

采用光纤光栅级联结构实现光纤延迟线

王 翀, 杜 欢, 王 静, 王 菁, 王景华

西安邮电大学电子工程学院, 陕西 西安 710121

摘要 在使用光纤光栅实现皮秒级别时延的基础上, 提出一种光纤光栅与单模光纤相结合的微秒级别级联结构, 该结构可以实现中心波长 1 550~1 553 nm 范围内, 间距为 1 nm 的窄波长反射型时延线, 共 1, 1.5, 2 和 2.5 μs 四种不同的时延。将单波长反射的啁啾布拉格光纤光栅与 103 m 单模光纤连接构成延迟单元, 再利用光环形器将 4 个延迟单元级联并使用内半径为 3 cm 的光纤绕线盘, 将四种延时单元的传输光纤进行整合。借助光纤光栅的反射镜作用, 控制不同波长光信号通过不同的传输距离, 从而达到时延目的。本文通过对啁啾布拉格光纤光栅的反射谱进行仿真分析, 发现相邻反射谱的旁瓣会出现交叠现象, 因此使用六个切趾函数对旁瓣滤除。结果显示: 不同切趾函数的滤除效果也不同, 能够完全滤除旁瓣并且对反射谱包络影响最小的是柯西切趾函数, 经柯西切趾后能使不同波长光信号在对应中心波长 1 nm 范围内反射率达到 1, 而其他位置均为 0。由于使用光纤绕线盘整合延迟单元传输光纤会产生一定损耗, 因此对弯曲损耗进行仿真分析, 结果表明: 弯曲半径相同时, 损耗与工作波长成正比; 工作波长相同时, 弯曲损耗与弯曲半径成反比。当弯曲半径大于 2.9 cm 时, 弯曲损耗曲线变化平缓并趋于 0, 因此当光纤绕线盘内半径为 3 cm 时保证了在减小延迟模块体积的同时又不会有过大的损耗。通过 TDS784D 型示波器对频率为 2 000 Hz 的信号经不同传输距离后的波形进行测试, 结果显示经 3 m 和 5 km 传输线后信号的各项参数基本保持不变, 经过长距离传输后, 依然能保持原信号特性, 因此使用 103 m 传输线可达到延迟目的。使用 W-GGL 型光功率计对不同频率下的输出功率进行测量, 与直光纤的输出功率相比, 当弯曲半径为 2~3 cm 时偏差较大, 等于 3 cm 时偏差为 0.18 dBm, 大于 3 cm 时则无限趋近, 因此设置绕线盘内半径为 3 cm 符合光纤延迟线的损耗范围。

关键词 光纤延迟线; 光纤光栅级联结构; 反射谱; 切趾函数; 弯曲损耗

中图分类号: TN913.7 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)07-2241-06

引 言

光纤延迟线作为光分组的存储设备和缓冲器^[1], 被广泛应用于光通信、全光信号处理、相控阵雷达天线以及微波产生系统中^[2], 具有损耗低、体积小、易于集成、带宽大、抗电磁干扰等优点^[3-4]。光纤延迟线的研究一般通过几个特征来实现: 一是连续可调性, 二是使用相对较短的光学长度最大程度地减少延迟, 三是同时访问一个或多个可能的延迟值^[5]。近年来, 人们利用各种光学元件来制作光纤延迟线, 常用到单模光纤、色散补偿光纤、光纤布拉格光栅、集成波导或光子晶体波导^[6-7]等, 而光纤光栅型延迟线的研究成为一大热点。

