

文章编号 1004-924X(2013)04-0889-06

## 基于双“8”字型光纤谐振环的全光纤三端口 Interleaver

鲁怀伟\*, 鄢开俊, 罗冠炜

(兰州交通大学 数学与物理学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为改善全光纤三端口 Interleaver 的输出特性,提出了一种基于双“8”字型光纤谐振环的对称结构三端口全光纤 Interleaver。该谐振环由一个一字型  $3 \times 3$  单模光纤耦合器和两个  $2 \times 2$  单模光纤耦合器组成双“8”字型作为输入耦合器,而一个品字型  $3 \times 3$  单模光纤耦合器作为输出耦合器。理论和实验分析了该波长交错器的输出特性,结果表明:与两级级联马赫-曾德尔干涉仪型(TCMZI)全光纤三端口 Interleaver 相比,其输出波形通带更加平坦,通带和阻带加宽,信道间功率旁瓣降低了约 24 dB。通过实验用光纤熔融拉锥法制作了该器件,结果显示实验结果与理论分析吻合得很好,实验样品的信道间旁瓣值小于  $-30$  dB,信道隔离度大于 30 dB。

**关键词:** 光纤光学; 光纤耦合器; Interleaver; 环形谐振环

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132104.0889

## All-fiber three-channel interleaver based on dual-8-shaped ring resonator

LU Huai-wei\*, WU Kai-jun, LUO Guan-wei

(School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

\* Corresponding author, E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

**Abstract:** In order to improve the transmission performance of all-fiber three-channel interleavers, an all-fiber three-channel interleaver was developed by using a new configuration of dual-8-shaped ring resonator. The ring was composed of a planar  $3 \times 3$  single mode fiber coupler and two  $2 \times 2$  fiber couplers and was used as an input device. Furthermore, a regular triangle  $3 \times 3$  fiber coupler was used as output device. The propagation properties of the three-channel interleaver were studied experimentally and theoretically. Obtained result indicates that the sidelobe level of channel of the proposed device is reduced by more than 24 dB and the crosstalk characteristics, channel isolation, the bandwidth of passband/stopband, the rolloff in transition band and the coupling-coefficient tolerance have been improved greatly in comparison with that of the convention all-fiber three-channel interleaver based on a two-stage cascaded Mach-Zehnder interferometer(TCMZI). This kind of interleaver was fabricated with a fused biconical taper technics in an experiment. The experimental results are in good agreement with the analytical ones and it shows that the measured sidelobe level is about  $-30$  dB and the channel isolation is higher than 30 dB.

**Key words:** fiber optics; optical fiber coupler; optical interleaver; ring resonator

收稿日期:2012-12-28;修订日期:2013-02-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10972095);甘肃省自然科学基金资助项目(No. 1208RJZA256)

## 1 引言

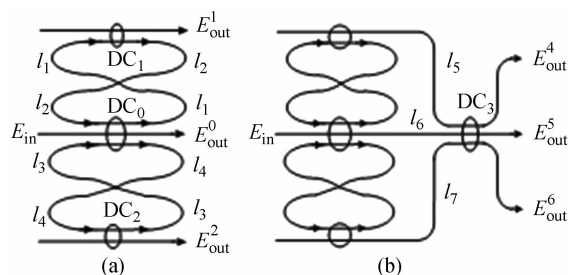
波分复用技术是光纤通信中增加通信容量的一种重要技术手段,特别是近年来提出和应用的密集波分复用技术,不仅大大提高了光纤网的通信容量,而且开拓了许多单波长通信所完全不具备的功能,从而为网络设计提供了极大的灵活性。作为波分复用技术中的关键器件之一,Interleaver 的研究近年来也取得了很大的进展,人们提出了各种各样的技术方案<sup>[1-4]</sup>。在众多方案中,全光纤 Interleaver 以其插入损耗小,与光纤的兼容性好,具有梳状滤波特性等优点,在光纤通信波分复用系统中有着重要的应用价值。目前,全光纤 Interleaver 大都是二端口器件<sup>[5-8]</sup>,而全光纤三端口 Interleaver 报道的并不多,且设计的 Interleaver 结构大都基于单级马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)<sup>[9-10]</sup>和两级 MZI 级联(TCMZI)<sup>[11]</sup>。分析发现,基于这种简单 MZI 结构的 Interleaver 输出波形的顶端平坦度、阻带带宽和通带带宽等不是十分理想,而且输出信道间的旁瓣值比较大。信道间旁瓣值的大小和串扰有关,会影响全光纤三端口 Interleaver 的实用价值。

