光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.006

宽温宽带高精度可调光纤延时线的设计与研究

梁 旭*，瞿鹏飞，张 羽，庾财斌，徐 静，张日亮，于 优

（重庆光电技术研究所，重庆 400060）

摘 要： 针对宽温宽带大动态高精度光延时调控的需求，结合数控级联和空间光连续可调延时技术，设计了一种大动态高精度延时稳定可调的 9 bit 光纤延时线，并采用磁光开关和稳相光纤搭建了工程样机。试验结果表明，样机在 60 ℃宽温范围内实现了工作频率 1～18 GHz，以 5 ns 为步进，延时范围达 2 555 ns，延时精度优于±5.8 ps 的任意可调；同时，针对某一延时点实现了动态范围为 600 ps、精度优于 1 ps 的延时连续可调。

关键词： 光纤延时线；稳相光纤；宽温度范围；高精度；精度可调

中图分类号： TN253 **文章编号：** 1001－5868(2021)03－0332－04

Design and Research of High-precision Tunable Wideband Optical Fiber Delay Line over Wide Temperature Range

LIANG Xu, QU Pengfei, ZHANG Yu, YU Caibin, XU Jing, ZHANG Riliang, YU You

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: In order to meet the needs of wideband fiber-optic time delay line with high-precision and large dynamic range, a time-stabilized 9 bit wideband fiber-optic delay line is designed and demonstrated with magnetic optical switches and phase stable fiber. The experimental results show that, the sample can realize a transmission frequency of 1～18 GHz in a wide temperature range of 60 ℃, the delay range is 0～2 555 ns with a delay step of 5 ns, and the delay precision is less than ±5.8 ps. Meanwhile, for a certain delay point, the dynamic range is 600 ps and the precision is less than 1 ps.

Key words: optical fiber delay line; phase stable fiber; wide-temperature range; high-precision; adjustable precision

0 引言

光纤延时线因具有工作频带宽、延时范围大、传输损耗低、抗电磁干扰能力强等独特优势，被广泛应用于雷达、测控、通信等领域[1-3]，用以实现宽带射频信号的预定延时、目标距离模拟、相位稳定以及光控波束形成等。

在微波光传输链路的实际应用中，由于光纤介质的传输延时特性受温度影响很大，当温度发生变化时，将引起光纤的折射率、长度产生变化，进而导致光纤延时线中信号的时延漂移，严重影响整个系统性能[4-6]。在测控领域中，由于传输宽带射频信号的发射机到天线端距离拉远，需要延时稳定才能实现相参测量；通信系统中的时钟同步必须保证其延时稳定；现代空间技术中，为保证拍频信号的稳定，本振信号的长距离馈送必须保证延时稳定；在雷达校标中，为了实现高精度目标模拟、标较、测试，不仅需要对延时量进行大范围的高精度调控，而且需要进行小范围的连续精密可调。因此，在光纤延时线的设计中，不仅需要实现信号的高精度延时传输，还需要解决宽温环境下延时的稳定问题。

基于上述领域的需求，本文设计了一种宽温大动态高精度可调光纤延时线，可在 60 ℃温度范围内针对不同延时状态，实现延时精度优于±5.8 ps 的

收稿日期：2021－03－12.

* 通信作者：梁 旭

任意调控。同时针对某一延时点可实现动态范围为 600 ps、精度优于 1 ps 的延时连续可调。

1　环境温度对光纤延时线的扰动机理

对于光纤延时线，其延时量主要由光纤折射率和传输的光纤长度决定。其中光纤折射率与入射光的波长、光纤所用材料以及外界环境温度等因素有关[7]。而入射光波长和光纤材料在选定所用激光器和光纤时即可确定，但环境温度却是随机变化的，将严重影响光纤的折射率。此外，光纤长度也会随着环境温度的变化因热胀冷缩而变化。

加载在光载波上的射频信号在光纤中传输的延时量可以表示为

$$t=\frac{n(T)L(T)}{c} \tag{1}$$

其中，光纤折射率 n 和光纤传输长度 L 均是与环境温度 T 相关的函数，c 为真空中的光速。从而，环境温度对光纤延时线延时量的影响可以通过对温度进行微分得出：

$$\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}T}=\frac{L}{c}\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}+\frac{n}{c}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}=\frac{L}{c}\left(\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}+\frac{n}{L}\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T}\right)=\frac{L}{c}(\alpha+n\beta)=LK_{\mathrm{f}} \tag{2}$$