光纤布拉格光栅作为一种重要的光学滤波器件, 广泛应用于传感器、通信、色散控制和光子信号处理器中^[8-9]。它是

一种有效折射率沿长度周期性变化的波导结构, 由于这种周期性的指数变化, 可以使其反射特定波长的光, 因此可作为特定波长的反射器或滤波器^[10]。在光纤延迟线中, 通常会利用光纤光栅的反射镜作用、群时延作用或者温度应变能力达到延时目的。2018年, Zhao^[11]等提出一种基于线性啁啾光纤布拉格光栅的可配置光子真时延迟线, 利用光纤光栅的群时延特性, 控制波长为 1 549.92, 1 551.72, 1 552.52 和 1 553.33 nm 的光信号经过 8 个串联啁啾布拉格光栅, 实现了 104 ps 的延迟, 这种延迟线虽然中心波长间距小, 但延时范围只有皮秒级别; 2019年, Ao^[12]等提出一种基于光波导带布拉格光栅的光纤延迟线, 这种延迟线使用布拉格反射器和延迟波导组成延迟波导单元, 实现了中心波长范围为 1 560~1 584.5 nm、间距为 3.5 nm、单步长为 12.5 ps 的延迟, 这种结构延迟线能够将一路传输光纤多次使用, 但中心波长间距大。

收稿日期: 2021-04-27, 修订日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(61805199), 陕西省自然科学基金项目(2020JM-578)资助

作者简介: 王 翀, 1972年生, 西安邮电大学电子工程学院副教授 e-mail: cw72@xupt.edu.cn

在此基础上提出了一种光纤光栅与单模传输光纤相结合的级联结构,可以实现中心波长范围为 1 550~1 553 nm、间距为 1 nm、单步长为 0.5 μs 的延迟线,即能使中心波长间距变为 1 nm 的窄带,又能使一路传输光纤被多次使用的微秒级别时延。

1 系统构成及工作原理

1.1 光纤延迟线的系统构成

光纤延迟线系统包括六部分,分别为:可调谐激光光源(TUNICS T100S-HP 高功率可调谐激光器)、DWDM 密集波分复用器、EDFA 光纤放大器、光延迟模块、波分解复用器(DE-DWDM)以及光探测器^[11]。如图 1 所示,其中,可调谐激光器发射的波长范围为 1 500~1 630 nm,本文选择 1 550, 1 551, 1 552 和 1 553 nm 这四个波长,经密集波分复用器后由单根光纤传输至光纤放大器,完成对光信号的放大,之后由光延迟模块对不同波长的光信号进行相应时延,最后由波分解复用器将延迟后的信号分为四路从光探测器输出。

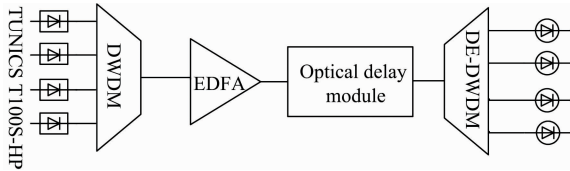


图 1 系统框图

Fig. 1 Block diagram of system

1.2 原理及延迟模块设计

光在传输光纤中传播时,满足式(1),时延大小 Δt 会随传输光纤长度 L 的增大而增大,也就是说只要改变光纤长度就能实现不同的延迟时间。

$$\Delta t = \frac{L}{v_g} = \frac{Ln_g}{c} \quad (1)$$

式(1)中, n_g 为光纤的群折射率。输入信号与输出信号仅发生时间延迟,但其频率、幅度等特性不发生改变。

因此,采用传输光纤完成光信号的时延,光延迟模块由单模传输光纤、光纤光栅、光环形器这三大构成,如图 2 所示,采用光纤光栅级联结构可以使每一路传输光纤被多次使用,从而减少传输光纤的数量。每个延迟单元由相同长度的传输光纤与特定波长反射啁啾布拉格光纤光栅连接而成,再使用光环形器将 4 个延迟单元级联构成光延迟模块,

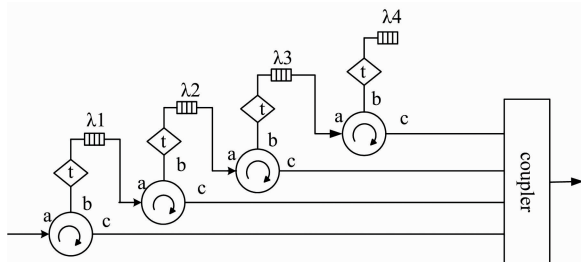


图 2 光延迟模块框图

Fig. 2 Block diagram of optical delay module

每个光栅的啁啾系数相同,只是光纤光栅反射光信号的特定波长不同。每个延迟单元的延迟步长均为 103 m,单次通过可实现 0.5 μs 的时延,所以该系统可实现 1, 1.5, 2 和 2.5 μs 四种不同的时延。