本文提出了一种基于对称结构的双光纤谐振环型 Interleaver。分析结果表明:基于该结构的 Interleaver 可以实现近似于方波的透射率,和三端口 TCMZI-interleaver 相比,其信道间功率旁瓣被大大减小,串扰特性、信道隔离度、阻带抑制和过渡带滚降等特性得到了明显改善。

## 2 结构分析

双“8”字型光纤谐振环的结构如图 1(a)所示,它由一个一字型  $3 \times 3$  光纤耦合器  $DC_0$  和两个  $2 \times 2$  耦合器  $DC_1, DC_2$ 。  $DC_1, DC_2$  和  $DC_0$  分别用光纤  $l_1, l_2, l_3$  和  $l_4$  连接起来。组成“8”字型光纤谐振环的光纤  $l_1$  和  $l_2$  ( $l_3$  和  $l_4$ ) 互为独立通道,它们之间没有交叉连接点,信号在  $l_1$  和  $l_2$  ( $l_3$  和  $l_4$ ) 之间互相独立传输。

由图 1(a)可以看出,双“8”字型光纤谐振环是一个  $3 \times 3$  光纤无源器件。假设输入光场  $E_{in}$  从  $DC_0$  的中间端口输入,利用光纤耦合理论<sup>[12-13]</sup>,可



(a) 双 8 字型光纤谐振环的结构  
(b) 基于双 8 字型光纤谐振环的三信道 interleaver 结构  
(a) Dual-8-shaped ring resonator  
(b) All-fiber  $3 \times 3$  interleaver based on dual-8-shaped ring resonator

图 1 光纤谐振环

Fig. 1 Schematic diagram of ring resonators

得出其输出光场  $E_{out}^j$  ( $j=0,1,2$ ) 与输入光场  $E_{in}$  之间的关系,为:

$$\begin{cases} \frac{E_{out}^1}{E_{in}} = \frac{\sqrt{2}e^{i\beta_2}(1-e^{-i\beta_2}\cos k_2)}{AA} \sin k_0 \sin k_1 \\ \frac{E_{out}^0}{E_{in}} = 1 - \frac{4(1-\cos k_2 e^{-i\beta_2}\cos k_1)}{AA} \sin^2(k_0/2) \\ \frac{E_{out}^2}{E_{in}} = \frac{\sqrt{2}e^{i\beta_3}(1-\cos k_1 e^{-i\beta_1})}{AA} \sin k_0 \sin k_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $AA=2[1+\cos k_0 \cos k_1 \cos k_2 \exp(-i\beta L) - \cos^2(k_0/2)(\cos k_1 \exp(-i\beta L_1) + \cos k_2 \exp(-i\beta L_2))]$ ,  $k_j$  是耦合器  $DC_j$  的耦合系数,  $\beta=2\pi n_{eff}/\lambda$  是光纤传播常数,  $n_{eff}$  是光纤的有效折射率,  $L_1=l_1+l_2$ ,  $L_2=l_3+l_4$ ,  $L=L_1+L_2$ 。

将该光纤环作为输入器件,另取一品字型  $3 \times 3$  光纤耦合器  $DC_3$  作为输出器件,二者用光纤  $l_5, l_6$  和  $l_7$  连接构成一三端口全光纤 Interleaver。假设整个器件的输出光场为  $E_{out}^j$  ( $j=4,5,6$ ),如图 1(b)所示,则  $E_{out}^j$  可以由以下传输矩阵表示:<sup>[13]</sup>

$$\begin{bmatrix} E_{out}^4 \\ E_{out}^5 \\ E_{out}^6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & \xi & \xi \\ \xi & \gamma & \xi \\ \xi & \xi & \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\theta+\varphi} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{out}^1 \\ E_{out}^0 \\ E_{out}^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中:  $\gamma=[\exp(2ik_3)+2\exp(-ik_3)]/3$ ,  $\xi=[\exp(2ik_3)-\exp(-ik_3)]/3$ ;  $k_3$  是品字型  $3 \times 3$  光纤耦合器  $DC_3$  的耦合系数;  $\theta=\beta\Delta L$ ,  $\Delta L(\Delta L=l_6-l_5=-(l_6-l_7))$ ;  $\varphi$  是待定的调节相位差。

