

文章编号: 0253-2239(2010)08-2406-06

级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽 交错滤波器的设计

鲁怀伟¹ 章宝歌² 邬开俊¹ 魏 贇¹ 罗冠炜¹

(¹ 兰州交通大学数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070; ² 兰州交通大学电气与自动化学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要 为了在 10 Gb/s+40 Gb/s 混合系统中提高光学奇偶交错滤波器的带宽利用率,提出了基于两级级联马赫-曾德尔干涉仪(MZI)的全光纤型不等带宽光学交错滤波器的设计方案。通过对耦合器分光比、干涉仪臂长差等结构参数的选择,详细分析了两级级联 MZI 的不等带宽交错滤波器的传输特性,并选取了理论优化计算的一组数据进行实验。数值分析和实验结果表明,该器件将 50 GHz 的输入信号分离成信道间隔为 100 GHz 的奇偶两路输出信号,其中在 3 dB 处,奇数信道带宽大于 30 GHz 用于 10 Gb/s 传输,偶数信道带宽大于 60 GHz 用于 40 Gb/s 传输。该滤波器较传统的等带宽交错滤波器有更高的带宽利用率,在 10 Gb/s 向 10 Gb/s+40 Gb/s 升级过程中作为复用/解复用器具有很大优势。

关键词 光学器件;不等带宽交错滤波器;滤波器;波分复用;马赫-曾德尔干涉仪;不等带宽

中图分类号 TN253;TN929.11 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2406

Design of All-Fiber Interleaver with Unequal Passband Based on Cascaded Mach-Zehnder Interferometer

Lu Huaiwei¹ Zhang Baoge² Wu Kaijun¹ Wei Yun¹ Luo Guanwei¹

(¹ School of Mathematics, Physics and Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)
(² School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract To improve the utilization efficiency of interleaver bandwidth in 10 Gb/s plus 40 Gb/s hybrid system, an all-fiber asymmetric bandwidth optical interleaver based on a cascaded Mach-Zehnder interferometer is proposed and discussed. Influences on its transmission characteristics by such factors as splitting ratio of the coupler of the directional fiber couplers and the physical length differences of the interferometer arms are numerically analyzed in detail. The preference condition of the interleaver which meets the maximal isolation and the characteristic of the output spectrum is obtained. One set of optimized data is validated in the experimental result. The results of numerical simulation and experiments show that all-fiber optical interleaver with -3 dB passband in odd channels and even channels could be obtained, which have more than 60 GHz passband and 30 GHz passband, for transmission speed of 40 Gb/s and 10 Gb/s, respectively. Experimental results are in good agreement with the simulation results. Comparing with the conventional interleaver with uniform bandwidth channel, the kind of interleaver with higher bandwidth utilization efficiency has more advantages as multiplexer/demultiplexer during upgrade from 10 Gb/s to 10 Gb/s+40 Gb/s.

Key words optical devices; asymmetric bandwidth interleaver; filter; wavelength division multiplexing; Mach-Zehnder interferometer; asymmetrical bandwidth

1 引 言

光学奇偶交错滤波器是将一路波长光信号分成

两路,一路包含奇数信道波长,另一路包含偶数信道波长,信道间隔变为原来的两倍,由此可以有效地增

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(10972095)和甘肃省自然科学基金(0803RJZA027)资助课题。

作者简介: 鲁怀伟(1959—),男,硕士,教授,主要从事光纤通信以及光纤无源器件等方面的研究。

E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

加光纤上复用的信道数^[1]。现有的光学交错滤波器的实现方案有：阵列波导光栅型、利用偏振光干涉的晶体双折射型、偏振光干涉仪型和光纤熔锥非平衡马赫-曾德尔(MZI)型等^[2~10]。光学交错滤波器有等带宽输出器件和不等带宽输出器件，等带宽器件只能用于一种速率的传输；而不等带宽器件重新分配了两路输出带宽，可同时用于两种不同传输速率的系统，比传统的等信道带宽交错滤波器具有更高的带宽利用率和更大的灵活性。在实用的系统中，最佳带宽 Δf 和传输速率 v 存在近似关系： $\Delta f \geq 1.5v$ 。对传输速率 v 为10 Gb/s和40 Gb/s的系统，信道带宽应分别达到15 GHz和60 GHz。已见报道的不等带宽光学交错滤波器主要有迈克耳孙、Gires-Tournois干涉型(MGTD)、耦合器级联型和双折射光纤环境型等方案^[11~14]。