1.3 光纤绕线盘

随着信道容量和比特率的增加,传输线的复杂度和成本也随之增加,对于某些应用,即使是最简单的体积和重量也成为了关键因素。在此次延迟模块的设计中,由于所使用的单模传输光纤有四段,且每段长为 103 m,在使用时会被反复弯曲,为了避免传输光纤松动,将四段传输光纤更好的整合,并且尽量减小延迟模块体积,因此使用光纤绕线盘对延迟单元的体积进行压缩。此处使用的光纤绕线盘内径 6 cm,外径 10 cm,高 11 cm,如图 3 所示,其中 1~4 为四个延迟单元,5~8 为光纤光栅,9~12 为光环形器。

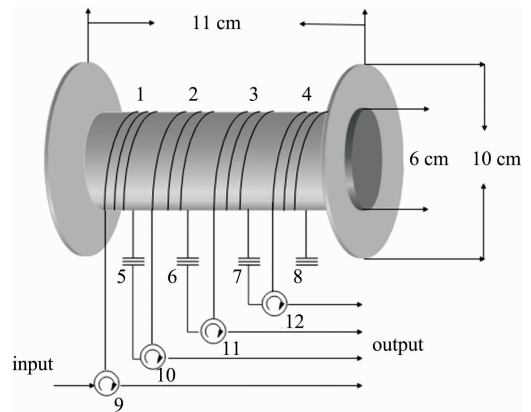


图 3 光纤绕线盘

Fig. 3 Optical fiber reel

2 计算与仿真分析

2.1 布拉格光栅反射谱

光纤布拉格光栅是一种内联光学滤波器,它可以反射特定波长的光,同时传输其他波长的光^[13]。光信号经光纤光栅传输,在到达特定波长 λ 处发生反射,如图 4 所示, $\Lambda(z)$ 表示光栅的折射率变化周期。

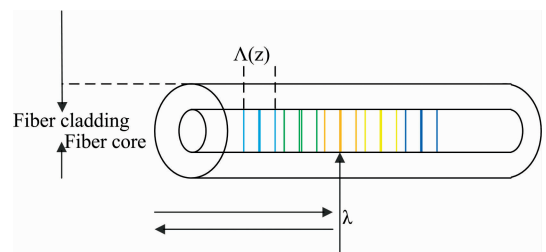


图 4 光纤光栅示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fiber grating

在均匀分布的布拉格光纤光栅中,反射率满足式(2)

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L)}{\cosh(\sqrt{k^2 - \sigma^2} L) - \frac{\sigma^2}{k^2}} \quad (2)$$

式(2)中, L 为光纤光栅的栅区长度, k 为交流耦合系数, $\hat{\sigma}$ 为自耦合系数, 取中心波长分别为 1 550, 1 551, 1 552 和 1 553 nm, 间距为 1 nm 的啁啾布拉格光纤光栅, 对其反射谱进行仿真分析, 设置栅区长度 4 cm, 折射率 1.45, 折射率调制深度 0.000 2, 啁啾系数 $10 \text{ nm} \cdot \text{cm}^{-1}$ 进行仿真。由于啁啾布拉格光栅的自啁啾效应, 导致反射谱出现沿中心波长不对称现象。结果如图 5 所示, 每个光纤光栅在对应中心波长范围内反射率为 1, 而其他波长范围反射率均为零, 但相邻波长反射谱旁瓣会出现重叠现象, 也就是说相邻波长的光信号在经过时会被反射掉一部分。

由于延迟模块所使用的光纤光栅只对单波长有反射作用, 经过图 5 的仿真可以发现, 光纤光栅结果并不理想, 因此采用几个切趾函数对反射谱旁瓣进行抑制。仿真结果如图 6 所示, 虽然不同切趾函数对反射谱的影响不同, 但都在一

