



DOI: 10.12086/oe.2019.180315

# 一种带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器的理论研究

魏晓明<sup>1</sup>, 鲁怀伟<sup>2\*</sup>, 杨琦<sup>2</sup>, 方雪欣<sup>3</sup><sup>1</sup>兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;<sup>2</sup>兰州交通大学数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070;<sup>3</sup>兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070

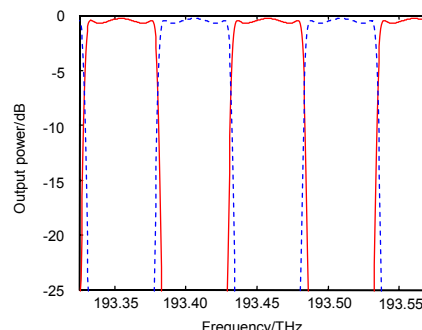
**摘要:** 为了改善全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型梳状滤波器(interleaver)的输出特性, 提出了由一个 2×2 光纤耦合器和一个带自反馈光纤谐振腔的光纤耦合器级联组成的改善型的全光纤 MZI 型梳状滤波器。根据其结构, 利用光纤传输理论和矩阵理论推导出了该器件的输出表达式, 并进行了数值模拟分析。结果表明: 该器件在合理参数的情况下, 利用带自反馈光纤谐振腔引入的相位调节效应, 使其 25 dB 截止带宽为 46.7 GHz, 约占 50 GHz 频率间隔的 93.4%, 输出光谱形态近似于方波。当存在传输损耗时, 两束干涉光信号的幅度不存在明显的差异, 降低了传输损耗对滤波器消光特性的影响, 与传统的光纤谐振环辅助非平衡 MZI 型梳状滤波器相比, 不仅降低了传输损耗对滤波器消光特性的影响, 而且还将所需的光纤耦合器数目减少至 2 个, 使其在未来的密集波分复用系统中能发挥重要作用。

**关键词:** 光纤耦合器; 梳状滤波器; 马赫-曾德尔干涉仪; 光纤谐振腔

中图分类号: TN252

文献标志码: A

**引用格式:** 魏晓明, 鲁怀伟, 杨琦, 等. 一种带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器的理论研究[J]. 光电工程, 2019, 46(5): 180315



## All-fiber MZI-interleaver with self-feedback fiber resonator

Wei Xiaoming<sup>1</sup>, Lu Huaiwei<sup>2\*</sup>, Yang Qi<sup>2</sup>, Fang Xuexin<sup>3</sup><sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;<sup>2</sup>School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730030, China;<sup>3</sup>School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract:** In order to improve the transmission performance of all-fiber Mach-Zehnder interferometer (MZI), a novel all-fiber MZI interleaver is proposed and discussed in this paper. All-fiber interleaver consists of one 2×2 fiber coupler and one coupler with self-feedback fiber ring resonator. According to its structure, the output expression of the device is deduced by using optical fiber transmission theory and matrix theory, and numerical simulation analysis is performed. The results show that the device adopts the phase adjustment effect introduced by the self-feedback optical fiber resonator with reasonable parameters, and its 25 dB cutoff bandwidth is 46.7 GHz which accounts for 93.4% of

收稿日期: 2018-06-11; 收到修改稿日期: 2018-11-03

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目 (1508RJZA081)

作者简介: 魏晓明(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤通信及光纤无源器件等方面的研究。E-mail: 2216563131@qq.com

通信作者: 鲁怀伟(1959-), 男, 硕士, 教授, 主要从事光纤通信光纤无源器件等方面的研究。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

the 50 GHz frequency interval. The output spectrum is similar to the square wave output. This device requires 2 fiber couplers, which is less than the number of couplers needed for the conventional all-fiber MZI-interleaver. When considering the existence of transmission loss, there is no difference in the amplitude of the two interference optical signals, which reduces the influence of transmission loss on the extinction characteristics of the filter. Compared with the conventional unbalanced MZI type interleaver with an optical fiber resonant ring, the structure is simple and compact, and has a certain anti-deviation ability. It also reduces the difficulty of making the device, which makes it play an important role in the future of dense wavelength division multiplexing systems.

**Keywords:** fiber optical coupler; interleaver; Mach-Zehnder interferometer; fiber ring resonator

**Citation:** Wei X M, Lu H W, Yang Q, et al. All-fiber MZI-interleaver with self-feedback fiber resonator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180315

## 1 引言

随着信息技术的跨越式发展,为了满足人们对通信容量的需求不断增加,当前密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)技术需要解决增加信道数、降低成本以及减小信道间隔的问题。由于 DWDM 系统随着信道间隔的不断减小,对复用/解复用器的要求也越发严苛,导致在研制密集型波分复用器过程中对技术的要求很苛刻,使得更窄带通复用器的成品率过低,元器件在市场上的价格不断上升。在这种情况下,研究人员提出了一种新型器件—梳状滤波器(interleaver),它不仅回避了传统镀膜工艺的局限而且还能将一组均匀分布的信道分为奇偶两组信道,使信道间隔增加一倍。当信道间隔缩小一半时,只需在原来的系统中增加一个梳状滤波器,这不仅可以提高通信容量还可以确保原来系统中的复用/解复用器件可继续适用,从而降低了系统成本。目前梳状滤波器主要有光子晶体型、晶体双折射型、马赫-曾德尔干涉仪型(Mach-Zehnder interferometer, MZI)、光纤光栅组合型和法布里-珀罗干涉滤光片型<sup>[1]</sup>等几种常见的类型。在上述的所有类型中由于马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器(MZI-interleaver)具有兼容性强、结构简单、信道均匀性好、插入损耗小、制作成本低等优点,成为目前很有应用前景的一种复用/解复用器件。但是常规的全光纤 MZI 型梳状滤波器的输出谱通带