为了使器件在 3 个输出端口具有相同的输出波形,取耦合器  $DC_1$  和  $DC_2$  的耦合系数  $k_1=k_2=k$ 。参照文献<sup>[11]</sup>的设计方法,双“8”字形光纤谐

振环的光纤臂长满足  $3\theta(3\theta = \beta L_1 = \beta L_2)$ , 则器件的归一化输出光场  $E_{\text{out}}^i/E_{\text{in}}$ :

$$\begin{cases} \frac{E_{\text{out}}^1}{E_{\text{in}}} = \frac{1}{3C} [2\cos(k_0)(C_1 + iC_2) - 2\cos(k)(C_1 + iC_2)e^{-i3\theta} + \sqrt{2}\sin(k)\sin(k_0)((C_1 + iC_2)e^{-i2\theta} + (C_3 + iC_4)e^{-i\theta - \varphi})] \\ \frac{E_{\text{out}}^5}{E_{\text{in}}} = \frac{1}{3C} [2\cos(k_0)(C_3 + iC_4) - 2\cos(k)(C_3 + iC_4)e^{-i3\theta} + \sqrt{2}\sin(k)\sin(k_0)((C_1 + iC_2)(e^{-i2\theta} + e^{-i\theta - \varphi}))] \\ \frac{E_{\text{out}}^6}{E_{\text{in}}} = \frac{1}{3C} [2\cos(k_0)(C_1 + iC_2) - 2\cos(k)(C_1 + iC_2)e^{-i3\theta} + \sqrt{2}\sin(k)\sin(k_0)((C_3 + iC_4)e^{-i2\theta} + (C_1 + iC_2)e^{-i\theta - \varphi})] \end{cases}, \quad (3)$$

其中:  $C = 2(1 - \cos k \cos k_0 \exp(-i3\theta))$ ,  $C_1 = \cos 2k_3 - \cos k_3$ ,  $C_2 = \sin 2k_3 + \sin k_3$ ,  $C_3 = \cos 2k_3 + 2\cos k_3$ ,  $C_4 = \sin 2k_3 - 2\sin k_3$ 。假设器件的归一化输出光强分别为:  $P_1(\theta) = |E_{\text{out}}^1/E_{\text{in}}|^2$ ,  $P_2(\theta) = |E_{\text{out}}^5/E_{\text{in}}|^2$ ,  $P_3(\theta) = |E_{\text{out}}^6/E_{\text{in}}|^2$ , 3 个输出端口的输出波形相同是 Interleaver 的基本要求, 因此,  $P_1(\theta)$ ,  $P_2(\theta)$  和  $P_3(\theta)$  需满足方程:

$$P_1(\theta) = P_2(\theta - \frac{2\pi}{3}) = P_3(\theta - \frac{4\pi}{3}). \quad (4)$$

取  $(C_3 + iC_4) \exp(i2\pi/3) = C_1 + iC_2$ . 并将此关系带入到式(3), 可得:

$$\frac{E_{\text{out}}^1(\theta)}{E_{\text{in}}} = e^{i\frac{2\pi}{3}} \frac{E_{\text{out}}^5(\theta - \frac{2\pi}{3})}{E_{\text{in}}} = \frac{E_{\text{out}}^6(\theta - \frac{4\pi}{3})}{E_{\text{in}}}. \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 如果取  $k_3$  使其满足  $(C_3 + iC_4) \exp(i2\pi/3) = C_1 + iC_2$ , 则 3 个输出端口的输出波形相同。进一步解等式  $(C_3 + iC_4) \exp(i2\pi/3) = C_1 + iC_2$ , 可得出: 当  $k_3 = 2\pi/9$  时,  $(C_3 + iC_4) \exp(i2\pi/3) = C_1 + iC_2$  成立。也就是说, 当输出耦合器 DC<sub>3</sub> 的分光比为 1:1:1 时, 器件的 3 个输出端口可以得到相同的输出波形。