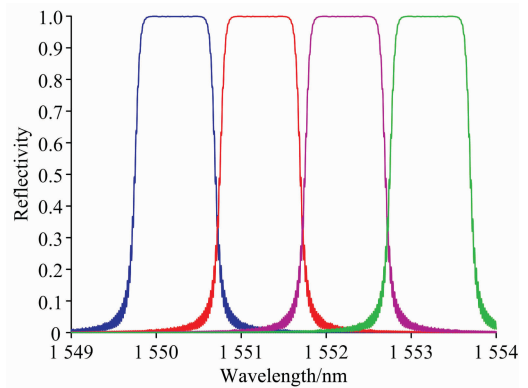


图 5 中心波长 1 550, 1 551, 1 552 和 1 553 nm 的反射谱
Fig. 5 Reflectance spectrum of center wavelength 1 550, 1 551, 1 552 and 1 553 nm

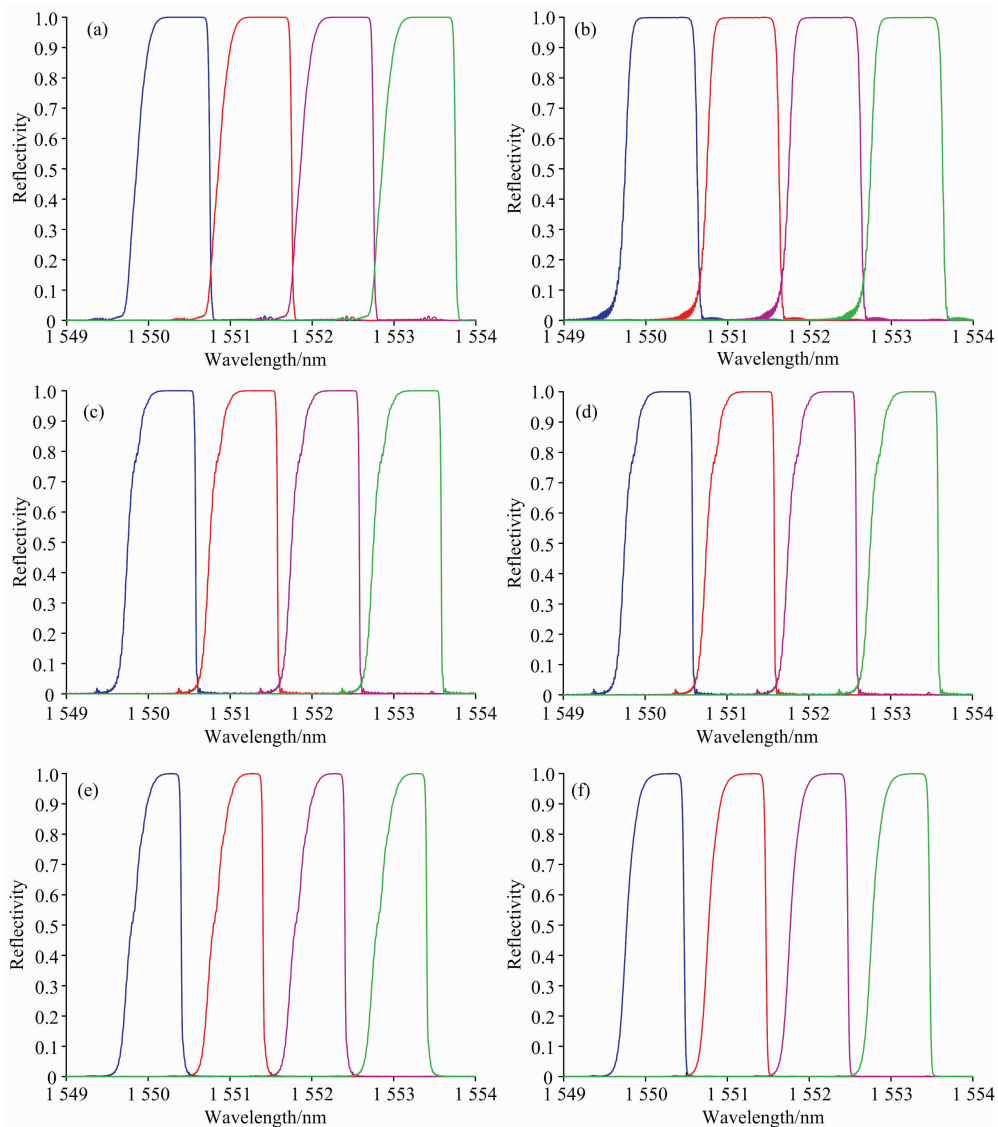


图 6 六个切趾函数切趾图

(a): 布莱克曼函数; (b): 辛格函数; (c): 双曲正切函数; (d): 汉明函数; (e): 高斯函数; (f): 柯西函数

Fig. 6 Six apodization function apodization diagram

(a): Blackman function; (b): Sinc function; (c): Tanh function; (d): Hamming function; (e): Gauss function; (f): Cauchy function

定程度上消减了反射谱带宽, 经对比可知, 布莱克曼函数、双曲正切函数和辛格函数都不能达到消除反射谱旁瓣的作用, 汉明函数在基本消除反射谱旁瓣的同时严重消减了反射

谱包络, 高斯函数和柯西函数能够完全消除旁瓣, 但都对反射谱包络产生了消减, 其中既能完全消除反射谱旁瓣, 又对反射谱包络影响最小的是柯西切趾函数。

表 1 不同切趾函数对比

Table 1 Comparison of different apodization functions

Apodization function	Expression	Parameter value	Analysis result
Blackman function	$f(z) = \frac{1 + (1 + D)\cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right) + D\cos\left(\frac{4\pi z}{L}\right)}{2(1 + D)}$	$D = 0.18$	The side lobes are not eliminated completely, and the reflection spectrum is deviated seriously from the center wavelength
Sinc function	$f(z) = \text{sinc}^A\left[\frac{1}{2}\left(\frac{2z}{L}\right)^B\right]$	$A = 2$ $B = 6$	The side lobes are not eliminated completely, and the reflection spectrum deviates from the center wavelength
