

# 基于光纤谐振腔的新型马赫-曾德尔干涉仪型 波长交错滤波器

鲁 彦<sup>1,2</sup>, 鲁怀伟<sup>1</sup>, 蒲会兰<sup>3</sup>, 侯 越<sup>3</sup>, 罗冠炜<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州 730070;

<sup>2</sup>甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030;

<sup>3</sup>兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 为改善全光纤波长交错滤波器(Interleaver)的输出特性,提出了一种将带自反馈光纤谐振腔的 $2 \times 2$ 光纤耦合器作为马赫-曾德尔干涉仪(MZI)输出端耦合器的新型全光纤 MZI-Interleaver,推导了该器件的输出表达式,并进行了数值模拟分析。分析结果表明:改进后的 MZI-Interleaver 透射波形更加接近于方波,阻带抑制和过渡带滚降特性明显加强;与传统的光纤谐振腔辅助 MZI-Interleaver 相比,在考虑传输损耗的情况下,改进后的 MZI-Interleaver 相干涉的两束光信号不存在幅度差异,因此降低了传输损耗对全光纤 MZI-Interleaver 消光特性的影响。

**关键词** 光纤光学; 波长交错滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 环形谐振腔

**中图分类号** TN253; TN929.11 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1106003

## Novel Mach-Zehnder Interferometric Interleaver Based on Fiber Ring Resonators

Lu Yan<sup>1,2</sup>, Lu Huaiwei<sup>1</sup>, Pu Huilan<sup>3</sup>, Hou Yue<sup>3</sup>, Luo Guanwei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

<sup>2</sup> Gansu Institute of Architectural Design and Research, Lanzhou, Gansu 730030, China;

<sup>3</sup> School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University,  
Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** In order to improve the output performance of all-fiber interleaver, a novel all-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI) interleaver which uses a  $2 \times 2$  fiber coupler with self-feedback as the output coupler is proposed. An output expression of the system is derived and simulated numerically. The results show that the transmitted waveform of the proposed MZI-Interleaver is close to a square wave, and the rejection in stopband and the rolloff in transition band are improved remarkably. Compared with the traditional MZI-Interleaver based on fiber resonator, the difference between the intensities of two coherent lights dose not exist when the influence of the propagation loss is considered, and the influence of the propagation loss on extinction ratio of all-fiber MZI-Interleaver can be effectively reduced.

**Key words** fiber optics; Interleaver; Mach-Zehnder interferometer; ring resonator

**OCIS codes** 060.4510; 060.2310; 060.2330; 060.2340

## 1 引 言

光学波长交错滤波器(Interleaver)是密集波分复用(DWDM)系统中的重要器件之一,它能够把均匀分布的信道按照奇数和偶数分为两组,从奇偶信道交错复用的角度进行波长间隔压缩,从而实现通信信

**收稿日期:** 2017-06-06; **收到修改稿日期:** 2017-06-30

**基金项目:** 国家自然科学基金(11362008,11672121)、甘肃省自然科学基金(1508RJZA081)

**作者简介:** 鲁彦(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤无源器件及其应用方面的研究。E-mail: 458194795@qq.com

**导师简介:** 鲁怀伟(1959—),男,硕士,教授,主要从事光纤无源器件等方面的研究。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

(通信联系人)

道间隔的倍增,达到进一步提高通信容量的目的。常规马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器(MZI-Interleaver)的通带形状为余弦型,其峰值特性和通带宽度还不能满足实际需要,使用时容易产生较大的插损和串扰。为了降低理想 Interleaver 对光源波长稳定性的要求,避免产生不必要的串扰,要求其输出谱具有宽平顶、锐截止且近似方波的特点。为实现上述要求,科研工作者提出了多级 MZI 串联结构的级联型全光纤 MZI-Interleaver<sup>[1-3]</sup>,理论和实验都证明级联型全光纤 MZI-Interleaver 可以提高响应通带的平坦性。然而,多级 MZI 级联会增加 MZI-Interleaver 的总干涉臂长,这必将严重影响全光纤 MZI-Interleaver 结构的简洁性和性能的稳定性<sup>[4]</sup>,同时也增加了实际制作的难度。另一种改进方案是将光纤谐振腔耦合到 MZI 的某一干涉臂中,形成不对称结构的光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver<sup>[5-7]</sup>。根据李卫彬等<sup>[6]</sup>的报道,这种不对称结构的 MZI-Interleaver 的 0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽分别达到 41.9 GHz 和 32.2 GHz,光纤谐振腔对改善全光纤 MZI-Interleaver 性能非常有利。但这种光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver 在结构上存在不对称性,光纤谐振腔在 MZI 的一个干涉臂中,当传输光信号经过该干涉臂时,光纤谐振腔传输信号的实际光程远大于不含光纤谐振腔的光程;显然,当存在传输损耗时,干涉臂中的两束光信号在到达输出耦合器时,其幅度将会产生较大的差异。由干涉原理可知,当相干涉的两束光信号存在幅度差异时,势必造成其输出光谱消光特性恶化,导致信道间的串扰大大增加。