由于 3 个输出通道具有相同的输出波形, 因此只针对其中一个信道来进行器件输出波形的平顶、宽通带宽度和宽阻带宽度以及信道隔离度的研究, 如  $P_2(\theta)$ 。前面已经证明信道相互之间有  $2\pi/3$  的周期间隔, 因此,  $P_2(\theta)$  的通带和阻带为二阶平面函数,  $P_2(\theta)$  的一阶、二阶和三阶导数在频域范围内任一点上不可能同时为零。基于上述分析, 为了最大化输出波形的平顶效应, 应该使  $P_2(\theta)$  满足  $dP_2(\theta)/d\theta|_{\theta=\Omega} = 0$  和  $d^2P_2(\theta)/d^2\theta|_{\theta=\Omega} = 0$ ; 为了最大程度地降低插入损耗, 应使  $P_2(\theta)|_{\theta=\Omega}$  为最大值。Ω 是考虑到 Interleaver 输出波形在  $2\pi/3$  和  $4\pi/3$  存在一定的不对称性而引入的设计参数, 是在频域范围内信道中心波长的一个

微小偏差量。因此, 三端口 Interleaver 的设计就可以归结为联解方程:

$$\left. \frac{dP_2(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\Omega} = 0, \left. \frac{d^2P_2(\theta)}{d^2\theta} \right|_{\theta=\Omega} = 0, \max\{P_2(\theta)|_{\theta=\Omega}\}. \quad (6)$$

解方程组(6)是一约束优化问题, 利用 Matlab 优化工具对式(6)求解, 得到的优化参数为:  $\varphi = -\pi/3$  和  $k_1 = k_2 = k_0 = 2\pi/5$ 。结合前面得到的  $k_3 = 2\pi/9$ , 模拟计算的输出结果如图 2 所示。

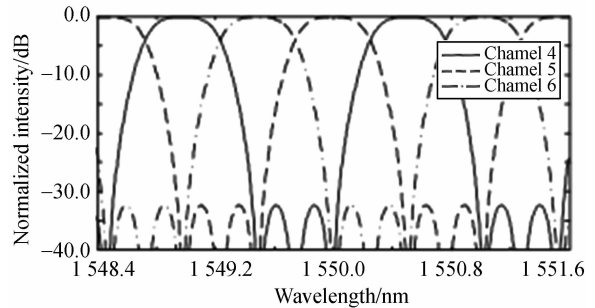


图 2 当  $k = k_0 = 2\pi/5$  时, Interleaver 的输出光谱图  
Fig. 2 Spectral responses of interleaver with  $k = k_0 = 2\pi/5$

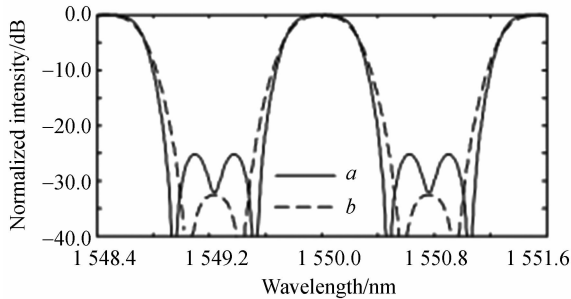
在模拟计算中, 光纤的纤芯折射率  $n_{\text{eff}} = 1.457$ , 传输中心波长  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , 同时选取  $\Delta l$ , 使  $P_1(\theta)$ ,  $P_2(\theta)$  和  $P_3(\theta)$  的输出周期满足  $50 \text{ GHz}$ 。

从图 2 可以看出:  $P_1(\theta)$ ,  $P_2(\theta)$  和  $P_3(\theta)$  产生了陡峭边缘, 近似于方波的曲线, 过渡带的滚降特性明显加强。经过计算可以得到,  $0.5 \text{ dB}$  通带带宽约为  $26 \text{ GHz}$ ,  $25 \text{ dB}$  截止带带宽约为  $38 \text{ GHz}$ 。和 TCMZI-interleaver 相比,  $0.5 \text{ dB}$  通带带宽增加了约  $15 \text{ GHz}$ , 输出信道间的旁瓣值约降低了  $24 \text{ dB}$ , 而且 TCMZI-interleaver 已不存在  $25 \text{ dB}$  截止带宽。由此可以看出, 本文设计的新结构 interleaver 具有更宽的  $0.5 \text{ dB}$  通带带宽和  $25 \text{ dB}$  截止带宽。