Tanh function	$f(z) = 1 + \tanh\left[\beta\left(1 - 2\left \frac{2z}{L}\right ^a\right)\right]$	$\alpha = 1$ $\beta = 1$	Most of the side lobes are eliminated, but the top envelope is reduced
Hamming function	$f(z) = \frac{1 + H\cos\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}{1 + H}$	$H = 0.8$	Basically eliminate the reflection spectrum side lobes to achieve the effect of filtering side lobes, but the reflection spectrum envelope is severely reduced
Gauss function	$f(z) = e^{-G\left(\frac{z}{L}\right)^2}$	$G = 8$	Completely eliminate side lobes, and reduce the envelope at the top of the reflection spectrum, and have the better results
Cauchy function	$f(z) = \frac{1 - \left(\frac{2z}{L}\right)^2}{1 - \left(\frac{2Cz}{L}\right)^2}$	$C = 0.5$	Completely eliminate the side lobes, have little effect on the envelope, and have the best effect

2.2 弯曲损耗

使用光纤绕线盘整合传输光纤时, 会产生相应的弯曲损耗, 主要是由从直波导进入弯曲波导时产生的模式耦合损耗引起的^[14]。而弯曲损耗的计算方法十分繁多, 此处考虑到不同工作波长及弯曲半径的影响, 故而采用 Luc B Jeunhomme 理论仿真其弯曲损耗, 如图 7 所示。

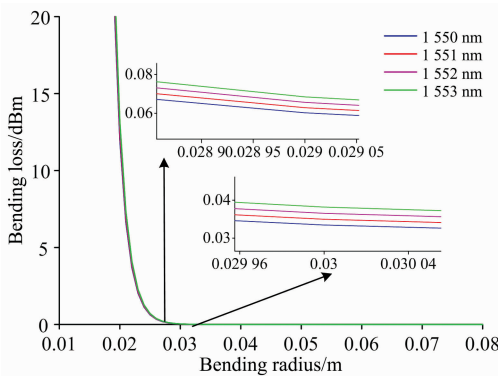


图 7 不同工作波长下光纤损耗随半径的变化

Fig. 7 Variation of fiber loss with radius under different working wavelengths

单位弧长上弯曲损耗 α_R 满足式 (3), 其中 R 为弯曲半径, $k_l(\omega)$ 为一阶第二类修正贝塞尔函数, ω 为径向归一化衰减常数, ν 为归一化频率, β 为光沿轴向传播系数, α 为纤芯半径。

$$\alpha_R = \frac{4.3429\pi\omega^2}{2\beta\alpha^2(1+\omega)\nu^2 k_l^2(\omega)} \exp\left(-\frac{2\omega^3 R}{3\beta^2 \alpha^2}\right) \quad (3)$$