随着光纤熔融拉锥技术的成熟，基于全光纤的MZI由于具有结构简单、制作成本低、插入损耗低、与光纤系统兼容性强、良好的信道均匀性、偏振相关性和色散特性以及具有梳状滤波特性等优点而在波分复用光纤通信系统和光纤传感系统中有着重要的应用^[9]。

熔融型两级级联全光纤MZI在等带宽光学交错滤波器方面的应用报道较为多见^[6,7]，但应用在不等带宽光学交错滤波器方面的并不多见。本文通过理论分析和模拟计算，合理设计两级级联全光纤MZI的结构参数，实现了不等带宽交错滤波器。

2 结 构

两级级联MZI型全光纤干涉仪的结构如图1所示。

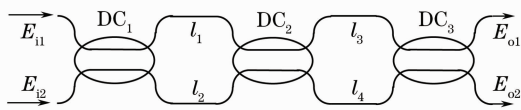


图1 全光纤不等带宽交错滤波器结构示意图

Fig. 1 Structure of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver

它由三个耦合器 DC_1 、 DC_2 和 DC_3 组成，光纤干涉臂 l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 将 DC_1 、 DC_2 和 DC_3 联接在一起，形成一个级联MZI。耦合器的分光比以及干涉臂的臂长差都是与带宽有关的项，因此，适当选取这些参数可以实现不等带宽传输。

假设两个干涉臂长差 $(l_2 - l_1)$ 和 $(l_4 - l_3)$ 相等，输入光场 E_i (E_{i1} 或 E_{i2})从耦合器 DC_1 上端端口输入

($E_{i1}=1, E_{i2}=0$)。定义从 E_{o1} 端和 E_{o2} 端输出的归一化输出光强为 $T_1(\theta)=P_1/P_i$ 和 $T_2(\theta)=P_2/P_i$ ，根据光纤定向耦合器的传输矩阵及光纤段的传输矩阵，可以得出输出光强的表达式为

$$\begin{cases} T_1(\theta) = a_0 + a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta \\ T_2(\theta) = b_0 + b_1 \cos \theta + b_2 \cos 2\theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中

$$a_1 = 2^{-1} \sin 2K_2 \sin(2K_1 + 2K_3) = -b_1,$$

$$a_2 = 2^{-1} \sin 2K_1 \cos^2 K_2 \sin 2K_3 = -b_2,$$

$$a_0 = -2^{-1} [\sin 2K_1 \sin^2 K_2 \sin 2K_3 - 1 + \cos 2K_1 \cos 2K_2 \cos 2K_3],$$

$$b_0 = 2^{-1} [\sin 2K_1 \sin^2 K_2 \sin 2K_3 + 1 + \cos 2K_1 \cos 2K_2 \cos 2K_3],$$

式中 $\theta = \beta(l_2 - l_1)/2 = \beta(l_4 - l_3)/2 = \beta\Delta l$ ， β 是光纤传播常数， $\cos^2 K_i$ ($i=1,2,3$) 分别是三个耦合器的分光比， K_i 等于第 i 个耦合器的耦合角，一般情况下 K_i 是传输波长的函数。 θ 决定输出光的波分复用间隔， $a_0 \sim a_2$ 和 $b_0 \sim b_2$ 共同决定输出波形，共包含3个未知数，即3个耦合器的耦合比。

$T_1(\theta)$ 和 $T_2(\theta)$ 分别对 θ 进行求导，其一阶导数 $T'_1(\theta)$ 和 $T'_2(\theta)$ 为

$$\begin{cases} T'_1(\theta) = -\sin \theta (a_1 + 4a_2 \cos \theta) \\ T'_2(\theta) = -\sin \theta (b_1 + 4b_2 \cos \theta) \end{cases}. \quad (2)$$

由此可以看出，当 $\theta_1 = 0 \pm n\pi$ (n 为正整数) 或 $\theta_{2,3} = \pm \arccos[-a_1/(4a_2)]$ 时，输出光强曲线 $T_1(\theta)$ 和 $T_2(\theta)$ 有极值点。 $T_1(\theta)$ 和 $T_2(\theta)$ 在极值点 θ_1 和 $\theta_{2,3}$ 的二阶导数分别为

$$\begin{cases} T''_1(0) = -a_1 - 4a_2 \\ T''_1(\theta_{2,3}) = -a_1^2/(4a_2) + 4a_2 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} T''_2(0) = a_1 + 4a_2 \\ T''_2(\theta_{2,3}) = a_1^2/(4a_2) - 4a_2 \end{cases}. \quad (4)$$