形状大多为余弦型,其通带宽度和峰值特性还不能满足实际应用的需求<sup>[1]</sup>。为此,研究人员提出了光纤谐振腔辅助非平衡 MZI 型梳状滤波器<sup>[2-5]</sup>和多级 MZI 级联结构的全光纤 MZI 型梳状滤波器<sup>[6-11]</sup>。虽然这两种方案可以提高通带平坦性,但前一种方案光纤谐振腔辅助非平衡 MZI 型梳状滤波器的结构上存在不对称性,在考虑传输损耗的情况下,两束光信号经过不对称的两干涉臂传输后到达输出耦合器时,其光程差和时延都存在较大的差异,导致信道隔离度明显下降,因此需要在实际使用时对传输损耗进行必要的有源补偿。而后一种方案虽然在很大程度上能够缓解对激光器波长精度的要求,但这种级联型的方案严重影响了全光纤 MZI 型梳状滤波器性能的稳定性和结构的简洁性,导致该器件的输出特性并不理想。针对以上问题,本文提出了一种新型全光纤 MZI 型梳状滤波器的优化方案,该器件主要是由 2×2 光纤耦合器和自带反馈光纤谐振腔的光纤耦合器级联组合而成。分析了光纤耦合器的耦合系数以及传输损耗对系统特性的影响。经分析可得,优化后的全光纤 MZI 型梳状滤波器的输出谱形态更加接近于方波。

## 2 器件结构和理论基础

带自反馈光纤谐振腔的光纤耦合器的结构图如图 1 所示,从图 1 中可看出,2×2 的带自反馈光纤谐振

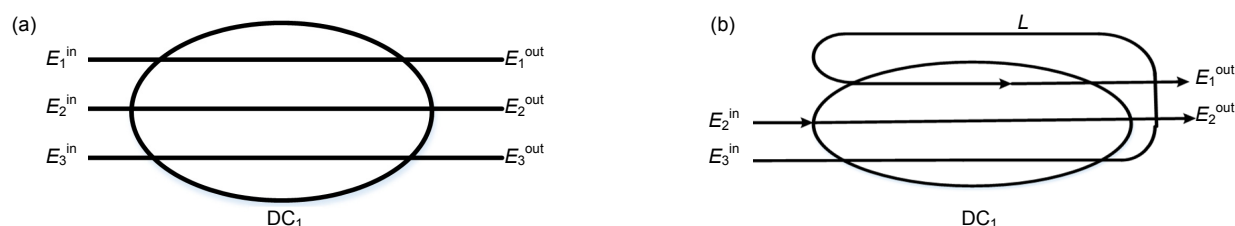


图 1 带自反馈腔的 2×2 光纤耦合器的结构

Fig. 1 Structure of a 2×2 fiber coupler with self-feedback cavity

腔的耦合器(图 1(b))是通过将一个 3×3 平行排列的光纤耦合器(图 1(a))的  $E_3^{out}$  和  $E_1^{in}$  由光纤  $L$  连接构成一个光纤谐振腔而形成的一个 2×2 光纤耦合器。

假设, 输入光从图 1(b)的  $E_2^{in}$  端口输入, 利用光纤耦合理论分析可得输入光场  $E_i^{in}$  和输出光场  $E_i^{out}(i=1,2,3)$  之间的关系可表示为<sup>[12-13]</sup>:

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

式中:  $E_1^{in} = \tau e^{-\beta L} E_3^{out}$ ,  $\beta = 2\pi n_{eff}$ ,  $\tau = \exp(-\alpha L)$ ,  $M_1 = \cos^2(k_1/2)$ ,  $M_2 = i2^{-1/2}\sin(k_1)$ ,  $M_3 = -\sin^2(k_1/2)$ ,  $M_4 = \cos(k_1)$ ,  $k_1$  是耦合器  $DC_1$  的耦合系数,  $\beta$  是光纤传播常数,  $\alpha$  是损耗系数,  $n_{eff}$  是光纤传导模的有效折射率,  $L$  是光纤谐振腔的长度,  $\tau$  是光信号在谐振腔中循环一周的归一化损耗。

为了构建一个 2×2 的带自反馈光纤谐振腔的 MZI 型梳状滤波器, 取  $DC_1$  为该光纤耦合器输出端, 另取一个光纤耦合器  $DC_0$  为 MZI 型梳状滤波器的输入端, 光纤耦合器  $DC_0$  和  $DC_1$  由光纤  $l_1$  和  $l_2$  将相连。图 2 是带自反馈光纤谐振腔的 MZI 型梳状滤波器的结构图。

从图中可以看出, 输入光信号经光纤耦合器  $DC_0$  分束后的两束干涉光通过光纤干涉臂  $l_1$  和  $l_2$  传输到光纤耦合器  $DC_1$  输出端, 这两束光信号在耦合器  $DC_1$  中发生干涉时共用耦合腔, 并在光纤谐振腔  $L$  中产生类似多束光干涉的效果。从而使得干涉仪的两干涉臂端相位差有了新的变化, 同时也避免了由两干涉臂的长度差带来的实际光程相差太大的缺点。输出端光场  $E_1^{out}$ 、 $E_2^{out}$  与输入光场  $E_{in}$  的关系可由传输矩阵来表示:

$$\begin{bmatrix} E_1^{out} \\ E_2^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\tau M_1 M_2}{e^{i\beta L} - \tau M_3} + M_2 & \frac{\tau M_1^2}{e^{i\beta L} - \tau M_3} + M_3 \\ \frac{\tau M_2^2}{e^{i\beta L} - \tau M_3} + M_4 & \frac{\tau M_1^2}{e^{i\beta L} - \tau M_3} + M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} e^{-i\beta \bar{l}} - i\varphi + i\theta & 0 \\ 0 & e^{-i\beta \bar{l}} - i\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in} \\ 0 \end{bmatrix},$$