针对传统的全光纤级联型 MZI-Interleaver 和光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver 的不足,本文提出了一种新的设计方案,即基于带自反馈的全光纤 MZI-Interleaver。

## 2 结构原理

设计的全光纤 MZI-Interleaver 和传统光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver 相比较,最大的改进是将一个带自反馈光纤谐振腔的  $2 \times 2$  光纤耦合器(图 1)作为 MZI 的输出耦合器。

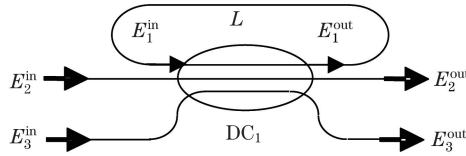


图 1 带自反馈光纤谐振腔的  $2 \times 2$  光纤耦合器结构示意图

Fig. 1 Schematic of configuration of  $2 \times 2$  fiber coupler with self-feedback fiber resonator

由图 1 可见,带自反馈光纤谐振腔的  $2 \times 2$  光纤耦合器由  $3 \times 3$  平行排列的光纤耦合器  $DC_1$  和长度为  $L$  的光纤组成,其中  $DC_1$  的输入端口 1 和输出端口 1 用光纤连接,组成光纤环谐振腔。设  $DC_1$  的输入光场和输出光场分别为  $E_i^{\text{in}}$  和  $E_i^{\text{out}}$  ( $i=1,2,3$ ),则  $E_i^{\text{in}}$  和  $E_i^{\text{out}}$  之间的关系可以表示为<sup>[8-9]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_1^{\text{out}} \\ E_2^{\text{out}} \\ E_3^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 \\ M_2 & M_4 & M_2 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^{\text{in}} \\ E_2^{\text{in}} \\ E_3^{\text{in}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $M_1 = \cos^2(k_1/2)$ , 其中  $k_1$  为  $DC_1$  的耦合系数;  $M_2 = i2^{-1/2} \sin k_1$ ;  $M_3 = -\sin^2(k_1/2)$ ;  $M_4 = \cos k_1$ ;  $E_1^{\text{in}} = \tau \exp(-i\beta L) E_1^{\text{out}}$ , 其中  $\beta = (2\pi n_{\text{eff}})/\lambda$  为光纤传播常数,  $n_{\text{eff}}$  为光纤的有效折射率,  $\tau$  为光信号在谐振腔中循环一周的归一化损耗,  $\tau = \exp(-\alpha L)$ , 其中  $\alpha$  为损耗系数。耦合器  $DC_1$  的输入光场  $E_2^{\text{in}}$ 、 $E_3^{\text{in}}$  和输出光场  $E_2^{\text{out}}$ 、 $E_3^{\text{out}}$  之间的关系可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_2^{\text{out}} \\ E_3^{\text{out}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau M_2^2}{\exp(i\beta L) - \tau M_1} + M_4 & \frac{\tau M_2 M_3}{\exp(i\beta L) - \tau M_1} + M_2 \\ \frac{\tau M_2 M_3}{\exp(i\beta L) - \tau M_1} + M_2 & \frac{\tau M_3^2}{\exp(i\beta L) - \tau M_1} + M_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_2^{\text{in}} \\ E_3^{\text{in}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

利用光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  将光纤耦合器  $DC_1$  和  $2 \times 2$  光纤耦合器  $DC_0$  连接,将  $DC_0$  作为 MZI 输入端耦合器,  $DC_1$  作为 MZI 输出端耦合器,构建一种带自反馈的  $2 \times 2$  光纤耦合器的新型结构的全光纤 MZI-Interleaver,

基于光纤耦合器谐振腔的 MZI-Interleaver 的结构示意图如图 2 所示。这样设计的目的是引导从耦合器 DC<sub>0</sub> 出射的两束相干光经光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  传输到输出端耦合器 DC<sub>1</sub>, 这两束相干光在 DC<sub>1</sub> 相遇并发生干涉时, 可以共用光纤谐振腔, 并得到类似于多光束干涉的效果, 避免了两路光传输信号实际光程差相差太大, 从而使干涉仪的两臂相位差产生新的变化。

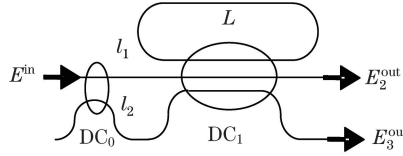


图 2 基于光纤耦合器谐振腔的 MZI-Interleaver 的结构示意图

Fig. 2 Schematic of configuration of MZI-Interleaver based on fiber coupler resonator