由(3)和(4)式可以看出， $T''_1(0)$ 和 $T''_2(0)$ 以及 $T''_1(\theta_{2,3})$ 和 $T''_2(\theta_{2,3})$ 正好反相，即 $T''_1(0)$ 和 $T''_1(\theta_{2,3})$ 为最大值或最小值时， $T''_2(0)$ 和 $T''_2(\theta_{2,3})$ 的对应极值则分别是最小值或最大值。将 $\theta=0$ 代入(1)式得

$$\begin{cases} T_1(0) = \frac{1 - \cos[2(K_1 + K_2 + K_3)]}{2} \\ T_2(0) = \frac{1 + \cos[2(K_1 + K_2 + K_3)]}{2} \end{cases}. \quad (5)$$

显然，当 $K_1 + K_2 + K_3 = \pi/2$ 时，归一化输出光强 $T_1(0) = 1$ ，为最大值，而 $T_2(0) = 0$ ，为最小值。

再将 $\theta=\pi$ 代入(1)式得

$$\begin{cases} T_1(\pi) = \frac{1 - \cos[2(K_1 - K_2 + K_3)]}{2} \\ T_2(\pi) = \frac{1 + \cos[2(K_1 - K_2 + K_3)]}{2} \end{cases}. \quad (6)$$

为了保证器件归一化输出光强 $T_1(\theta)$ 和 $T_2(\theta)$ 的周期性, 根据(5)和(6)式, 满足 $T_1(\pi) = 0$ 和 $T_2(\pi) = 1$ 的条件就是 $K_1 + K_3 - K_2 = 0$ 。很显然, 同时满足 $K_1 + K_2 + K_3 = \pi/2$ 和 $K_1 + K_3 - K_2 = 0$ 成立的条件是

$$\begin{cases} K_2 = \pi/4 \\ K_1 + K_3 = \pi/4 \end{cases} \quad (7)$$

光学交错滤波器的另一个指标是信道隔离度, 通过求 $\max\{|T_1(0) - T_2(0)|\}$ 和 $\max\{|T_1(\pi) - T_2(\pi)|\}$ 可以选取适当的 K_1, K_2 和 K_3 得到最大的信道隔离度

$$\begin{cases} |T_1(0) - T_1(\pi)| = |\cos[2(K_1 + K_2 + K_3)]| \\ |T_1(\pi) - T_2(\pi)| = |\cos[2(K_1 - K_2 + K_3)]| \end{cases} \quad (8)$$

显然, 当 K_1, K_2 和 K_3 满足(7)式时, $|T_1(0) - T_2(0)|$ 和 $|T_1(\pi) - T_2(\pi)|$ 为最大值。

令 $K_1 = K$ (或 $K_3 = K$), 将 $K_2 = \pi/4, K_1 = K, K_3 = \pi/4 - K$ 和 $K_2 = \pi/4, K_3 = K, K_1 = \pi/4 - K$ 分别代入(1)式, 经计算发现有相同的表达式

$$\begin{cases} T_1(\theta) = \frac{1}{2} + \frac{\cos \theta}{2} + \frac{\sin 4K(\cos 2\theta - 1)}{8} \\ T_2(\theta) = \frac{1}{2} - \frac{\cos \theta}{2} - \frac{\sin 4K(\cos 2\theta - 1)}{8} \end{cases} \quad (9)$$

设输入光场为 $E_i(\lambda), E_i(\lambda)$ 从器件端口 1 输入, 端口 2 无输入光场。在数值模拟分析中, 取光纤的纤芯折射率 $n = 1.457$, 传输中心波长 $\lambda_0 = 1550$ nm, 耦合器 DC_1 和 DC_2 的耦合角分别取为 $K_1 = K_3 = \pi/8$ 和 $K_2 = \pi/4$ 。光纤干涉臂长差 $\Delta l = 2.04$ mm, 计算结果如图 2 所示(在下列计算图中, 实线和虚线点划线分别代表从 E_{o1} 端和 E_{o2} 端输出的归一化输出光强)。