由仿真结果可知, 弯曲半径相同时, 损耗与工作波长成正比; 工作波长相同时, 弯曲损耗与弯曲半径成反比。在 2~2.9 cm 范围内曲线快速下降, 大于 2.9 cm 以后较为平缓且趋近于零, 所以使用的光纤绕线盘内半径应大于 2.9 cm, 才能避免由弯曲带来的损耗, 因此选用内半径为 3 cm 的光纤绕线盘对延迟模块传输光纤进行体积压缩。

3 实验测试

3.1 延迟波形测试

由于在延迟单元中通过使用一定长度的传输光纤达到时延目的, 故而在实验测试过程中, 最重要的是须确保光信号经过不同传输距离后所产生的损耗最小, 因此在工作波长与弯曲半径保持不变的情况下, 当光纤长度分别为 0 m, 3 m 和 5 km 时对输出信号的波形进行测量, 测试框图如图 8 所示。采用 GY-IB 型手持式激光光源提供 1550 nm 的输出光信号, 光波经过特定长度的传输光纤之后, 利用泰克 TDS784D 型示波器对频率为 2 000 Hz 的输出波形进行测量, 如图 9 所示。

将一定长度的传输光纤绕成内半径为 8.25 cm 的绕线盘, 中心波长 1550 nm, 频率 2 000 Hz 的光信号直接输入示波器中测得周期为 500 μ s、相位 144°、信号带宽 500 MHz、脉冲宽度为 200 μ s; 经 3 m 和 5 km 传输线后各项参数均保

持不变。由测试结果可知，经 5 km 长距离延迟后的信号依然能保持原信号的特征，因此使用 103 m 传输光纤可达到预期延迟目的。

3.2 弯曲损耗测试

由于使用弯曲半径为 3 cm 的绕线盘对延迟单元中的传输光纤进行整合，为了检测弯曲半径是否合理，因此对中心波长为 1 550 nm，传输光纤总长度为 3 cm，但弯曲半径不同的情况下对输出功率进行测量，并绘制输出频率为 2 000 Hz 时不同弯曲半径下相对于直光纤的功率差曲线图(图 11)。采用 GY-IB 型手持式激光光源提供 1 550 nm 的输出光信号、3 m 传输光纤以及 W-GGL 型光功率计对不同频率下的输出功率进行测量。

结果显示，光纤的弯曲程度会对输出功率造成不同程度的损耗，当弯曲半径处于 2~3 cm 时，输出频率在 1 000 与 2 000 Hz 处有较大损耗，当弯曲半径大于 3 cm 时输出功率无限趋近于直光纤的输出功率，经计算在弯曲半径为 3 cm 处相对于直光纤的输出功率相差 0.18 dBm，因此设置绕线盘