### 3 耦合比对输出光谱的影响

耦合器的耦合系数和分光比的关系决定着器件输出谱的形状和信道隔离度的大小。由于制作工艺以及实验条件等因素的限制,光纤耦合器分光比的实际值与期望值之间往往有一定的偏差,因此讨论耦合器的耦合系数偏差对 Interleaver 输出光谱的影响是十分必要的。

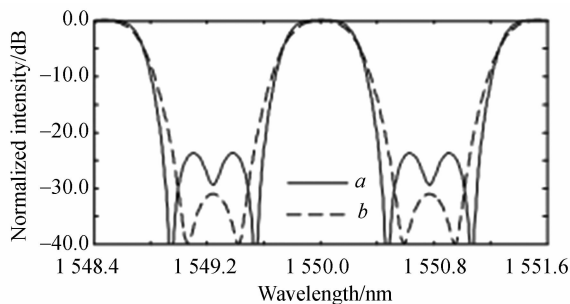
设  $\Delta k$  为耦合系数的偏差值,取  $\Delta k = k \times 10\%$ ,图(3)~图(5)是分别取  $k_0 = k \pm \Delta k, k_1 = k \pm \Delta k$  时 Interleaver 的输出光谱图。



$$a: k_0 = 2\pi/5, k = 2\pi/5 - \Delta k \quad b: k_0 = 2\pi/5, k = 2\pi/5 + \Delta k$$

图 3 当  $k_0 = 2\pi/5, k = 2\pi/5 \pm \Delta k$  时, Interleaver 的输出光谱图

Fig. 3 Spectral responses of interleaver with  $k_0 = 2\pi/5$  and  $k = 2\pi/5 \pm \Delta k$

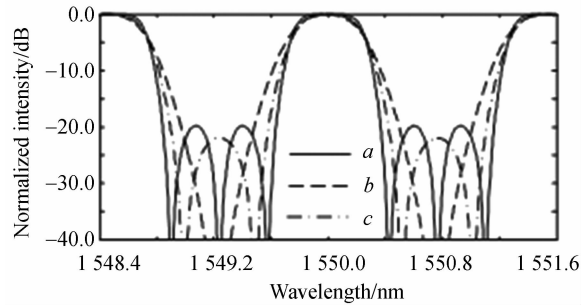


$$a: k = 2\pi/5, k_0 = 2\pi/5 - \Delta k \quad b: k = 2\pi/5, k_0 = 2\pi/5 + \Delta k$$

图 4 当  $k = 2\pi/5, k_0 = 2\pi/5 \pm \Delta k$  时, Interleaver 的输出光谱图

Fig. 4 Spectral responses of interleaver with  $k = 2\pi/5$  and  $k_0 = 2\pi/5 \pm \Delta k$

从图 3 和图 4 可以看出,当  $k = 2\pi/5, k_0 = 2\pi/5 \pm \Delta k$  或者  $k = 2\pi/5 \pm \Delta k, k_0 = 2\pi/5$  时,虽然信道隔离度、0.5 dB 通带宽度、25 dB 阻带宽度等和图 2 相比有所下降,但下降不是十分明显,其信道隔离度仍然高于 20 dB。



$$a: k_0 = 2\pi/5 - \Delta k, k = 2\pi/5 - \Delta k \quad b: k_0 = 2\pi/5 + \Delta k, k = 2\pi/5 + \Delta k \quad c: k_0 = 2\pi/5 - \Delta k, k = 2\pi/5 + \Delta k \text{ or } k_0 = 2\pi/5 + \Delta k, k = 2\pi/5 - \Delta k$$

图 5 当  $k = 2\pi/5 \pm \Delta k, k_0 = 2\pi/5 \pm \Delta k$  时, Interleaver 的输出光谱图

Fig. 5 Spectral responses of interleaver with  $k = 2\pi/5 \pm \Delta k$  and  $k_0 = 2\pi/5 \pm \Delta k$

从图 5 的计算结果可以看出,当  $k_0$  和  $k$  同时大于  $2\pi/5$ ,即  $k_0 = 2\pi/5 + \Delta k, k = 2\pi/5 + \Delta k$  时,0.5 dB 通带带宽和 25 dB 截止带带宽明显变窄,其输出波形接近余弦。因此,在控制光纤耦合器时,应尽可能地避免光纤耦合器  $DC_0, DC_1, DC_2$  的耦合系数同时大于  $2\pi/5$ 。