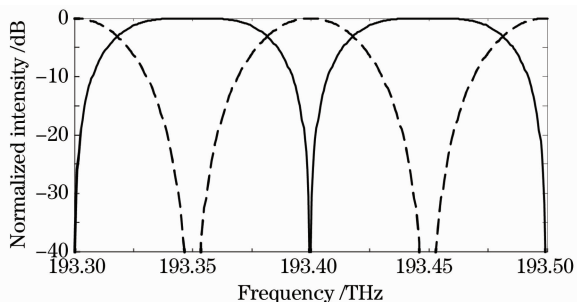


图 2 $K = \pi/8$ 时, 全光纤不等带宽交错滤波器的输出光谱图

Fig. 2 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with the parameter $K = \pi/8$

图 2 中虚线的 3 dB 带宽为 35.70 GHz, 隔离度约等于 40 dB; 实线的 3 dB 带宽为 62.74 GHz, 隔离度大于 40 dB。将 3 dB 带宽大于 30 GHz(窄口)的一路用于传输 10 Gb/s 速率的信号, 而将 3 dB 带宽大于 60 GHz(宽口)的这一路用于传输 40 Gb/s 的信号。

由此可见, 适当选取两级级联 MZI 型全光纤干涉仪的三个耦合系数和两组光纤段的臂长差可以实现不等带宽传输。

文献[11]设计的迈克耳孙三面镜法布里-珀罗(Fabry-Pérot)型不等带宽光学交错滤波器, 最大信道隔离度约等于 37 dB; 文献[12]利用两个多镜 G-T 腔代替迈克耳孙干涉仪的两面全反射镜得到的不等带宽输出光谱, 其宽口隔离度在 30 dB, 窄口隔离度在 22 dB; 文献[13]采用 33 个不同分光比的耦合器级联形式得到了隔离度大于 35 dB 的不等带宽输出光谱; 另外文献[14]将 2 段长度比为 1:2 的双折射光纤加入光纤环境构建的不等带宽交错滤波器, 信道隔离度大于 30 dB。上述信道隔离度都是模拟计算得到的理论值。

从设计结构可以发现, 文献[11, 12]设计的不等带宽光学交错滤波器基本上都采用分离光学元件; 文献[13, 14]设计的不等带宽光学交错滤波器虽然是全光纤结构, 但前者需要在光纤环境中串接两段不同长度的双折射光纤, 而后者则需要 33 个不同分光比的耦合器级联而成。

和文献[11~14]设计的不等带宽光学交错滤波器比较, 本文基于两级级联 MZI 型全光纤交错滤波器在实现不等带宽输出的同时, 信道隔离度有了一定程度的改进, 同时具有更加简单的结构模式。

3 耦合比对输出光谱的影响

在图 3 的计算曲线中, 取 DC_2 为 3 dB 耦合器, 图 3 是(9)式在 K 为不同值时的计算结果。图 3(a)和图 3(b)中, 取 K 分别等于 $\pi/12$ 和 $\pi/5$ 。图 3(a)中虚线的 3 dB 带宽为 37.1 GHz, 实线的 3 dB 带宽为 61.28 GHz; 图 3(b)中虚线的 3 dB 带宽为 40.42 GHz, 实线的 3 dB 带宽为 57.82 GHz。与图 2 的计算结果相比, 当 $K < \pi/8$ 时, 宽口的 3 dB 带宽变窄, 而窄口的 3 dB 带宽变宽; 与此相反, 当 $K > \pi/8$ 时, 宽口的 3 dB 带宽变宽, 而窄口的 3 dB 带宽变窄。

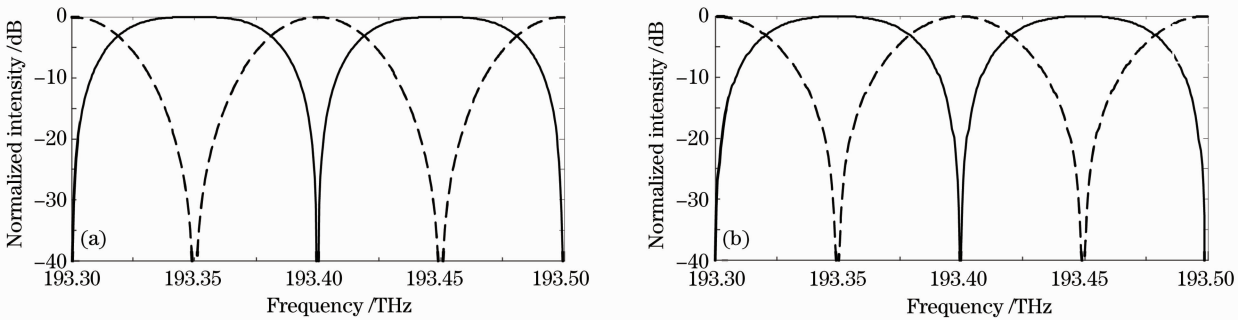


图 3 (a) $K=\pi/12$ 和(b) $K=\pi/5$ 全光纤不等带宽交错滤波器的输出光谱图

Fig. 3 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with the parameters (a) $K=\pi/12$ and (b) $K=\pi/5$