内径为 3 cm 符合光纤延迟线的损耗范围。

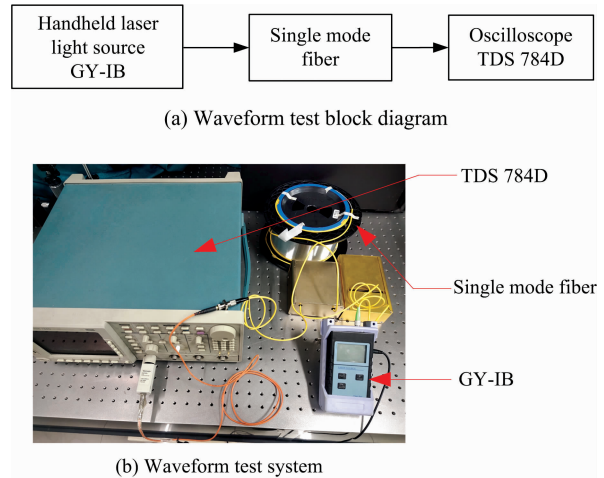


图 8 波形测试系统

Fig. 8 Waveform test system

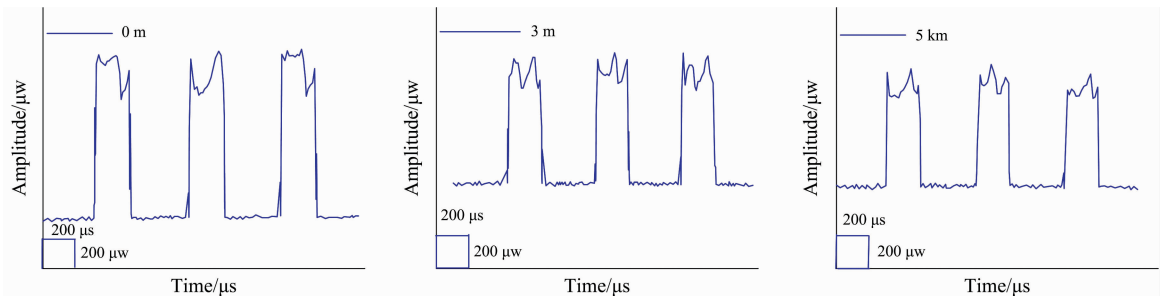


图 9 输出频率为 2 000 Hz 时不同传输距离波形

Fig. 9 Waveforms of different transmission distances when the output frequency is 2 000 Hz

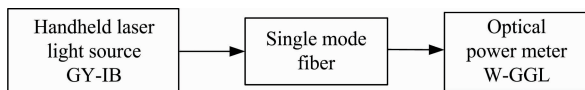


图 10 测试系统框图

Fig. 10 Block diagram of the test system

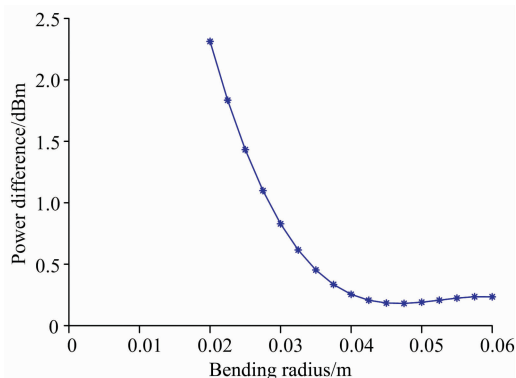


图 11 输出频率 2 000 Hz 时相对于直光纤的功率差

Fig. 11 The power difference relative to the straight optical fiber when the output frequency is 2 000 Hz

4 结 论

根据大范围可调光纤延迟线的基本要求，使用光延迟单元级联结构，不仅能将光纤光栅型延迟线时延范围提升到微秒级别，而且还实现了中心波长宽度为 1 nm 的窄波长反射型时延线，也能减少传输光纤的使用。本文对光纤的弯曲损耗以及中心波长不同的啁啾布拉格光纤光栅的反射谱进行仿真分析，由于反射谱旁瓣产生重叠现象，并没有达到预期效果，因此需采用不同的切趾函数对光纤光栅反射谱的旁瓣进行滤除。仿真结果表明：采用不同的切趾函数对反射谱的旁瓣滤除效果不同，能够完全滤除旁瓣并且对反射谱包络影响最小的是柯西切趾函数，经柯西切趾后在中心波长 1 nm 范围内反射率可达到 1 并且其他波长范围均为 0；工作波长与弯曲损耗成正比，当弯曲半径大于 2.9 cm 时，弯曲损耗曲线变化平缓且值接近于零。经实验验证，经过 5 km 长距离传输后依然保持原信号特征，因此，选用 103 m 的传输光纤达到相应时延范围是可行的；弯曲半径为 3 cm 时，输出光功率与直光纤的输出功率相近，损耗为 0.18 dBm，因此，选用 3 cm 作为弯曲半径可满足损耗低的要求。