其中，$\alpha=\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}T}$ 为光纤的热光系数，$\beta=\frac{\mathrm{d}L}{L\cdot\mathrm{d}T}$ 为光纤的热膨胀系数，$K_{\mathrm{f}}=(\alpha+n\beta)/c$ 为光纤时延温度漂移常数，表示单位长度、单位温度上光的时延变化。对于光纤通信传输常用的 G.652 光纤[7]，其热光系数 α 一般为 1.1×10^{-5}/℃，热膨胀系数 β 一般为 5.5×10^{-7}/℃，可计算出其温度漂移系数 K_{f} 约为 40 ps/(km·℃)。

2　宽温高精度稳时光纤延时线工作原理及方案

2.1　高精度可调光纤延时线的设计

高精度可调光纤延时线的实现方案主要有：①采用高速光开关与延时光纤级联的模式，形成多比特精密开关延时；②借助光纤色散效应，通过改变激光器光波长实现连续高精度延时调谐；③通过光子集成技术，以芯片化高精度光纤延时为目标，实现多比特皮秒级高精度延时。

基于实际工程需要，本文采用高速磁光开关与稳相光纤级联的方式实现低损耗、高精度的多比特大范围延时可调。同时采用基于空间光连续调控原理的可调光纤延迟线实现针对某一延时点的小范围连续精密可调。将两部分基于一个串联的构架形式进行结合，即得到本文所设计延时线的整体原理框图，如图 1 所示。

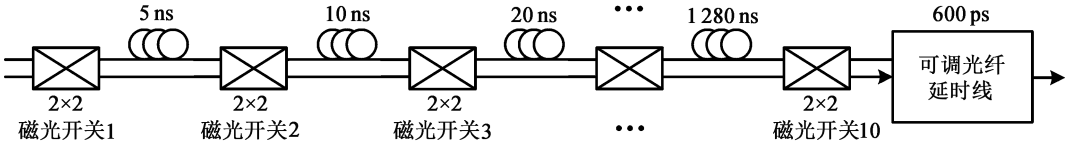


图 1　大范围可调光纤延时线原理框图

整个 9 bit 光纤延时线由 10 只 2×2 磁光开关和 9 段光纤组成，每 1 bit 的延时可由对应两个磁光开关协同进行延时与直通两种状态的切换，通过不同状态的延时组合即可实现步进为 5 ns 的任意延时调控。采用自研的高精度光纤制备平台，可以将每段光纤的延时精度控制在 1 ps 以内。同时，对于构成延时线的 9 段光纤，通过将每段延时精度设置为正负公差的形式，可以最大限度地提高整个延时线的延时精度。采用这样的方式，本文在常温下获得了整个 9 bit 光纤延时线优于 3 ps 的延时精度。

对于基于空间光连续调控原理的可调光纤延时线，其原理框图如图 2 所示。光信号经自由空间入射到反射棱镜上，经反射后输出。通过调节棱镜与光输入端的距离即可实现时延的高精度连续可调。

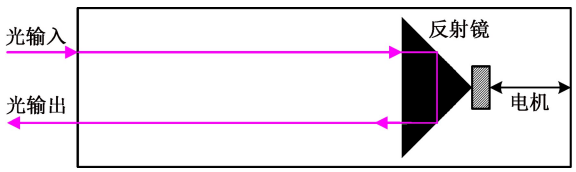


图 2　可调光纤延时线工作原理框图

在本文设计的高精度可调光纤延时线中，采用青岛浦芮斯光电技术有限公司的 RFMS10-22LC1121122 型 2×2 磁光开关搭建数控级联可调光纤延时线，采用四川梓冠光电科技有限公司的 COF-60-S9-1-FA 型可调光纤延时线实现 600 ps 的延时连续可调，同时采用微波光子领域通用的大于

18 GHz 带宽的强度调制器和光电探测器完成射频信号的电光-光电转换，实现了工作频率 1～18 GHz、以 5 ns 为步进、延时范围达 2 555 ns 的任意可调和针对某一延时点动态范围为 600 ps、精度优于 1 ps 的连续可调。

2.2 高精度宽温稳时控制的设计

对于可调光纤延时线的宽温稳时控制，采用主动闭环反馈控制技术，通过主动延时补偿实现宽温范围内光纤延时的稳定，该闭环反馈稳时控制原理框图如图 3 所示。由高精度延时测量单元准确提取光纤延时的延时量，自动控制单元得到延时测量结果，通过 PID 算法控制延时补偿单元进行及时的延时校准。

