al.*. High-speed tunable optic true-time delay line for X-band antenna [J]. *Optical Communication Technology*, 2013, 37(4): 5-7. (in Chinese)

作者简介:



赵新才(1985—),男,甘肃张掖人,博士研究生,助理研究员,2011年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事瞬态光学测试方面的研究。E-mail: zxceric@163.com