综上所述,在保证输出耦合器  $DC_2$  分光比为 1:1:1 的前提下,光纤耦合器  $DC_0 \sim DC_2$  的耦合系数  $k_0 \sim k_2$  只要不同时大于  $2\pi/5$ ,在  $\Delta k$  的误差范围内,该结构的 Interleaver 均可以得到比较理想的输出光谱和带宽。这说明该结构的全光纤三端口 Interleaver 具有较强的抗偏差能力,在一定程度上降低了实际制作的难度。

### 4 实验及其结果

Interleaver 的基本原理是光的干涉。对于全光纤 Interleaver 来说,一般应有输入耦合器和输出耦合器,输入耦合器的作用为光束分配,输出耦合器的作用为光束干涉。在实际制作过程中,由于光纤熔接会引入波导的不连续性,对插入损耗和光波偏振态产生不可预期的影响,所以不能单独控制好光纤耦合器再熔接。输入耦合器和输出耦合器必须采用不间断连续熔融拉锥的方法在同一根光纤上拉制,这就为全光纤 Interleaver 的制作带来了一定的难度。在熔融拉锥一个耦合器的过程中,利用监测光功率的变化来控制其耦合长度,以准确控制耦合器的分光比。但利用该方法

只能用于制作全光纤 Interleaver 第一个耦合器;而在熔拉第二个光纤耦合器时,由于监视光通过第一个耦合器后,经光纤传输到第二个耦合器时已变为相干光,此时的监视光就会在第二个耦合器产生干涉,所以,熔拉第二个耦合器时不能用监测光功率变化的方法来控制其耦合长度,只能凭经验熔拉或者利用计算机来控制熔拉过程。

从前面的分析得知,输出耦合器  $DC_3$  的分光比为  $1:1:1$  是保证 Interleaver 3 个输出信道具有相同输出波形以及信道间的相位差为  $2\pi/3$  的基本条件, $DC_3$  的分光比是否准确是制作器件的关键。因此,为了保证  $DC_3$  的分光比尽量接近理想值  $1:1:1$ ,采用光监视法首先制作了输出耦合器  $DC_3$ 。在完成耦合器  $DC_3$  的制作后,参照文献[11,14-15]的方法,对光纤干涉臂进行初步设置,然后对耦合器  $DC_0 \sim DC_2$  进行熔融拉锥。目前,由课题组设计的光纤拉锥机控制光纤耦合器的全部过程已实现计算机控制,自动化程度很高,所制作器件的性能具有很高的重复率和成功率。所以,耦合器  $DC_0 \sim DC_2$  的实际分光比与理论预期值的差距可以控制在很小的范围内,现可将误差控制在  $\pm 8\%$  的范围内。在光纤耦合器熔融拉锥完毕后,再次利用文献[11,14-15]的方法对光纤干涉臂进行精密微调。

本文对制作的实验样品进行了性能测试。采用谱线 C 波段高平坦的稳定掺 Er 光纤(Er-doped Fiber, EDF)超荧光光纤光源作为输入光源,在 3 个输出端口分别用自行研制开发的光功率数据

采集器获取输出信号,光功率数据采集器直接与计算机连接,输出光谱如图 6 所示。由图可以看出,中心波长符合 ITU 规定,图 6 的实验谱线和图 2 的理论谱线非常接近,信道隔离度  $> 30$  dB。

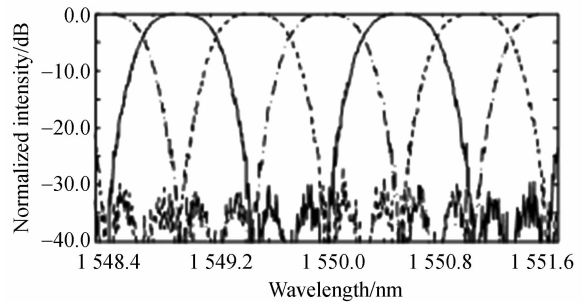


图 6 三端口全光纤 interleaver 输出光谱的测量值  
Fig. 6 Measured spectral responses of three-output all fiber interleaver

## 5 结 论

本文通过理论推导,证明了合理选择参数可使基于对称结构的双光纤谐振环型 Interleaver 的透射率光谱实现近似于方波形态的输出,并选取理论优化计算得到的数据进行了实验。理论和实验研究结果表明:所设计的 Interleaver 具有输出波形通带平坦、阻带加宽、三端口均匀对称等优点。和级联型全光纤三端口 Interleaver 相比,其信道间功率旁瓣被大大减小、阻带抑制和过渡带滚降等特性明显加强。