下面分析 K_1, K_2 和 K_3 不满足(7)式时,耦合器分光比对器件输出光谱的影响。图 4 是(1)式在取 $K_2 = \pi/4$, 而 K_1 和 K_3 不同值时的计算结果。

在图 4(a)和图 4(b)中,考虑 K_1 和 K_3 不相等,其

中一个大于 $\pi/8$, 而另外一个小于 $\pi/8$, 分别取 $K_1 = \pi/7, K_3 = \pi/9$ 和 $K_1 = \pi/9, K_3 = \pi/7$ 。在图 4(c)和图 4(d)中,考虑 K_1 和 K_3 相等,并且同时大于和小于 $\pi/8$, 分别取 $K_1 = K_3 = \pi/7$ 和 $K_1 = K_3 = \pi/9$ 。

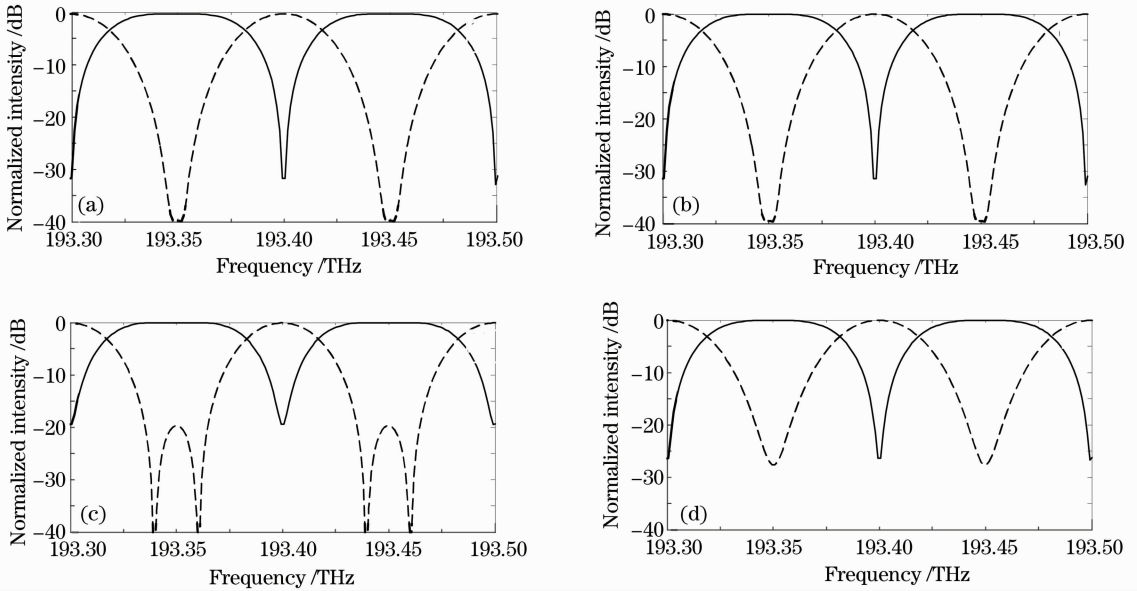


图 4 $K_2 = \pi/4$ 时,全光纤不等带宽交错滤波器的输出光谱图。(a) $K_1 = \pi/7, K_3 = \pi/9$; (b) $K_1 = \pi/9, K_3 = \pi/7$; (c) $K_1 = K_3 = \pi/7$; (d) $K_1 = K_3 = \pi/9$

Fig. 4 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with $K=\pi/8$. (a) $K_1 = \pi/7, K_3 = \pi/9$; (b) $K_1 = \pi/9, K_3 = \pi/7$; (c) $K_1 = K_3 = \pi/7$; (d) $K_1 = K_3 = \pi/9$