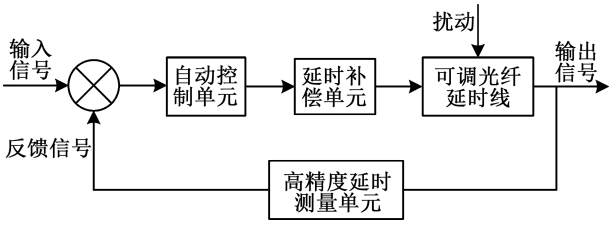


图 3 闭环反馈稳时控制原理框图

按照上述稳时自动控制模型设计的宽温宽带高精度稳时控制方案如图 4 所示。稳时原理如下：①在延时测量单元采用间接时间测量技术，在原可调光纤延时线的基础上，加入另外一路微波光链路，经历相同的光纤延时路径，在接收端采用混频与低通滤波的方式进行相位提取[8-9]，通过比较传输前后的射频信号，实现高精度、大量程的绝对延时测量。②在自动控制单元采用工业上通用成熟的 PID 控制方法，根据经鉴相器鉴相处理得到的延时测量结果，利用高速 MCU 在软件上实现 PID 算法，获取需要补偿的延时量，再通过串口控制高精度空间光连续可调延时器工作，实现系统延时误差的补偿。

由于光纤通信常用的 G.652 光纤温度漂移系数在 40 ps/(km·℃)左右，针对本文最大可调延时量 2 555 ns，60 ℃的温度变化范围，其延时误差可达 1 226.4 ps，超过了参考信号源输出的 1 GHz 本振信号的周期，无法测得真实延时的变化量。要完成对该延时误差的补偿校正，对真延时补偿单元提出了极高的要求。为应对工程化需要，减小光纤本身受温度影响引起的延时误差，采用近年发展起来的稳相光纤。本文采用了长飞光纤光缆股份有限公司的稳相光纤，并对其进行了高低温测试。测试所得稳相光纤在不同温度范围的温漂系数如表 1 所示。

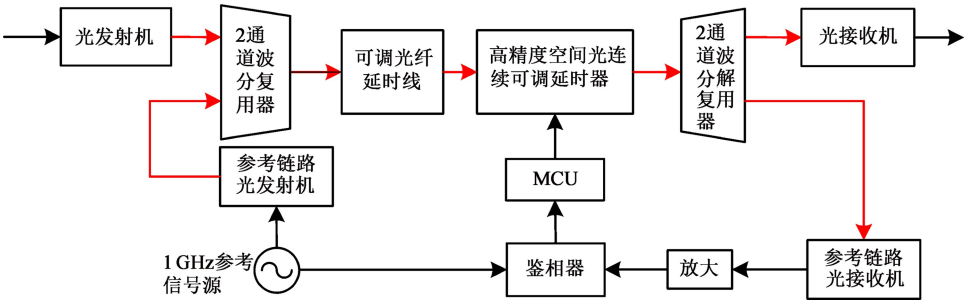


图 4 宽温宽带高精度稳时控制方案框图

表 1 稳相光纤在不同温度范围内的温漂系数

温度/℃	−50～−30	−30～−10	−10～10	10～30	30～50	50～70
温漂系数/(ps·km^{-1}·℃$^{-1}$)	3.464	4.428	5.319	7.274	11.059	11.504

从表中可以看出，稳相光纤的温度漂移系数在低温条件下较小，随着温度升高逐渐变大，在−50～70 ℃范围内的总温度漂移系数为 7.175 ps/(km·℃)，其中−10～50 ℃范围内的温度漂移系数为 7.884 ps/(km·℃)。针对本文最大可调延时量 2 555 ns，60 ℃的温度变化范围，其延时误差仅为 247.16 ps，不仅极大地减小了光纤受温度影响引起的延时误差，同时也满足了参考信号源的测试要求，为稳时控制中的延时测量单元进行精确的延时测量提供了保障。