## 参考文献:

- [1] 章宝歌,李碧琦,鲁彦. 非对称马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽光学梳状滤波器[J]. 光学精密工程, 2010,18(10): 2150-2155.  
ZHANG B G, LI B Q, LU Y. Asymmetric Mach-Zehnder interleaver with different output spectral bandwidths[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (10):2150-2155. (in Chinese)
- [2] 鲁怀伟,章宝歌,罗冠炜. 基于  $3 \times 3$  和  $2 \times 2$  光纤耦合器梳状滤波器的研究[J]. 光学精密工程, 2006, 17(4):401-405.  
LU H W, ZHANG B G, LUO G W. Study on all-fiber comb-filter based on  $2 \times 2$  and  $3 \times 3$  single mode coupler[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 17 (4):401-405. (in Chinese)
- [3] 王秀琳,张宇,黄文财,等. 基于复合型耦合器的新型透射式 GT 交错复用器及色散补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2010,47(7):070602-1-070602-8.  
WANG X L, ZHANG Y, HUANG W C, et al.. Novel transmissive gires-tournois interleaver based on composite coupler and its dispersion compensation [J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2010,47 (7):070602-1-070602-8. (in Chinese)
- [4] LU H W. Study of a novel symmetrical interleaver with a  $2 \times 2$  ring resonator [J]. *Opt. Eng.*, 2012, 51(11):115007-1-115007-5.
- [5] 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.
- [6] LI W B, SUN J Q. Characteristic analysis on an interleaver with a fiber loop resonator by using a signal flow graph method[J]. *Opt. Appl.*, 2008, 38: 503-510.
- [7] WANG Q, HE S L. Optimal design of planar wavelength circuits based on Mach-Zehnder interferometers and their cascaded forms [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, 23(3):1284-1290.
- [8] KOK S W, ZHANG Y, WEN C Y, *et al.*. Design of all fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples [J]. *Opt. Commun.*, 2003, 226:241-248.
- [9] REN E E, LU H W, ZHANG B G, *et al.*. Optimization design of all-fiber  $3 \times 3$  multiplexer based on an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer [J]. *Opt. Commun.*, 2009, 282: 2818-2822.
- [10] 姚寿铨, 王子华. 用三干涉臂马赫-曾德尔干涉仪制成的光纤密集型波分复用器[J]. *光学学报*, 2000, 20(7):952-956.
- YAO SH Q, WANG Z H. A dense-wavelength-dimension-multiplexer by using a three arm Mach-Zehnder interferometer [J]. *Acta Optica Sinica.*, 2000, 20(7):952-956. (in Chinese)
- [11] WANG Q J, ZHANG Y, SOH Y C. All-fiber  $3 \times 3$  interleaver design with flat-top passband [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(1): 168-170.
- [12] SONG J F, FANG Q, TAO S H, *et al.*. Kwong, proposed silicon wire interleaver structure [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(11):7849-7859.
- [13] CHEW Y H, TJHUNG T T, MENDIS F V C. Performance of single and double-ring resonators using  $3 \times 3$  optical fiber coupler [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, 11(12):1998-2008.
- [14] WANG Q J, LIU T, SOH Y C, *et al.*. All-fiber F3T interleaver design with specified performance parameters [J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(11):3172-3178.
- [15] LU H W, ZHANG B G, LI M Z, *et al.*. A novel all-fiber optical interleaver with flat-top passband [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(13): 1469-1471.

#### 作者简介:



鲁怀伟(1959—),男,甘肃天水人,教授,1982年于电子科技大学获得硕士学位,主要从事光纤通信以及光纤无源器件等方面的研究工作。E-mail: lu-hw@mail.lzjtu.cn



罗冠炜(1963—),男,湖南双峰人,教授,1998年于西南交通大学获得博士学位,主要从事智能控制等方面的研究工作。E-mail: luogw@mail.lzjtu.cn



邬开俊(1978—),男,山东莒南人,副教授,2007年于兰州交通大学获得硕士学位,主要从事神经网络、数值计算、混沌控制等方面的研究工作。E-mail: wkj@mail.lzjtu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)