图 4(a)和图 4(b)中,两组曲线的 3 dB 带宽基本相等,虚线的 3 dB 带宽约为 35.63 GHz,实线的 3 dB 带宽在 62.88 GHz 附近。图 4(c)中虚线的 3 dB 带宽为 33.33 GHz,实线的 3 dB 带宽为 65.26 GHz; 图 4(d)中虚线的 3 dB 带宽为 37.36 GHz,实线的 3 dB 带宽为 61.06 GHz。和图 2 相比,图 4(a)和图 4(c)中宽口的 3 dB 带宽变宽,窄口的 3 dB 带宽变窄;而图 4(b)和图 4(d)中宽口的 3 dB 带宽变窄,窄口的 3 dB 带宽变宽。另外从图 4(a)~(d)的计算结果可以看出,图 4(c)和图 4(d)中信道隔离度的下降明

显高于图 4(a)和图 4(b)。

图 5 是(1)式在取 $K_1 = K_3 = \pi/8$, 而 K_2 不同值时的计算结果。在图 5(a)中,取 $K_2 = 2\pi/9$, 虚线的 3 dB 带宽为 33.88 GHz, 实线的 3 dB 带宽为 64.70 GHz。在图 5(b)中,取 $K_2 = 2\pi/7$, 虚线的 3 dB 带宽为 37.83 GHz, 实线的 3 dB 带宽为 60.55 GHz。和图 2 的计算结果相比,图 5(a)中宽口曲线的 3 dB 带宽变宽,窄口曲线的 3 dB 带宽变窄;相反,图 5(b)中宽口曲线的 3 dB 带宽变窄,窄口曲线的 3 dB 带宽变宽。从图 5 的计算结果可以看出,无论耦合器 DC_2

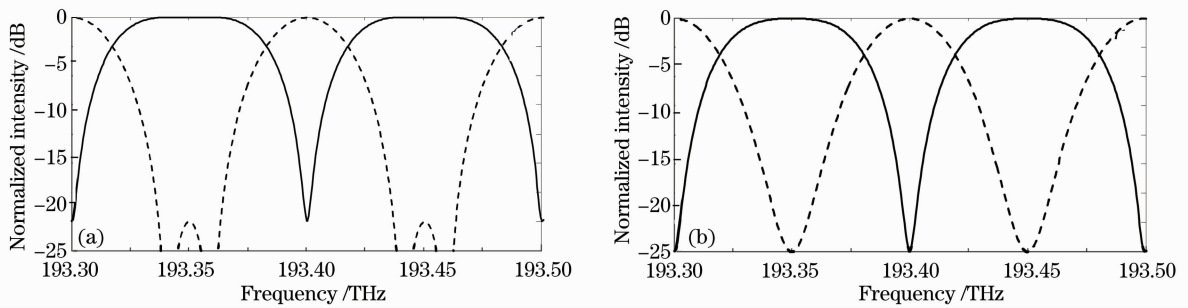


图 5 $K=\pi/8$ 时,全光纤不等带宽交错滤波器的输出光谱图。(a) $K_2=2\pi/9$; (b) $K_2=2\pi/7$

Fig. 5 Calculated output spectra of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver with $K=\pi/8$. (a) $K_2=2\pi/9$; (b) $K_2=2\pi/7$

的分光比大于或小于 $0.5:0.5$, 都会使得全光纤型不等带宽交错滤波器的信道隔离度产生了明显的下降。

综上所述,制作级联 MZI 型全光纤不等带宽交错滤波器时,准确控制 DC_2 的分光比是关键步骤。在保证耦合器 DC_2 为 3 dB 耦合器的前提下,耦合器 DC_1 和 DC_3 的分光比尽可能地接近 $0.1464:0.8536$ (对应 $K_2=K_3=\pi/8$)。在拉制级联 MZI 型全光纤不等带宽交错滤波器时,如果先拉制耦合器 DC_1 和 DC_3 中的一个分光比小于或大于 $0.1464:0.8536$, 那么后拉制的另外一个耦合器的分光比最好与之相反。也就是说如果先拉制耦合器的分光比大于 $0.1464:0.8536$, 尽可能地控制后拉制的另外一个耦合器的分光比小于 $0.1464:0.8536$ 。

4 设计实例

为了验证理论计算的正确性,对上述选取的数据进行了实验。在实际制作过程中,由于光纤熔接会引入波导不连续性,对光纤插损和光波偏振态产生不可预期的影响,因此必须对三个耦合器采用连续熔融拉锥的方法。从以上分析可以看出,耦合器 DC_2 的分光比是否为 $0.5:0.5$ 是保证器件隔离度的关键。因此在制作器件时应该首先拉制耦合器 DC_2 , 利用两台和计算机连接的光功率计监视光功率的变化,由计算机自动控制系统自动准确地控制其分光比。由于光的干涉作用,拉制耦合器 DC_1 和 DC_3 时,无法利用监视光的方法监视和准确控制分光比,但可以利用经验设置自动控制装置的参数,从而达到比较准确控制其分光比的目的。