式中:  $\bar{l} = (l_1 + l_2)/2$ ,  $\theta = \beta \Delta l$ ,  $\varphi$  为光纤干涉臂的调整因子,  $k_0$  是耦合器  $DC_0$  的耦合系数,  $\Delta l = l_1 - l_2$ 。为了简单起见, 令  $\tau = 1$ , 则器件的归一化输出光强  $P_i(\theta) = E_i^{out} \cdot E_i^{out*}$  ( $i=1,2$ ) (\*代表共轭复数)可表达为

$$\begin{cases} P_1^{out} = \frac{a_0 + a_1 \cos(n\theta) + a_2 \cos(\varphi - 2\theta)}{C} \\ \quad + \frac{a_3 \cos(\varphi + (n-2)\theta) + a_4 \cos(\varphi - (n+2)\theta)}{C} \\ P_2^{out} = \frac{b_0 + b_1 \cos(n\theta) - a_2 \cos(\varphi - 2\theta)}{C} \\ \quad - \frac{a_3 \cos(\varphi + (n-2)\theta) + a_4 \cos(\varphi - (n+2)\theta)}{C} \end{cases}, \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_0 &= 4 \sin(k_1)^2 \cos(k_0) + 4 \sin(k_1/2)^4 \sin(k_0)^2 \\ &\quad + 4 \cos(k_1)^2 \sin(k_0)^2; \\ a_1 &= 4 \sin(k_1)^2 \cos(k_0)^2 - 8 \sin(k_1/2)^2 \cos(k_1) \sin(k_0)^2; \\ a_2 &= -\sqrt{2} \sin(2k_0) \sin(k_1) (3 \cos(k_1) - 1); \\ a_3 &= -\sqrt{2} \sin(2k_0) \sin(2k_1); \\ a_4 &= -\sqrt{2} \sin(2k_0) \sin(k_1) (\cos(k_1) - 1); \\ b_0 &= 4 \cos(k_0)^2 \cos(k_1)^2 \\ &\quad + 4 \sin(k_1)^2 \sin(k_0)^2 + (\cos(k_1) - 1)^2; \\ b_1 &= 4 \cos(k_1) \cos(k_0)^2 (\cos(k_1) - 1) \\ &\quad + 4 \sin(k_1)^2 \sin(k_0)^2; \\ C &= 4(1 + \sin^4(k_1/2) + 2 \sin^2(k_1/2) \sin(n\theta)). \end{aligned}$$

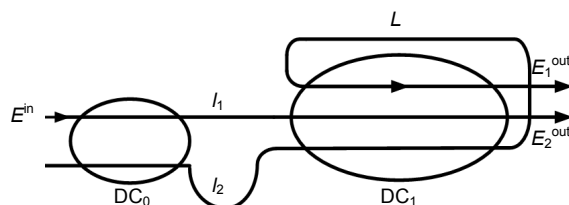


图 2 自带反馈光纤谐振腔的 MZI 型梳状滤波器结构图  
Fig. 2 MZI interleaver structure with feedback fiber resonator

### 3 分析讨论

#### 3.1 最佳耦合角的确定

两个输出端口的输出波形一致是光学梳状滤波器的基本要求, 因此,  $P_1(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  存在以下关系:

$$P_1(\theta + \pi/2) = P_2(\theta). \quad (4)$$

将式(4)带入式(3)中可以发现,  $a_0 = b_0$ ,  $a_1 = b_1$ ,  $n = 4$ , 也就是要求输入光纤耦合器  $DC_0$  为 3 dB 耦合器, 当取  $k_0 = \pi/4$  时式(3)可简化为

$$\begin{cases} P_1(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{a_1 \cos(\varphi - 2\theta) + a_1 \cos(\varphi - 6\theta)}{C} \\ \quad + \frac{a_2 \cos \varphi \cos 2\theta}{C} \\ P_2(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{a_1 \cos(\varphi - 2\theta) + a_1 \cos(\varphi - 6\theta)}{C} \\ \quad - \frac{a_2 \cos \varphi \cos 2\theta}{C} \end{cases}, \quad (5)$$

其中： $a_1 = -\sqrt{2} \sin(2k_1)$ ， $a_2 = 2\sqrt{2} \sin(k_1)(1 - \cos k_1)$ 。显然，从式(5)可以看出它既满足式(4)也满足  $P_1(\theta) + P_2(\theta) = 1$ 。由于两输出通道的输出波形相同，因此通过对式(5)中任意一个表达式进行分析，其输出通带宽度、通道平顶和阻带宽度以及信道隔离度等，对其结果均不产生影响。本文对式(5)中的  $P_1(\theta)$  进行了分析。为了保证得到最大平顶度，要求<sup>[14]</sup>：

$$\frac{\partial P_1(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad \frac{\partial^2 P_1(\theta)}{\partial^2 \theta} \Big|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad P_1(\theta) = P_{1,max}, \quad (6)$$