假设输入光场  $E^{\text{in}}$  从  $2 \times 2$  光纤耦合器 DC<sub>0</sub> 的上端口输入, DC<sub>0</sub> 的下输入端口无输入信号,  $E^{\text{in}}$  经 DC<sub>0</sub> 分解后传输到光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$ , 这两路相干光信号再经光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  传输后成为光纤耦合器 DC<sub>1</sub> 的输入光场  $E_2^{\text{in}}$  和  $E_3^{\text{in}}$ 。光信号在光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  中的传输距离比较短, 忽略其传输损耗, 参考图 2, 通过计算可得  $E_2^{\text{in}}$ 、 $E_3^{\text{in}}$  和  $E^{\text{in}}$  之间的关系为

$$\begin{pmatrix} E_2^{\text{in}} \\ E_3^{\text{in}} \end{pmatrix} = \exp\left(-i\beta\bar{l} - i\frac{\varphi}{2}\right) \begin{pmatrix} \exp\left(-i\theta - i\frac{\varphi}{2}\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\theta + i\frac{\varphi}{2}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos k_0 & -i \sin k_0 \\ -i \sin k_0 & \cos k_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E^{\text{in}} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\bar{l} = (l_1 + l_2)/2$ ,  $\theta = \beta(l_2 - l_1)/2 = \beta\Delta l$ ,  $k_0$  为耦合器 DC<sub>0</sub> 的耦合系数,  $\varphi$  为光纤干涉臂  $l_1$  的调整因子。

将(3)式中的  $E_2^{\text{in}}$  和  $E_3^{\text{in}}$  作为耦合器 DC<sub>1</sub> 的输入光场代入(2)式, 令  $\tau = 1$ , 则器件的归一化输出光强  $P_i(\theta) = |E_i^{\text{out}}/E^{\text{in}}|^2$  ( $i=2,3$ ) 可表示为

$$\begin{cases} P_2(\theta) = \frac{a_0 + a_1 \cos(n\theta) + a_2 \cos(\varphi - 2\theta) + a_3 \cos[\varphi + (n-2)\theta] + a_4 \cos[\varphi - (n+2)\theta]}{C} \\ P_3(\theta) = \frac{b_0 + b_1 \cos(n\theta) - a_2 \cos(\varphi - 2\theta) - a_3 \cos[\varphi + (n-2)\theta] - a_4 \cos[\varphi - (n+2)\theta]}{C}, \\ \beta L = n\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a_0 = 2\{1 + \cos^4(k_1/2) + \cos(2k_0)[\cos^4(k_1/2) + \cos(2k_1)]\}$ ,  $a_1 = -4\cos^2(k_1/2)[1 + \cos(2k_0)(2\cos k_1 - 1)]$ ,  $b_0 = 2\{1 + \cos^4(k_1/2) - \cos(2k_0)[\cos^4(k_1/2) + \cos(2k_1)]\}$ ,  $b_1 = -4\cos^2(k_1/2)[1 - \cos(2k_0)(2\cos k_1 - 1)]$ ,  $a_2 = \sqrt{2} \sin(2k_0) \sin k_1 (3\cos k_1 + 1)$ ,  $a_3 = -2\sqrt{2} \sin(2k_0) \sin k_1 \cos^2(k_1/2)$ ,  $a_4 = -\sqrt{2} \sin(2k_0) \sin(2k_1)$ ,  $C = 4[1 + \cos^4(k_1/2) - 2\cos^2(k_1/2)\cos(n\theta)]$ ,  $n$  为正整数。

### 3 器件最佳参数的确定

对于光学 MZI-Interleaver, 基本要求是两个输出通道应具有相同的输出波形, 即

$$P_2\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = P_3(\theta). \quad (5)$$

分析(4)式可以发现, 满足(5)式的基本条件为:  $P_1(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  中的系数满足  $a_0 = b_0$  和  $a_1 = b_1$ 。因此需将输入光纤耦合器 DC<sub>0</sub> 设计为 3 dB 耦合器, 即  $k_0 = \pi/4$ 。从(5)式可以看出, 当取  $k_0 = \pi/4$  时, 有  $a_0 + a_1 \cos(n\theta) = b_0 + b_1 \cos(n\theta) = C/2$ , 此时(4)式可以简化为

$$\begin{cases} P_2(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{a_2 \cos(\varphi - 2\theta) + a_3 \cos[\varphi + (n-2)\theta] + a_4 \cos[\varphi - (n+2)\theta]}{C} \\ P_3(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{a_2 \cos(\varphi - 2\theta) + a_3 \cos[\varphi + (n-2)\theta] + a_4 \cos[\varphi - (n+2)\theta]}{C} \end{cases} \quad (6)$$