为避免光纤扭转对偏振态的影响,实验中的耦合器采用无扭绞的背靠背熔融拉锥方法,两熔融光纤是对称的(无需预拉)。调整火炬气流,避免气流冲击耦合区,耦合器在熔融拉锥的第一个功率转换周期完成,控制耦合区长宽比约为 1.4。实验测得

在 1550 ± 6 nm 范围内耦合器基本上各向同性,偏振相关损耗(PDL) $L_{PD} \leq 0.01$ dB,这和文献[15,16]的结果一致。

参照文献[17]的方法,对两个干涉臂长差进行粗略的设置。待三个耦合器全部完成以后,再参照文献[18]的方法,对光纤干涉臂进行精密微调。本实验将干涉臂粘贴在压电陶瓷(PZT)上,利用 PZT 的伸缩特性改变臂长差。将一线偏振光作为输入光源,取实验样品输入耦合器两侧任意端口作为输入端口,用光谱分析仪在实验样品输出端口观察输出图案。实验中通过调节 PZT 上的驱动电压的方法改变光纤臂长差,同时在光谱分析仪中观察输出图案,直到理想的输出图案出现。此过程中还发现器件的输出稳定性受外界的气流、环境温度和震动等因素影响比较大,因此设计了一个恒温密封装置,将实验品密封以减少外界干扰。

实际制作中很难避免光纤弯曲,光纤本身的畸变等使偏振态发生不可预知的变化的因数,特别是为了调整中心波长和波长间隔而使用 PZT 等改变臂长差时,干涉臂的偏振态更可能出现较大的差异,影响器件的干涉对比度。为了抵消这些影响,在器件的干涉臂上加偏振控制器,尽可能地控制两光纤干涉臂中传输的光波偏振态的矢量夹角保持为 0 或 180° ,从而使输出干涉条纹可见度保持为最大。另外尽可能地缩短光纤干涉臂的长度也是降低 PDL 的措施之一,实验中光纤干涉臂的长度控制在 2 m 以内。

实验结果表明,双光纤干涉臂同时施加偏振控制器后其偏振态都趋于一致,MZI 的干涉对比度可以得到明显改善。

图 6 是级联 MZI 型全光纤不等带宽交错滤波器的输出光谱的测量值。由图 6 可以看出,中心波长符合 ITU 规定,其中 3 dB 带宽为 63.14 GHz 的信道可

用于 40 Gb/s 传输速率; 而信道 3 dB 带宽为 35.32 GHz 的可用于 10 Gb/s 传输速率。可以看出, 该谱线和图 4(a) 的理论分析比较接近, 整个器件的通道隔离度大于 25 dB, 附加损耗小于 0.2 dB。产生附加损耗的主要原因是偏振相关损耗。

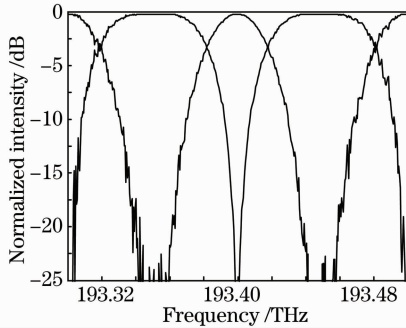


图 6 全光纤不等带宽交错滤波器输出光谱的测量值

Fig. 6 Experimental spectrum of the all-fiber asymmetrical bandwidth interleaver

将实验样品的干涉臂剪断, 测量 DC_1 , DC_2 和 DC_3 的分光比。测量结果为 DC_2 接近 3dB 耦合器, DC_1 和 DC_2 的分光比分别约等于 0.2 : 0.8 和 0.1 : 0.9。从这里可以看出, 试验样品信道隔离度下降的主要原因是输入耦合器 DC_1 和输出耦合器 DC_3 的分光比偏差造成的, 这和前面的理论分析结论相吻合。

5 结 论

在两级级联 MZI 型全光纤干涉仪的基础上, 通过理论分析和模拟计算得到了实现级联 MZI 全光纤型不等带宽交错滤波器的结构参数, 并系统分析了这些结构参量对输出光谱特性的影响。选取理论优化计算的一组数据进行了实验, 初步的实验结果与模拟分析的结果表明, 基于两级级联 MZI 型全光纤不等带宽交错滤波器系统的设计方案是可行的。