其中： $\theta_c$  为  $P_1(\theta)$  的极大值，再对  $P_1(\theta) + P_2(\theta) = 1$  进行求导，结合式(6)可得：

$$\frac{\partial P_2(\theta)}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad \frac{\partial^2 P_2(\theta)}{\partial^2 \theta} \Big|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad (7)$$

联解式(6)和式(7)，可得  $\theta = \pi/2$ ， $\varphi = \pi$ ， $k_1 = \pi/0.72$ 。

在模拟计算中，取  $k_0 = \pi/4$ ， $k_1 = \pi/0.72$ ， $\varphi = \pi$ ，光纤的纤芯有效折射率  $n_{eff} = 1.454$ ，传输中心波长  $\lambda_0 = 1550$  nm，中心频率  $f_0 = 193.4$  THz。模拟得到输出谱如图 3 所示(在图 3 中实线和虚线分别代表  $P_1$  和  $P_2$  的归一化输出光强)。从图 3 中可以看出，两输出光谱  $P_1(\theta)$  和  $P_2(\theta)$  出现了明显的陡峭边缘，形成了近似于方波的曲线。与传统的 MZI 型梳状滤波器的输出谱相比较，过渡带的滚降特性明显加强，且输出曲线出现的平顶可以抵消由信道波长漂移带来的不利影响<sup>[1]</sup>。

图 4 是传统光纤谐振腔辅助 MZI 型梳状滤波器<sup>[5]</sup>和带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器计算结果比较图，其中实线和虚线分别表示本文设计的带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器和传统的光纤谐振腔辅助非平衡 MZI 型梳状滤波器的输出谱。经计算可得本文设计的 MZI 型梳状滤波器

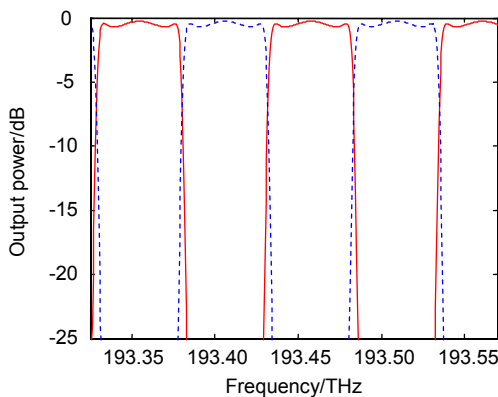


图 3  $k_0 = \pi/4$ ， $k_1 = \pi/0.72$  时，interleaver 的输出光谱图

Fig. 3 The calculated transmission spectra of the proposed interleaver using these parameter  $k_0 = \pi/4$  and  $k_1 = \pi/0.72$

的 25 dB 截止带宽为 46.7 GHz，约占 50 GHz 频率间隔的 93.4%，与文献[5]报道的传统的纤维谐振腔辅助 MZI 型梳状滤波器的 25 dB 截止带宽为 32.2 GHz 约占 50 GHz 频率间隔的 64.4% 相比，得到了明显提高。另外，文献[3]设计的光纤环对非平衡马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器性能改善的 25 dB 截止带宽约 35.5 GHz，占 50 GHz 频率间隔的 71%；文献[14]报道的二级级联型 MZI 型梳状滤波器的 25 dB 截止带宽约 15.8 GHz，占 50 GHz 频率间隔的 31.6%；文献[1]设计的基于“8”字形光纤谐振腔 MZI 型梳状滤波器的 25 dB 截止带宽约 26.2 GHz，占 50 GHz 频率间隔的 52.4%。与文献[1,3,5,14]比较，本文设计的带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器的输出光谱更接近方波。

### 3.2 耦合比对输出光谱的影响

从式(4)中可以看出，影响梳状滤波器性能的关键因素为耦合器  $DC_0$  和  $DC_1$  的耦合系数  $k_0$  和  $k_1$ ，耦合系数  $k_0$  和  $k_1$  的选取不仅决定了信道间隔度的大小还决定了输出光谱的形状。由于制作器件的实验条件和工艺等因素的限制，导致制作出的耦合器分光比的实际值与理论期望值之间往往存在一定的偏差<sup>[15]</sup>。因此在分析梳状滤波器的输出光谱特性时，讨论耦合器耦合系数的偏差值具有十分重要的意义。

设  $k_i = k_i \pm \Delta k_i (i=0,1)$  为耦合系数的偏差值，取  $\Delta k_0 = \pi/4 \times 5\%$ ， $\Delta k_1 = \pi/0.72 \times 5\%$ ，将  $k_0 = k_0 \pm \Delta k_0$  和  $k_1 = k_1 \pm \Delta k_1$  代入式(1)和式(2)进行数值计算。计算结果如图 5 所示(虚线和实线分别代表本文设计的带自反馈光纤谐振腔的 MZI 型梳状滤波器和文献[5]设计的光纤辅助非平衡 MZI 型梳状滤波器)。

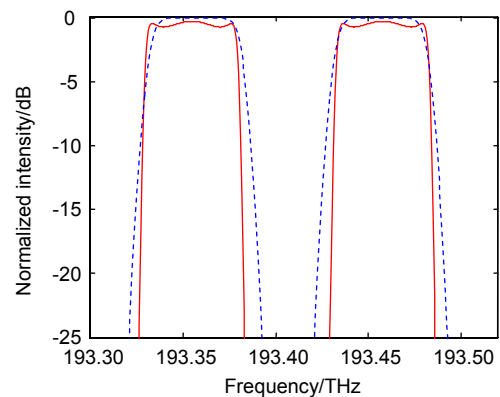


图 4 本文设计的 interleaver (实线)与文献[5]设计的 interleaver (虚线)输出响应的比较图

Fig. 4 Comparison of the responses of proposed interleaver (solid) with interleaver reported in ref.[5] (dot)