结合(4)、(6)式, 进一步分析可以推导出满足(5)式的条件是:  $n=4$ 。将  $n=4$  代入(6)式, 则(6)式可以

简化为

$$\begin{cases} P_2(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{a_1 \sin(2\theta) + a_2 \cos(\varphi - 2\theta) - a_2 \cos(\varphi - 6\theta)}{C} \\ P_3(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{a_1 \sin(2\theta) + a_2 \cos(\varphi - 2\theta) - a_2 \cos(\varphi - 6\theta)}{C} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $a_1 = 8^{1/2} \sin k_1 \cdot [2\cos(k_1) + 1] \cdot \sin \varphi$ ,  $a_2 = -2^{1/2} \sin(2k_1)$ 。显然,(7)式同时满足(5)式和  $P_2(\theta) + P_3(\theta) = 1$ 。

由于两个输出通道具有相同的输出波形,因此对输出波形所要求的平顶、宽通带宽度和宽阻带宽度以及信道隔离度的研究可简化为只对其中一个信道的分析研究,以下以  $P_2(\theta)$  为例进行分析。

首先对  $P_2(\theta)$  进行求导,并令  $dP_2(\theta)/d\theta = 0$ 。经过计算发现,当  $\theta = \pi/4$  和  $\varphi = \pi/2$  时,  $P_2(\theta)$  存在极大值。将  $\varphi = \pi/2$  代入(7)式,(7)式可进一步简化为

$$\begin{cases} P_2(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{a_1 \sin(2\theta) + a_2 \sin(6\theta)}{C} \\ P_3(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{a_1 \sin(2\theta) + a_2 \sin(6\theta)}{C} \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $a_1 = 8^{1/2} \sin k_1 \cdot (2\cos k_1 + 1)$ ,  $a_2 = -2^{1/2} \sin(2k_1)$ 。将  $\theta = \pi/4$  代入(8)式,当  $k_1 \approx \pi/3$  时,  $P_2(\theta) \approx 1$ 。

光学 MZI-Interleaver 不仅要求其光谱输出通带具有相同的输出波形,而且还要有足够的通带宽度和阻带宽度,其信道峰值应具有宽平顶、锐截止等特点,输出波形要尽可能地近似于方波。因此,综合考虑,取光纤的纤芯有效折射率  $n_{\text{eff}} = 1.457$ ,  $k_0 = \pi/4$ ,  $\varphi = \pi/2$ ,  $k_1 = 2\pi/5$ , 得到所提 MZI-Interleaver 的输出光谱如图 3 所示。从图 3 可以看出,所提 MZI-Interleaver 的输出曲线  $P_2(\theta)$  和  $P_3(\theta)$  出现了平顶,具有明显的陡峭边缘,形成了近似于方波的曲线,相对于常规 MZI-Interleaver 的余弦输出有了较大的改善,过渡带的滚降特性明显加强。

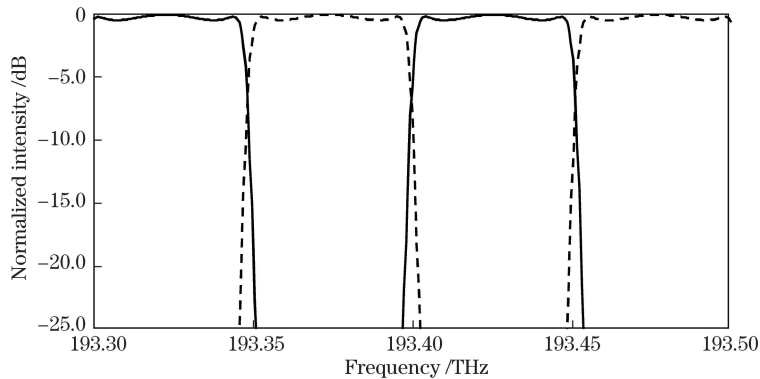


图 3  $k_0 = \pi/4$ ,  $k_1 = 2\pi/5$  时, 所提 MZI-Interleaver 的输出光谱

Fig. 3 Calculated transmission spectra of proposed MZI-Interleaver when  $k_0 = \pi/2$  and  $k_1 = 2\pi/5$

图 4 为传统的光纤谐振腔辅助 MZI-Interleaver<sup>[7]</sup> 和设计的 MZI-Interleaver 的输出响应比较图,图中虚线和实线分别对应传统的光纤谐振腔辅助 MZI-Interleaver 和设计的 MZI-Interleaver。