References

- [1] Tang B, Wang X L, Nguyen C, et al. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2020, 28(1): 336.
- [2] Wang X, Dong J J. 2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama), 2018. 1409.
- [3] Lin D D, Xu X M, Zheng P F, et al. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 5503210.
- [4] Li J, Zhang X. 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2017. 2064.
- [5] Ahmed Almainan, Yinwen Cao, Amirhossein Mohajerin-Ariaei, et al. *Optics Communications*, 2020, 464: 125431.
- [6] Zhang J J, Yao J P. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(5): 1891.
- [7] Jiang L J, Huang Z R. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(5): 499.
- [8] Du Z M, Xiang C, Fu T Z, et al. *APL Photonics*, 2020, 5(10): 101302.
- [9] Zhao J, Wang H S, Sun X H. *Measurement*, 2021, 168: 108421.
- [10] Cheng R, Chrostowski L. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(2): 8300315.
- [11] Zhao J J, Ding Z D, Yang F, et al. International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2018.
- [12] Ao C, Luo R, Takahata K. 2019 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2019.
- [13] Panda T K, Mukesh A B, Polei S. 2020 International Conference on Computer Science, Engineering and Applications (ICCSEA), 2020.
- [14] ZHANG Yong, HAN Zhi-hui(张 勇, 韩志辉). *Tianjin Science & Technology(天津科技)*, 2017, 44(11): 50.

Using Fiber Grating Cascade Structure to Realize Fiber Delay Line

WANG Chong, DU Huan, WANG Jing, WANG Jing, WANG Jing-hua

School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China

Abstract Based on fiber grating to achieve picosecond-level delay, a microsecond-level cascade structure combining fiber grating and single-mode fiber is proposed. This structure can achieve a narrow wavelength with a center wavelength of 1 550~1 553 nm and a spacing of 1 nm. The reflective delay line has four different delays: 1, 1.5, 2 and 2.5 μ s. The single-wavelength-reflected chirped Bragg fiber grating is connected with a 103 m single-mode fiber to form a delay unit, and then an optical circulator cascades the four delay units and uses a fiber reel with an inner radius of 3 cm to integrate the transmission fibers of the four delay units. With the help of the mirror function of the fiber grating, the optical signals of different wavelengths are controlled to pass through different transmission distances to achieve the purpose of corresponding time delay. In this article, through the simulation analysis of the reflection spectrum of the chirped fiber Bragg grating, it can be found that the side lobes of the adjacent reflection spectrum will overlap. Therefore, six apodization functions are used to filter the side lobes. The results show that: the apodization function has different filtering effects on the side lobes of the reflection spectrum. The Cauchy apodization function can filter the side lobes and has the least impact on the reflection spectrum envelope. After Cauchy apodization, the reflectance of optical signals of different wavelengths can reach 1 in the range of the corresponding center wavelength of 1 nm, and the reflectance in other ranges is 0. Because the use of fiber reel to integrate the delay unit transmission fiber will produce a certain loss, the bending loss is simulated and analyzed. The results show that when the bending radius is the same, the loss is proportional to the working wavelength; when the working wavelength is the same, the bending loss is inversely proportional to the bending radius. When the bending radius is greater than 2.9 cm, the bending loss curve changes smoothly and tends to zero. Therefore, when the inner radius of the optical fiber winding reel is 3 cm, it is ensured that the volume is reduced without excessive loss. The waveforms of signals with a frequency of 2 000 Hz after different transmission distances are tested by a TDS784D oscilloscope. The results show that the signal parameters remain unchanged after 3 m and 5 km transmission lines. After long-distance transmission, the original signal characteristics can still be maintained. Therefore, the use of a 103 m transmission line can achieve the delay. The W-GGL optical power meter measured the output power at different frequencies. Compared with the output power of straight fiber, when the bending radius is 2~3 cm, the deviation is large, when the bending radius is equal to 3 cm, the deviation is 0.18 dBm, and when the bending radius is greater than 3 cm, it will approach infinitely. Therefore, the inner radius of the winding reel is set to 3 cm conforming to the loss range of the optical fiber delay line.

Keywords Fiber delay line; Fiber grating cascade structure; Reflection spectrum; Apodization function; Bending loss

(Received Apr. 27, 2021; accepted Nov. 22, 2021)