从图 5(a)~5(c)的计算结果中可以看出,当耦合器  $DC_0$  和  $DC_1$  的耦合系数  $k_0$  和  $k_1$  中任意一个大于最佳耦合系数时,器件输出谱中截止带带宽和通带带宽基本保持不变,但会有微小旁瓣电平出现,但图 5(b)与图 5(a)和图 5(c)相比其旁瓣电平较大,因此,当耦合器  $DC_0$  的耦合角在  $\pm 5\%$  误差范围内时,输出耦合器  $DC_1$  的耦合系数的最好不要超过最佳耦合系数  $\pi/0.72$ 。图 5(d)的计算结果中可以看出,当耦合器的耦合系数  $k_1$  和  $k_2$  均小于最佳耦合系数时,旁瓣电平减小,但峰值下降明显,因此,耦合器  $DC_0$  和  $DC_1$  的耦合角最好不要同时小于其最佳耦合角。经进一步的计算可知,当耦合器  $k_0$  的误差保持在  $\pm 5\%$  时,  $k_1$  的误差应小于  $5\%$ ,这样可以满足相邻信道隔离度大于  $25\text{ dB}$  的要求。在图 5 中实线代表文献[5]设计的梳状滤波器在同样误差时的计算结果,从图 5 的比较结果中可以看出,在同样误差范围内,本文设计的梳状滤波器具有  $25\text{ dB}$  截止带宽,不仅比文献[5]中设计的梳状滤波器的要宽、输出谱线更加接近方波,且输出光谱的通带平坦度、信道隔离度以及滚降特性等都具有明显优势,抗偏差和容错能力也得到提高。和传统的全光纤 MZI 型梳状

滤波器相比较,本文设计的带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器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。

### 3.3 传输损耗对梳状滤波器输出特性的影响

传统的不对称结构的全光纤 MZI 型梳状滤波器是将光纤谐振环耦合在 MZI 型梳状滤波器的某一个干涉臂上使得梳状滤波器结构上存在不对称性,从而导致光信号通过上下两干涉臂的传输路程相差较大。文献[5]报道的不对称结构的梳状滤波器结构如图 6 所示。从图中可以看出,输入光场从  $E_1$  端口进入经  $3\text{ dB}$  耦合器  $DC_1$  分束后,两束等幅光信号分别进入 MZI 型梳状滤波器的两干涉臂中传输,由于两传输干涉臂长度不相等,所以其中一束光信号经直通的下路干涉臂,直接传输到  $3\text{ dB}$  耦合器  $DC_4$  下输入端,而另一束光信号经由耦合器  $DC_3$ 、 $DC_2$  和  $L_1$ 、 $L_2$  构成的光纤谐振环后进入  $3\text{ dB}$  耦合器  $DC_4$  的上输入端。也有些文献的报道中不包含耦合器  $DC_2$ ,将光纤  $L_1$  和  $L_2$  直接连接在一起构成光纤谐振环,将该环耦合在上干涉臂中