经过计算可以得到两种 MZI-Interleaver 的 25 dB 截止带宽分别为 35.5 GHz 和 46.1 GHz。设计的 MZI-Interleaver 的 25 dB 截止带宽约占 50 GHz 频率间隔的 92.2%, 传统的光纤谐振腔辅助 MZI-Interleaver 的 25 dB 截止带宽约占 50 GHz 频率间隔的 71%, 因此,设计的 MZI-Interleaver 的 25 dB 截止带宽得到明显拓宽。另外, Kok 等<sup>[1]</sup> 报道的二级 MZI 级联的 MZI-Interleaver 的 25 dB 截止带宽约 15.8 GHz, 占 50 GHz 的 31.6%; 李卫彬等<sup>[6]</sup> 设计的双耦合器谐振腔的 MZI-Interleaver 结构中, 其 25 dB 截止带宽约 32.2 GHz, 占 50 GHz 的 64.4%; 鲁怀伟等<sup>[10]</sup> 设计的基于对称结构的 8 字形谐振腔 MZI-Interleaver 中, 25 dB 截止带宽约为 18.4 GHz。由此可以看出, 和文献[1, 6, 7, 10] 相比, 所设计的新结构 MZI-Interleaver 的输出光谱更接近方波。

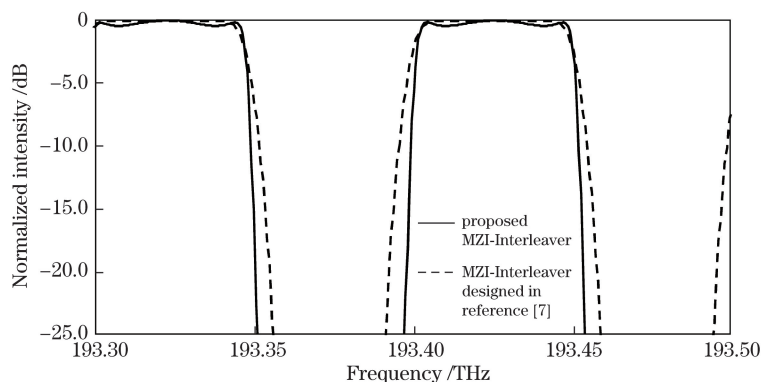


图 4 设计的 MZI-Interleaver 与文献[7]设计的 MZI-Interleaver 输出响应的比较

Fig. 4 Comparison of responses between proposed MZI-Interleaver and MZI-Interleaver reported in reference [7]

## 4 分析讨论

### 4.1 耦合比对输出光谱的影响

尽管所设计的全光纤 MZI-Interleaver 所需的光纤耦合器数目已经减少到两个, 但由第 3 节的理论分析可以看出,  $DC_0$  和  $DC_1$  的耦合系数  $k_0$  和  $k_1$  依然是影响 MZI-Interleaver 性能的关键因素,  $k_0$  和  $k_1$  的选取决定了输出谱的形状和信道隔离度的大小。另外, 在实际制作器件时, 由于制作工艺以及实验条件等原因的限制, 光纤耦合器分光比的实际值与理论期望值之间往往有一定的偏差, 耦合系数  $k_0$  和  $k_1$  产生偏差直接影响耦合器的分光比, 因此讨论耦合系数  $k_0$  和  $k_1$  与最佳理论值的偏差对 MZI-Interleaver 输出光谱的影响是十分必要的。

设  $\Delta k_0$  和  $\Delta k_1$  分别代表耦合器  $DC_0$  和  $DC_1$  的耦合角偏差值, 将  $k_0 = \pi/4 \pm \Delta k_0$  和  $k_1 = 2\pi/5 \pm \Delta k_1$  分别代入(2)、(3)式进行数值计算, 得到设计的 MZI-Interleaver (实线和虚线) 与文献[7]报道的 MZI-Interleaver (点划线) 输出光谱的比较如图 5 所示。

在计算中, 取  $\Delta k_0 = \pi/4 \times 5\%$ ,  $\Delta k_1 = 2\pi/5 \times 5\%$ 。从计算结果可以看出, 在 5% 的耦合比误差范围内, 输出谱线的形状基本保持不变, 保持近似方波的形状。在图 5(a)、(c) 中有微小旁瓣电平出现, 表明输出耦合器的耦合系数应尽量不小于  $2\pi/5$ 。由进一步的计算可知, 如果要满足相邻信道隔离度大于 25 dB, 要求  $k_0$  的误差保持在  $\pm 5\%$  时,  $k_1$  的误差应小于  $+8\%$ 。

在图 5 的计算结果中, 点划线代表文献[7]设计的 MZI-Interleaver 在同样误差时的计算结果, 结果保持  $\pi/4$  不变。从图 5 可见, 在同样误差情况下, 所设计的 MZI-Interleaver 的输出光谱仍然接近方波, 25 dB 截止带宽比文献[7]设计的 MZI-Interleaver 宽, 且在输出光谱的通带平坦度、信道隔离度等方面具有明显优势。

和传统的全光纤 MZI-Interleaver 相比较, 所设计的 MZI-Interleaver 在结构上更加简单紧凑, 文献[6]中设计的全光纤 MZI-Interleaver 需要 4 个光纤耦合器, 文献[1, 7, 10]中设计的全光纤 MZI-Interleaver 至少需要 3 个光纤耦合器, 而本文设计的新结构全光纤 MZI-Interleaver 仅需要 2 个光纤耦合器, 所需的光纤耦合器数目明显减少。