3 宽温高精度稳时光纤延时线样机测试与结果分析

按照上述高精度稳时光纤延时线设计方案，搭建了工程样机进行测试。测试环境温度条件分别为常温(25±1) ℃和高低温(50 和−10 ℃)。为具有

典型性，首先针对构成 9 bit 光纤延时线的单段光纤延时精度进行了测试。测试结果如表 2 所示。

表 2　稳时光纤延时线典型延时值测试结果

设置延时量/ns	常温		低温		高温	
	实测值/ns	误差/ps	实测值/ns	误差/ps	实测值/ns	误差/ps
5	5.000 2	0.2	5.000 5	0.5	4.999 9	−0.1
10	9.999 7	−0.3	10.000 1	0.1	9.999 1	−0.9
20	20.000 6	0.6	20.000 9	0.9	20.000 2	0.2
40	39.999 6	−0.4	39.999 8	−0.2	39.998 8	−1.2
80	80.000 6	0.6	79.998 8	1.2	80.000 1	0.1
160	159.999 4	−0.6	159.999 7	−0.3	159.998 9	−1.1
320	320.000 5	0.5	320.001 4	1.4	319.999 7	−0.3
640	639.999 3	−0.7	639.999 6	−0.4	639.998 5	−1.5
1 280	1 280.000 8	0.8	1 280.001 1	1.1	1 279.999 5	−0.5

从表 2 中可以看出，在常温条件下，单段光纤延时误差均小于 1 ps；高低温时，每段光纤延时误差小于±1.5 ps。

然后，对本延时线的最大延时量(2 555 ns)的延时精度进行了测试。为了更好地演示其稳时过程，采用矢量网络分析仪中点频相位扫描的方式进行测试。其中，点频设置为 1 GHz，扫描时间为 100 s，扫描点数为 1 601，中频带宽为 1 kHz。得到的延时量(2 555 ns)精度测试曲线如图 5 所示。

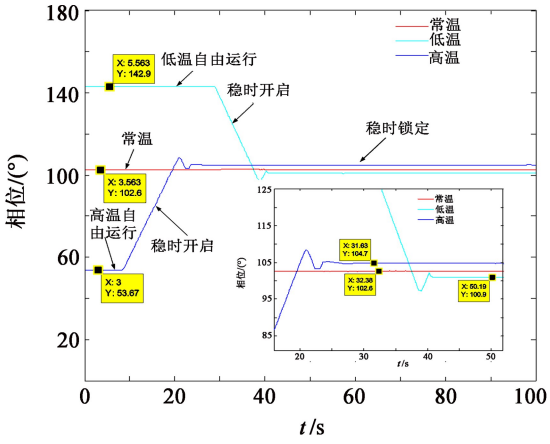


图 5　宽温条件下延时量(2 555 ns)精度测试曲线

从图中可以看出，相对于常温，低温条件下相位变化了 40.3°(对应 111.94 ps)，高温条件下相位变化了 48.93°(对应 135.92 ps)。开启稳时功能后，高低温条件下相位相对于常温分别为 2.1°和 1.7°，即延时误差分别为 5.8 和 4.7 ps。

可见本文设计的宽温宽带高精度可调光纤延时线可以满足在 60 ℃宽温范围内实现以 5 ns 为步进，延时精度优于±5.8 ps 的任意可调。

4　结论

针对宽温大动态高精度延时调控，设计了一种大动态延时稳定可调的光纤延时线，并对其进行了试验验证。通过有效结合多比特数控级联和空间光连续可调，实现了以步进延时量为单位的大范围高精度调控和针对某一延时点的连续精密可调；通过对稳相光纤进行试验研究，提出采用稳相光纤替代传统光纤并结合主动闭环反馈控制技术，实现了宽温范围内的真延时稳定控制。本文设计的光纤延时线，为大动态高精度稳时调控提供了一种解决思路，提高了光纤延时组件的环境适应性，具有较强的工程实用性。

参考文献：

[1] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics[J]. J. Lightwave Technol., 2006, 24(12): 4628-4641.

[2] Nguyen T A, Chan E H W, Minasian R A. Photonic radio frequency memory using frequency shifting recirculating delay line structure[J]. J. Lightwave Technol., 2014, 32(1): 99-106.

[3] Ye J, Peng J L, Jones R J, et al. Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network[J]. J. Opt. Soc. Am. B, 2003, 20(7): 1459-1467.

[4] Pan S L, Wei J, Zhang F Z. Passive phase correction for stable radio frequency transfer via optical fiber[J]. Photonic Netw. Commun., 2016, 31(2): 327-335.

[5] Pinkert T J, Böll O, Willmann L, et al. Effect of soil temperature on optical frequency transfer through unidirectional dense-wavelength-division-multiplexing fiber-optic links[J]. Appl. Opt., 2015, 54(4): 728-738.