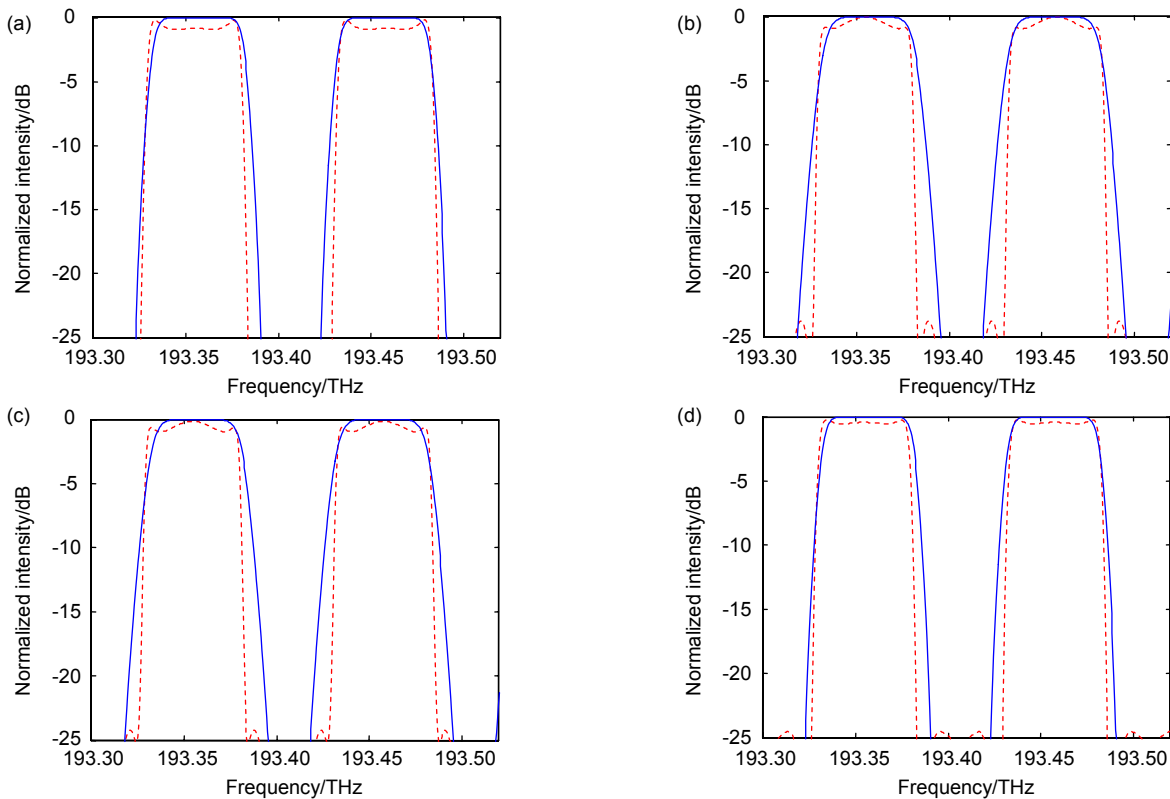


图 5 当 (a)  $k_0=\pi/4+\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72+\Delta k_1$ ; (b)  $k_0=\pi/4-\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72+\Delta k_1$ ; (c)  $k_0=\pi/4+\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72-\Delta k_1$ ; (d)  $k_0=\pi/4-\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72-\Delta k_1$  时, 本设计的 interleaver(虚线)与文献[5] (实线)输出光谱的比较

Fig. 5 Comparison of responses of the proposed interleaver (dotted) with interleaver reported in ref.[5] (solid). (a)  $k_0=\pi/4+\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72+\Delta k_1$ ; (b)  $k_0=\pi/4-\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72+\Delta k_1$ ; (c)  $k_0=\pi/4+\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72-\Delta k_1$ ; (d)  $k_0=\pi/4-\Delta k_0$ ,  $k_1=\pi/0.72-\Delta k_1$

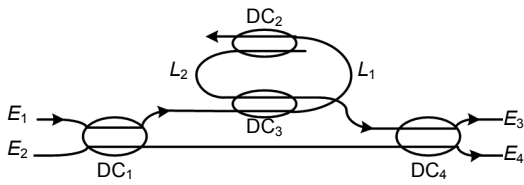


图6 文献[5]报道的不对称梳状滤波器结构示意图  
Fig. 6 Structure of the asymmetrical interleaver reported in ref.[5]

形成不对称MZI型梳状滤波器。根据文献[5]的报道，经耦合器DC<sub>1</sub>分束后的两路光信号在传输过程中，一路光信号经直通干涉臂直接传输至输出耦合器DC<sub>4</sub>；而另一路光信号经由耦合器DC<sub>3</sub>、DC<sub>2</sub>和光纤L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>构成的光纤谐振环后传输至输出耦合器DC<sub>4</sub>。因此，经上路传输的实际光程远远大于下路不含光纤谐振环干涉臂中的实际光程，且经上路传输的光信号在谐振腔内形成类似多束光干涉的效果，使得上干涉臂中的相位产生了新的变化。由于组成光纤谐振腔的光纤会不可避免地出现弯曲，而光纤的弯曲会使传输损耗增大<sup>[11]</sup>，导致到达输出耦合器DC<sub>4</sub>的两束干涉光信号的幅度衰减和时延差距较大，经光纤谐振环传输的上干

涉臂信号的时延和幅度衰减要比直接传输的下干涉臂信号的时延和幅度衰减大许多。由干涉原理可知，当互相干涉的两束光信号的幅度存在较大差异时，会造成输出光谱的消光比下降，导致输出信道隔离度明显降低以及信道间的串话干扰增加<sup>[11]</sup>。

为了分析传输损耗 $\tau$ 对本文设计的带自反馈谐振腔的全光纤MZI型梳状滤波器输出光谱性能的影响，分别取 $\tau=0.9$ 、 $\tau=0.6$ 、 $\tau=0.4$ 并将不同的 $\tau$ 值代入到式(1)和式(2)进行模拟计算，图7是进行模拟计算后的输出光谱图。与没有考虑传输损耗的图3相比，存在传输损耗时的梳状滤波器的峰值下降分别为0.07 dB、0.29 dB、0.47 dB。从图中可以看出，不仅输出谱的峰值下降，而且随着传输损耗的增大信道间隔度也下降，但其阻带抑制均大于25 dB。图6所示的不对称结构的全光纤MZI型梳状滤波器，当归一化传输损耗 $\tau \leq 0.6$ 时，其阻带抑制低于20 dB，致使其输出信道间隔度明显降低、输出消光比恶化<sup>[5]</sup>；当 $\tau \approx 0.4$ 时，谐振波长处的输出功率甚至降为0<sup>[5]</sup>。对这种传统的不对称的全光纤MZI型梳状滤波器在考虑传输损耗时，谐振腔的幅度响应将表现出波长依赖性，在实际使用时对传输损耗采取有源的方式进行补偿<sup>[16]</sup>。与传统的不对称