参 考 文 献

- Cai Yanmin, Zhao Ling, Zhou Yingwu *et al.*. Experimental study on interleaved demultiplexer based on polarization beam interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 239~242
蔡燕民, 赵岭, 周赢武等. 基于偏振光干涉仪的 Interleaver 解复用器实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 239~242
- Shao Yonghong, Jiang Yaoliang, Zheng Quan *et al.*. Design of interleaver using Fabry-Pérot interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 74~76
邵永红, 姜耀亮, 郑权等. 法布里-珀罗型光学梳状滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 74~76
- X. H. Ye, M. Zhang, P. D. YE. Flat-top interleavers with chromatic dispersion compensator based on phase dispersive free space Mach-Zehnder interferometer[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **257**(2): 255~260
- Cai Yanming, Wang Xinge, Zhao Ling *et al.*. Theory analysis of birefringent interleaver used in DWDM[J]. *Chinese J. Lasers*,

- 2001, **28A**(11): 1017~1020
蔡燕民, 王昕歌, 赵岭等. 用于 DWDM 系统的双折射型 Interleaver 原理分析[J]. *中国激光*, 2001, **28A**(11): 1017~1020
- 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
- S. W. Kok, Y. Zhang, C. Y. Wen *et al.*. Design of allfiber optical interleavers with a given specification on passband ripples [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **226**(1-6): 241~248
- Q. Wang, S. L. He. Optimal design of planar wavelength circuits based on Mach-Zehnder interferometers and their cascaded forms [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1284~1290
- Meng Yichao, Huang Zhaoming, Wang Lutang. Transmission characteristics of interleaver based on Mach-Zehnder interferometer with optical all pass filter inserted[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 575~580
孟义朝, 黄肇明, 王陆唐. 马赫-曾德尔干涉仪型波长交错器研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 575~580
- 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
- Wu Shudong, Chen Lian, Fan Jianqiang *et al.*. Asymmetric optical interleavers filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 31~35
伍树东, 陈莲, 范建强等. 非对称型光学交错梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 31~35
- Shao Yonghong, Miao Tongqun, Jiang Yaoliang *et al.*. A novel interleaver with different output spectrum bandwidth [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **32**(8): 948~950
邵永红, 缪同群, 姜耀亮等. 一种不等带宽光学梳状滤波器[J]. *光子学报*, 2007, **32**(8): 948~950
- Wang Chang, Zhang Juan. Output spectrum characteristics of MGTI-type asymmetrical optical Interleavers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 321~324
王昌, 张娟. MGTI 型不等带宽 interleaver 的输出光谱特性分析[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 321~324
- Zhang Ruifeng, Wang Shuhui, Ge Chunfeng *et al.*. Design of different bandwidth interleaver [J]. *J. Tianjin University*, 2006, **39**(3): 365~368
张瑞峰, 王书慧, 葛春风等. 不等带宽奇偶交错滤波器设计[J]. *天津大学学报*, 2006, **39**(3): 365~368
- Zhang Ting, Chen Kai, Zhao Shuai *et al.*. A novel unequal passband interleaver employing high birefringence fiber Sagnac loop mirror [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4): 436~440
张婷, 陈凯, 赵帅等. 双折射光纤环不等带宽交错复用器的研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 436~440
- Su Shanxing, Wang Tao, Zhou Weihua. Study on polarization dependent loss of fused taper wide band coupler [J]. *Study on Opt. Commun.*, 2005, (1): 64~67
苏善行, 王涛, 周卫华. 熔锥型宽带耦合器偏振相关损耗研究[J]. *光通信研究*, 2005, (1): 64~67
- K. Morishita, K. Takashina. Polarization properties of fused fiber couplers and polarization beam-splitters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(11): 1503~1507
- Yao Shouquan, Chen Kaixuan. A 8-channel fiber Mach-Zehnder interferometric super narrow spacing wavelength-division-multiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8): 1113~1118
姚寿铨, 陈凯旋. 光纤马赫-曾德尔干涉型 8 波分超窄波分复用器的研制[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8): 1113~1118
- H. W. Lu, Y. E. Zhang, G. W. Luo. Study of all-fiber flat-top passband interleaver based on 2×2 and 3×3 fiber couplers [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**(1): 116~121