[6] 朱少华，章征林，仇唐国，等. 等强度梁表面应变分布光纤测量实验[J]. 压电与声光，2019，41(6)：809-813.

(下转第 341 页)

4　结论

基于模式耦合理论，运用光纤光栅三层结构理论模型分析了在外界环境折射率小于、近似相等及大于包层折射率条件下，LPFG 对外界环境折射率的模式响应，并给出了详细的理论解释。在此基础上分析了涂覆 LPFG 对敏感薄膜折射率的光谱响应，得到了 LPFG 的谐振波长随敏感薄膜折射率变化的曲线及高灵敏度涂覆 LPFG 传感器所对应的典型值，为设计高灵敏度 LPFG 传感器提供了理论依据。

参考文献：

[1] Grattan K T V, Sun T. Fiber optic sensor technology: An overview[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2000, 82(1/3): 40-61.

[2] Yang Ying, Gu Zhengtian. Temperature and bending simultaneous sensing properties of cascaded grating[J]. Appl. Opt., 2013, 53(2): 165-173.

[3] Qi Liang, Zhao Chunliu, Yuan Jianyuan, et al. Highly reflective long period fiber grating sensor and its application in refractive index sensing [J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2014, 193: 185-189.

[4] Wang Jianneng, Luo Chingying. Long-period fiber grating sensors for the measurement of liquid level and fluid-flow velocity[J]. Sensors, 2012, 12(4): 4578-4593.

[5] Tang Fujian, Li Zhaochao, Chen Yizheng, et al. Monitoring passive film growth on steel using Fe-C coated long period grating fiber sensor[J]. IEEE Sensors J., 2019, 19(16): 6748-6755.

[6] Huang Ying, Tang Fujian, Liang Xiao, et al. Steel bar corrosion monitoring with long-period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles and polyurethane[J]. Structural Health Monitoring: An International J., 2014, 14(2): 178-189.

[7] Janczuk-Richter M, Dominik M, RozNiecka E, et al. Long-period fiber grating sensor for detection of viruses[J]. Sensors & Actuators B: Chemical, 2017, 250: 32-38.

[8] 秦海琨，张　敏，刘育梁，等. 光纤光栅生物传感器的研究进展综述[J]. 激光杂志，2008，29(5)：1-3.
Qin Haikun, Zhang Min, Liu Yuliang, et al. Research progress of fiber Bragg grating biosensors[J]. Laser J., 2008, 29(5): 1-3.

[9] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1997, 14(8): 1760-1773.

[10] Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. Appl. Opt., 1971, 10(10): 2252-2258.

[11] Erdogan T. Fiber grating spectra [J]. J. Lightwave Technol., 1997, 15(8): 1277-1294.

[12] Vikram B, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. Opt. Lett., 1996, 21(9): 692-694.

[13] Sao C. Optical Fibre Waveguide Analysis[M]. New York: Oxford Press, 1992.

[14] Stegall D B, Erdogan T. Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1999, 11(3): 343-345.

作者简介：

杨　颖(1970—)，女，山东临沂人，博士，教授，主要研究方向为光纤光栅传感、光电测量工程、光电子技术。

(上接第 335 页)

Zhu Shaohua, Zhang Zhenglin, Qiu Tangguo, et al. Optical fiber measurement of surface strain distribution on equal strength beam[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2019, 41(6): 809-813.

[7] 李得龙，程清明，张宝富，等. 光纤链路时延波动对频率传递稳定度的影响[J]. 激光与光电子学进展，2014，51(1)：010602.
Li Delong, Cheng Qingming, Zhang Baofu, et al. Research on the impact of optical fiber link delay fluctuation on frequency transfer stability[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 010602.

[8] 朱文武. 光载射频链路的非线性抑制和温度稳定性研究[D]. 大连：大连理工大学，2019：59.
Zhu Wenwu. Research on the nonlinearity suppression and temperature stability of radio over fiber links[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019: 59.

[9] 瞿鹏飞，廖　理，白瑶晨，等. 模拟微波光传输链路中的相位检测技术研究[J]. 半导体光电，2013，34(2)：282-286.
Qu Pengfei, Liao Li, Bai Yaochen, et al. Research on the phase detection technology in analog microwave photonic links [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(2): 282-286.

作者简介：

梁　旭(1986—)，男，四川南充人，2013 年毕业于电子科技大学光学工程专业，获工学硕士学位，工程师，主要从事微波光子学方面的研究。