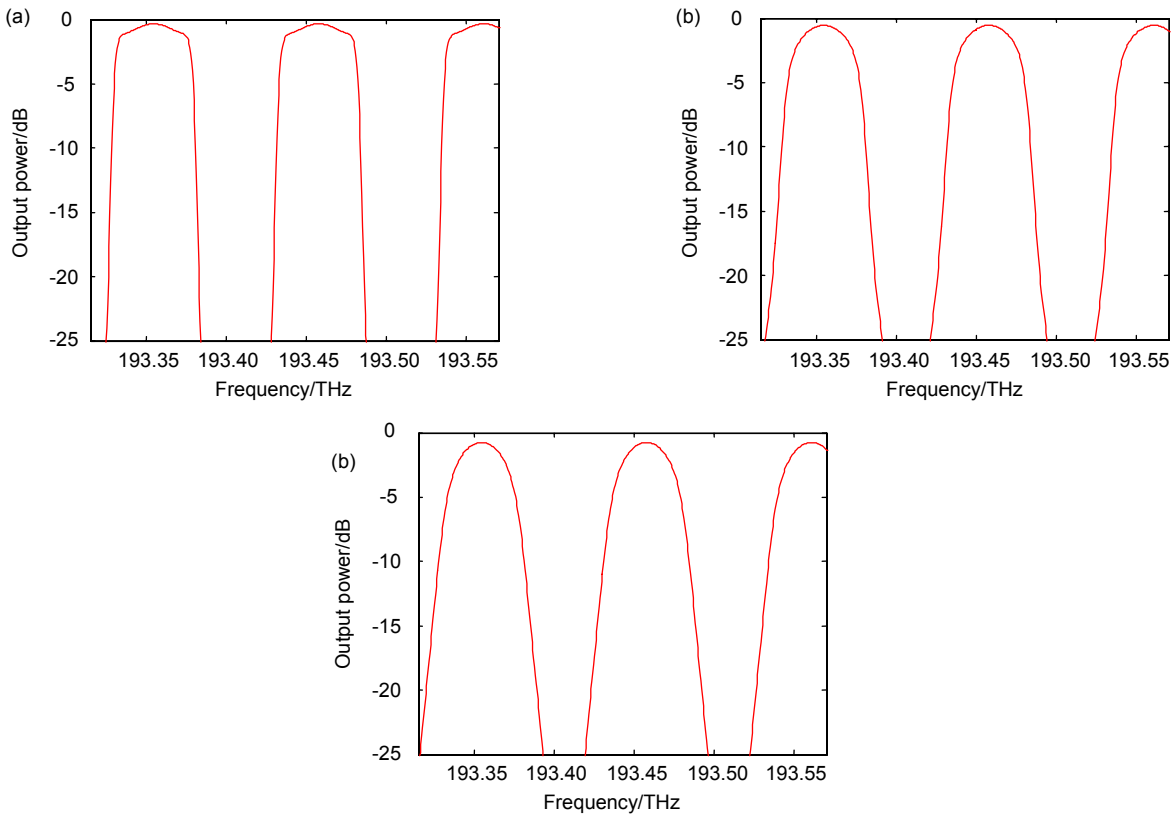


图7 取(a)  $\tau=0.9$ ；(b)  $\tau=0.6$ ；(c)  $\tau=0.4$ 时，本文设计的interleaver输出响应  
Fig. 7 Comparison of the responses of proposed interleaver with (a)  $\tau=0.9$ ；(b)  $\tau=0.6$ ；(c)  $\tau=0.4$

对称结构的全光纤 MZI 型梳状滤波器相比, 本文所设计的带自反馈结构的全光纤 MZI 型梳状滤波器其输出光谱的信道隔离度、阻带抑制以及消光比具有明显的优势。另外结构也更加简单紧凑, 图 6 所示的传统的不对称结构的梳状滤波器需要 4 个光纤耦合器, 文献[3,6,7]等报道的全光纤光学梳状滤波器至少需要 3 个光纤耦合器, 而实验中设计的带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器仅需要 2 个光纤耦合器。

## 4 结 论

本文提出的基于带自反馈光纤谐振腔的全光纤 MZI 型梳状滤波器的构建方案, 其利用自带反馈的光纤谐振腔对光信号引入相位调节, 提高了过渡带的滚降特性和通带响应的平坦度。通过理论分析推导出了其输出表达式, 并对其进行数值模拟计算, 得到了可实现输出谱线具有明显陡峭边缘、形态近似于方波的梳状滤波器的结构参数。分析了耦合器的耦合系数对输出光谱特性的影响, 结果表明, 在同等误差范围内改进后的滤波器的 25 dB 截止带宽、通带平坦度、输出光谱的近似方波性、信道隔离度等性能均优于传统的全光纤 MZI 型梳状滤波器, 而且还提高了抗偏差能力、降低了输出光谱对光纤耦合器耦合系数误差的敏感度。该器件所需的光纤耦合器数目少, 结构简单紧凑、降低了制作难度。另外, 还分析了当传输过程中存在传输损耗时, 本文设计的梳状滤波器与传统的不对称的全光纤 MZI 型梳状滤波器相比, 由于两干涉臂的长度相差不大, 所以两束干涉光信号经干涉臂传输后到达输出耦合器的幅度差异并不明显, 有效地降低了归一化传输损耗对输出光谱消光特性的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Pu H L, Lu H W. Design and experiment study of all-fiber MZI interleaver based on 8-shaped fiber ring resonator[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2015, **26**(2): 239–244.  
蒲会兰, 鲁怀伟. 基于“8”字形光纤谐振环全光纤 MZI 型梳状滤波器的设计与实验研究[J]. *光电子·激光*, 2015, **26**(2): 239–244.
- [2] Dong X W, Pei L, Xu O, 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.
- [3] Zhou G, Zhao C L, Huang Y L, 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.
- [4] Dong X W, Liu M M, Liu W K. Optical pulse repetition rate multiplication and shaping using double-Mach-Zehnder-based ring resonator[J]. *Optik*, 2016, **127**(4): 1720–1723.
- [5] Li W B, Sun J Q. Analysis of characteristics of the interleaver based on a double-coupler resonator[J]. *Chinese Journal of 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.
- [6] Lu H W, Lu Y, Pu H L, et al. Improved designs of all-fiber 3×3 interleaver with flat-topped passband[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(2): 0206003.  
鲁怀伟, 鲁彦, 蒲会兰, 等. 全光纤平顶 3×3 光学梳状滤波器的改进[J]. *光学学报*, 2015, **35**(2): 0206003.
- [7] Lu H W, Wei Y, Yan K J, et al. Design of all-fiber asymmetric interleaver with 3×3 and 2×2 fiber couplers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1106002.  
鲁怀伟, 魏赞, 邬开俊, 等. 基于 3×3 和 2×2 光纤耦合器的全光纤不等带宽梳状滤波器的设计[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 1106002.
- [8] Kang J, Li M C, Dong X Y, et al. Optimization of concatenated long-period fiber grating based M-Z filter[J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2011, **22**(8): 1130–1133.  
康娟, 李孟超, 董新永, 等. 基于级联长周期光纤光栅的 M-Z 滤波器的优化设计[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(8): 1130–1133.
- [9] Zhang B G, Wu X C. Design analysis of flattop all-fiber asymmetric interleaver[J]. *Optics Communications*, 2015, **341**: 194–198.
- [10] Li J, Tong Z R, Meng H Y, 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器的理论研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 41–44.
- [11] Lu H W, Wu K J, Wei Y, et al. Study of all-fiber asymmetric interleaver based on two-stage cascaded Mach-Zehnder Interferometer[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(6): 1118–1122.
- [12] Meng Y C, Tan W H, Huang Z M. 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.
- [13] Wang Q J, Zhang Y, Soh Y C. All-fiber 3×3 interleaver design with flat-top passband[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(1): 168–170.
- [14] 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**(1–6): 241–248.
- [15] Wu Y D, Liu C L, Jhan G Y. All-optical switch based on the local nonlinear plasmonic Mach-Zehnder interferometer waveguides[C]//*Proceedings of the 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD)*, Taipei, Taiwan, 2015: 51–52.
- [16] Li F, Geng C, Li X Y, et al. Phase-locking control in all fiber link based on fiber coupler[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(6): 602–609.  
李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于光纤耦合器的全光纤链路锁相控制[J]. *光电工程*, 2017, **44**(6): 602–609.