在实际制作器件时, 很难准确控制光纤耦合器的分光比, 由于制作工艺、制作环境、实验条件等客观条件的限制, 耦合器的分光比往往会产生一定的误差。因此, 器件的结构参数必须具备容错能力, 容错性能越好, 器件越实用。通过前面的对比分析可以看出, 所设计的全光纤 MZI-Interleaver 在耦合器耦合系数产生  $\pm 5\%$  的误差范围内, 输出光谱仍可以保持近似方波, 且均能得到比较理想的输出光谱。通带平坦度、信道隔离度、25 dB 截止带宽等参数随耦合器的耦合系数变化明显小于文献[7]设计的 MZI-Interleaver, 抗偏差和容错能力得到提高。

所设计的全光纤 MZI-Interleaver 所需的光纤耦合器数目少, 结构简单紧凑, 同时对光纤耦合器耦合系数误差的控制要求相对较低, 降低了实际制作难度, 提高了其实用性。

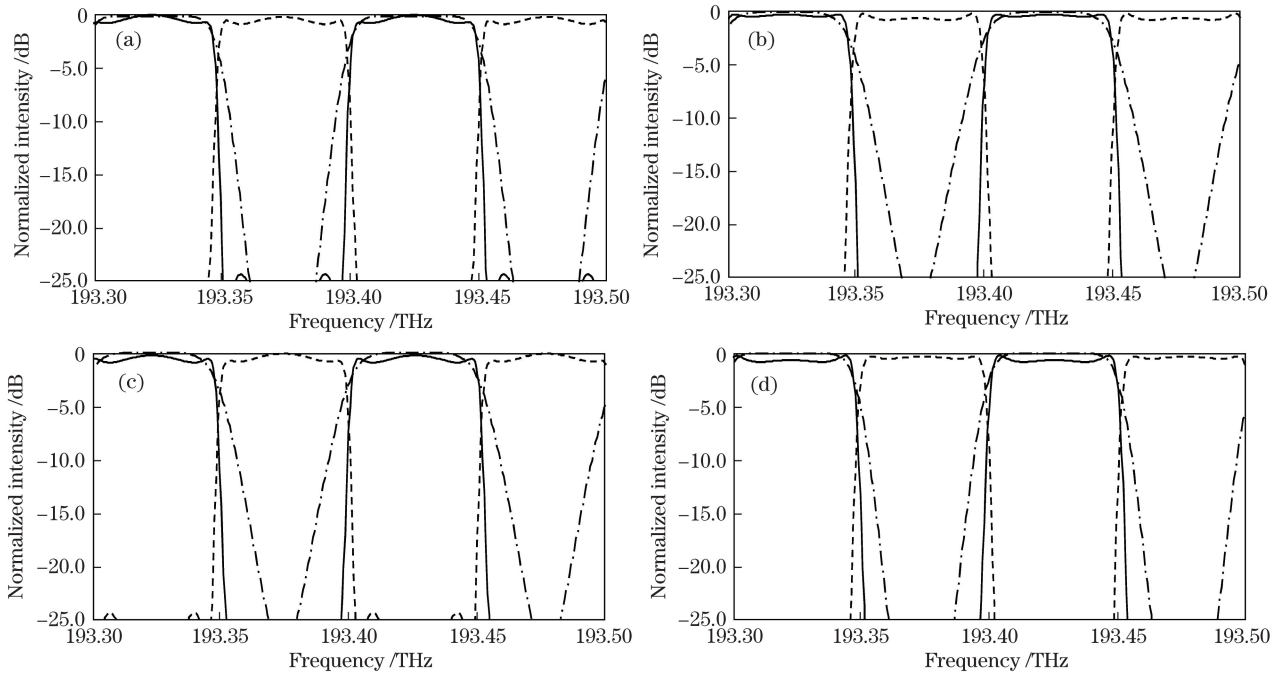


图 5 设计的 MZI-Interleaver(实线和虚线)与文献[7]报道的 MZI-Interleaver(点划线)输出光谱的比较图。

$$(a) k_0 = \pi/4 - \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 - \Delta k_1; (b) k_0 = \pi/4 - \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 + \Delta k_1;$$

$$(c) k_0 = \pi/4 + \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 - \Delta k_1; (d) k_0 = \pi/4 + \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 + \Delta k_1$$

Fig. 5 Comparison of responses between proposed MZI-Interleaver (solid and dotted line) and MZI-Interleaver reported in reference [7] (dashed line). (a)  $k_0 = \pi/4 - \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 - \Delta k_1$ ; (b)  $k_0 = \pi/4 - \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 + \Delta k_1$ ;

$$(c) k_0 = \pi/4 + \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 - \Delta k_1; (d) k_0 = \pi/4 + \Delta k_0, k_1 = 2\pi/5 + \Delta k_1$$

#### 4.2 传输损耗对 Interleaver 响应特性的影响

经过对传统光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver 分析可以发现,由于其光纤谐振腔是加在 MZI 的某一干涉臂中,光信号传输光程存在严重的不对称性,在信号的传输过程中,一路信号要多次经过光纤谐振腔,而另一路信号通过另一支干涉臂直接传输到输出耦合器。在含光纤谐振腔的干涉臂中,传输光信号的实际光程远大于不含光纤谐振腔干涉臂中传输信号的实际光程。另外,由于组成光纤谐振腔的光纤会不可避免地出现弯曲,从而增大传输损耗。当存在传输损耗时,两臂中传输的两束光信号由于实际光程的差异,到达输出耦合器产生干涉时,其幅度将会产生较大的差异。由于干涉原理可知,当相干涉的两束光信号存在较大幅度差异时,输出光谱的消光比会降低,导致输出信道间的隔离度明显降低,信道间的串扰增加。研究结果表明,针对传统的光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver,除非采取有源的方式对传输损耗进行补偿,否则在损耗的作用下,谐振腔的幅度响应将表现出波长依赖性,当  $\tau \leq 0.6$  时,阻带抑制将低于 20 dB,从而导致其输出消光比恶化,输出信道间隔度降低<sup>[5]</sup>。

为了分析传输损耗对所设计的 MZI-Interleaver 输出光谱性能的影响,取不同的  $\tau$  值代入(2)、(3)式进行模拟计算。图 6 为本文设计的 MZI-Interleaver (实线)与文献[7]设计的 MZI-Interleaver (点线)输出响应的比较图,计算中分别取  $\tau = 0.9, \tau = 0.6, \tau = 0.4$ 。计算结果表明,所设计的全光纤 MZI-Interleaver 具有明显的优势,当  $\tau = 0.6$  时,阻带抑制大于 25 dB,即使在  $\tau = 0.4$  时,其阻带抑制仍然大于 25 dB,与传统的光纤谐振腔辅助非平衡 MZI-Interleaver 相比,输出光谱的消光比以及阻带抑制均得到了明显提高。

## 5 结 论

在深入研究  $3 \times 3$  光纤耦合器耦合角对环形谐振器幅度和相位时延影响的基础上,利用谐振器反馈回路对光信号引入的相位进行调节,提出了一种将带自反馈光纤谐振腔的  $2 \times 2$  光纤耦合器作为 MZI 输出耦合

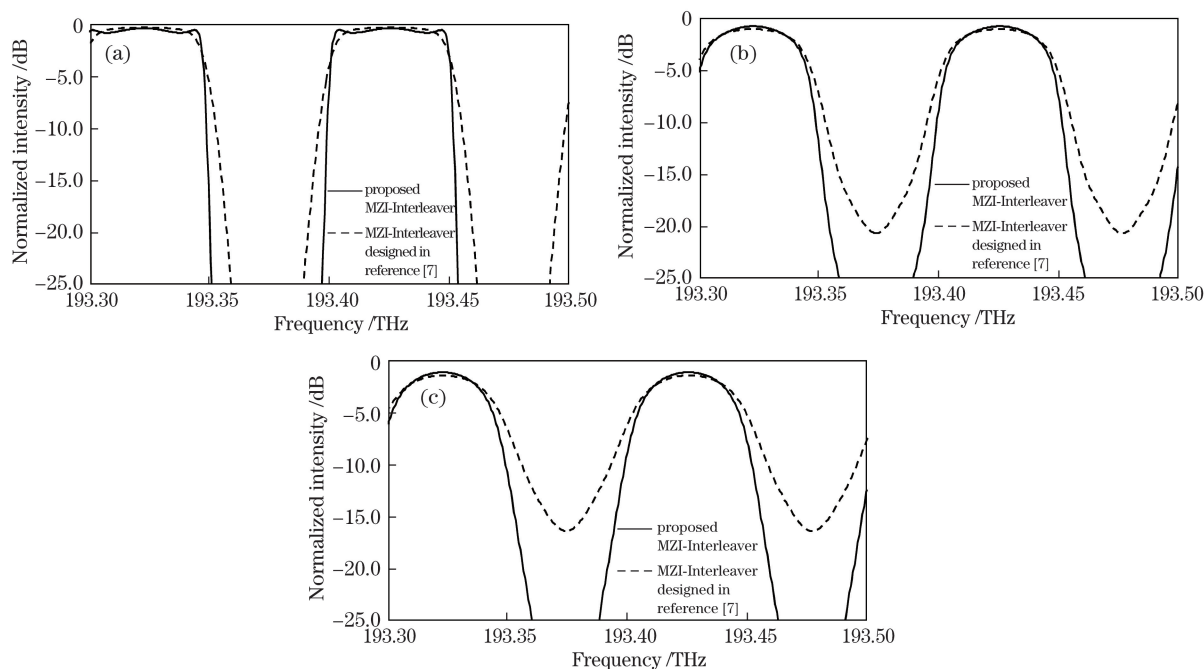


图 6 设计的 MZI-Interleaver(实线)与文献[7]设计的 MZI-Interleaver (点线)输出响应的比较。

(a)  $\tau=0.9$ ; (b)  $\tau=0.6$ ; (c)  $\tau=0.4$

Fig. 6 Comparison of responses between proposed MZI-Interleaver (solid line) and MZI-Interleaver reported in reference [7] (dot line). (a)  $\tau=0.9$ ; (b)  $\tau=0.6$ ; (c)  $\tau=0.4$

器的新型全光纤 MZI-Interleaver。通过理论分析和模拟计算得到了可以实现具有平顶、低谷、近似于方波形态输出光谱的结构参数,并系统分析了这些结构参数对输出光谱特性的影响,给出了满足通信实用要求的结构参数范围。研究表明:所设计的全光纤 MZI-Interleaver 在参数合理的情况下,可以实现平坦的通带响应和过渡带滚降特性,改善相邻信号的隔离度,减少信道间的串扰,具有更好的滤波效果。和传统光纤谐振腔辅助 MZI-Interleaver 相比,采用所设计的全光纤 MZI-Interleaver 可以在保证得到平顶、低谷、近似于方波形态的输出光谱的同时,满足:1) 在考虑信号的传输损耗情况时,两束相干涉的信号在幅度上无明显差异,有效降低了传输损耗对输出光谱消光特性的影响;2) 输出光谱对光纤耦合器耦合系数误差的敏感度有所降低,耦合器耦合系数产生同样误差时,输出光谱的近似方波性、通带平坦度、25 dB 截止带宽和信道隔离度等均优于文献[7]设计的 MZI-Interleaver,抗偏差能力得到提高;3) 将器件所需的光纤耦合器数目减少到 2 个,比目前已经报道的全光纤 MZI-Interleaver 所需耦合器数目都少,结构更加紧凑简单。由此可见,这种性能优异、易于制作的、结构简单紧凑的新型全光纤 MZI-Interleaver 可在未来 DWDM 系统中发挥重要的作用。

### 参 考 文 献

- [1] Kok S W, Zhang Y, Wen C Y, *et al.* Design of all-fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples[J]. Optics Communications, 2003, 226(1): 241-248.
- [2] Xiao Yueyu, He Sailing. The design of cascaded Mach-Zehnder interferometer filter based on digital filter technique[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 346-350.  
肖悦娱, 何赛灵. 一种级联马赫曾德尔滤波器设计的新方法[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 346-350.
- [3] Li Jie, Tong Zhengrong, Meng Hongyun, *et al.* Theoretical study on optical comb-filter of cascaded M-Z interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(1): 41-44.  
李杰, 童峥嵘, 蒙红云, 等. 级联马赫曾德尔干涉仪光学梳状滤波的理论研究[J]. 光学学报, 2003, 23(1): 41-44.
- [4] Kuznetsov M. Cascaded coupler Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division-multiplexed optical systems[J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(2): 226-230.

- [5] Dong Xiaowei, Pei Li, Xu Ou, *et al.* Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(4): 638-642.  
董小伟, 裴丽, 许鸥, 等. 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(4): 638-642.
- [6] Li Weibin, Sun Junqiang. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(8): 1191-1194.  
李卫彬, 孙军强. 一种基于双耦合器谐振环的梳状滤波器特性分析[J]. 中国激光, 2008, 35(8): 1191-1194.
- [7] Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin, *et al.* Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometric interleaver using fiber loop[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(6): 702-705.  
周广, 赵春柳, 黄勇林, 等. 光纤环对非平衡马赫曾德尔干涉仪型波长交错滤波器性能的改善[J]. 光学学报, 2002, 22(6): 702-705.
- [8] Meng Yichao, Tan Weihang, Huang Zhaoming. General solutions to directional couplers with coupling between neighbored waveguides only[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(8): 964-969.  
孟义朝, 谭维翰, 黄肇明. 仅有相邻波导耦合的定向耦合器的一般解法[J]. 光学学报, 2003, 23(8): 964-969.
- [9] He Na, Wu Chongqing, Wei Yan, *et al.* Fused planar  $3 \times 3$  single mode fiber coupler[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(3): 323-327.  
何娜, 吴重庆, 卫炎, 等. 熔锥平行排列  $3 \times 3$  单模光纤耦合器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(3): 323-327.
- [10] Lu Huaiwei, Wu Kaijun, Wei Yun, *et al.* Study of a novel symmetrical interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1106005.  
鲁怀伟, 鄢开俊, 魏贇, 等. 基于对称结构的光纤谐振环辅助马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106005.