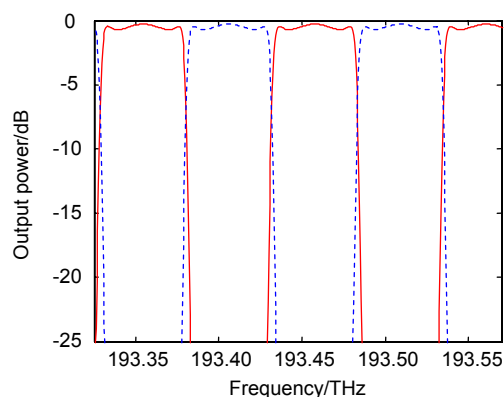
# All-fiber MZI-interleaver with self-feedback fiber resonator

Wei Xiaoming<sup>1</sup>, Lu Huaiwei<sup>2\*</sup>, Yang Qi<sup>2</sup>, Fang Xuexin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

<sup>2</sup>School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730030, China;

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



The calculated transmission spectra of the proposed interleaver using these parameter  $k_0=\pi/4$  and  $k_1=\pi/0.72$

**Overview:** Since the passband shape of the conventional Mach-Zehnder interferometer (MZI)-interleaver is a cosine type. Its peak characteristics and the passband width don't meet the actual needs. In practice, it is easy to generate large insertion loss and crosstalk. The researchers proposed multi-level MZI cascaded all-fiber interleaver and optical fiber resonator-assisted non-equilibrium MZI-interleaver. Both of these proposals can improve response passband flatness. However, the former improvement scheme caused an increase in the total interference arm length of the MZI-interleaver, which will seriously affect the simplicity and performance stability of the all-fiber MZI-interleaver structure, at the same time, increase the practical production difficulties. The latter improvement is to couple the fiber cavity into a certain interference arm of the MZI to form an asymmetric structure of the fiber resonator-assisted unbalanced MZI-interleaver. The fiber cavity is very beneficial for improving the performance of the all-fiber MZI-interleaver. However, this fiber resonator assisted unbalanced MZI-interleaver has a structural asymmetry. The actual optical path of the transmitted signal is much larger than the optical path in the other interfering arm without the optical fiber resonator due to the action of the optical fiber resonator. Obviously, the amplitude of the two optical signals in the two arms will be greatly different when they reach the output coupler due to existence of transmission loss. It can be known from the interference principle that when there are amplitude differences between the two optical signals that interfere with each other, the output spectral extinction characteristics are bound to deteriorate, resulting in a large increase in crosstalk interference between channels. In order to improve the transmission performance of all-fiber MZI, a novel all-fiber MZI-interleaver is proposed and discussed in this paper. An all-fiber MZI-interleaver consisting of a 2×2 fiber coupler and a fiber coupler cascade with a self-feedback fiber cavity is designed, by selecting reasonable coupler parameters and using the phase adjustment effect introduced by the self-feedback fiber resonator. According to its structure, the output expression of the device is deduced by using optical fiber transmission theory and matrix theory, and numerical simulation analysis is performed. The results show that its 25 dB cutoff bandwidth is 46.7 GHz which accounts for 93.4% of the 50 GHz frequency interval. The output spectrum is similar to the square wave output. Compared with the conventional unbalanced MZI type interleaver with an optical fiber resonant ring, the structure is simple and compact, had a certain anti-deviation ability and reduced the number of fiber couplers require to 2, which makes it play an important role in dense wavelength division multiplexing systems in the future.

**Citation:** Wei X M, Lu H W, Yang Q, *et al.* All-fiber MZI-interleaver with self-feedback fiber resonator[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(5): 180315

Supported by Gansu Natural Science Foundation (1508RJZA081)

\* E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn