

全光纤平顶 3×3 光学梳状滤波器的改进

鲁怀伟¹ 鲁彦² 蒲会兰¹ 罗冠炜¹

¹兰州交通大学数理学院, 甘肃 兰州 730070

²甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030

摘要 为改善全光纤 3×3 光学梳状滤波器(Interleaver)的输出特性,详细推导了其输出表达式,通过分析和优化,提出了新的结构参数。计算结果表明:相对于以往的全光纤 3×3 光学梳状滤波器而言,利用优化后的结构参数设计的全光纤 3×3 光学梳状滤波器,不仅降低了器件的制作难度,而且在串扰特性、信道隔离度、阻带抑制、通带平坦度以及过渡带滚降等特性方面得到了明显改善,信道间功率旁瓣降低了约 16 dB。最后进行了实验研究,实验所得结果与理论结果相吻合。

关键词 光纤光学; 光纤耦合器; 马赫-曾德尔干涉仪; 波分复用

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0206003

Improved Designs of All-Fiber 3×3 Interleaver with Flat-Topped Passband

Lu Huaiwei¹ Lu Yan² Pu Huilan¹ Luo Guanwei¹

¹School of Mathematics and Physics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

²Gansu Institute of Architectural Design and Research, Lanzhou, Gansu 730030, China

Abstract In order to improve the transmission performance of the all-fiber 3×3 interleaver, the output expression is derived and simulation is performed. Through the analysis and optimization, the optimal structure parameters is put forward. The calculating and experimental results indicate that the crosstalk characteristics, the channel isolation, stopband rejection, passband flat-topped degrees and the rolloff in transition band can be improved greatly, and the reduced sidelobe level of channel of the proposed device is more than 16 dB in comparison with that of the convention all-fiber 3×3 interleaver. A 100 GHz three-port interleaver with a flat-topped passband bandwidth is demonstrated by experiment. The experimental and theoretical results coincide with each other.

Key words fiber optics; fiber coupler; Mach-Zehnder interferometer; wavelength-division-multiplexer

OCIS codes 060.4510; 060.2310; 060.2330; 060.2340

1 引 言

密集波分复用(DWDM)技术是目前提高通信容量普遍采用的一种技术方案。光学梳状滤波器能将传输信号中一组信道间隔较窄的多个波长光信号分成两组信道间隔较宽的信号,由此可以有效地增加光纤上复用的信道数,是 DWDM 系统中的重要器件。全光纤马赫-曾德尔干涉仪(MZI)是构建全光纤无源器件的基本元件之一,基于 MZI 的全光纤无源器件在 DWDM 以及光纤传感系统得到了广泛的应用^[1-6]。在众多全光纤光学梳状滤波器方案中,全光纤 MZI 光学梳状滤波器具有插入损耗小,与光纤的兼容性好等优点,在 DWDM 系统中有着重要的应用价值。目前全光纤 MZI 光学梳状滤波器大都为双信道光学梳状滤波器^[7-12],而有关三信道全光纤 MZI 光学梳状滤波器的报道较少,其中。在文献[13-15]中,全光纤 MZI 光学梳状滤波器的设计均

收稿日期: 2014-07-30; 收到修改稿日期: 2014-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(11172119)、甘肃省自然科学基金、甘肃省创新研究群体计划(1308RJIA006)

作者简介: 鲁怀伟(1959—), 男, 教授, 主要从事光纤无源器件、光信息处理等方面的研究。E-mail: luhw@mail.lzjtu.cn

为单级三信道 MZI 型, 其输出通带特性是正弦型, 这种设计结构对激光器光源的稳定性要求较高, 不利于实际使用。文献[16]采用连续熔拉三个品字型 3×3 光纤耦合器制成了两级 MZI 级联的三信道 3×3 MZI 光学梳状滤波器, 和单级三信道 MZI 光学梳状滤波器相比, 在通带平顶方面有了明显改进, 但仍存在信道隔离度偏低、输出信道间的功率旁瓣峰值过高等不足。另外, 通过实际拉制器件还发现, 其在结构参数方面也存在一定的缺陷, 使得输入耦合器的分光比很难在实验中准确控制。

2 原 理

两级 MZI 级联型 3×3 光学梳状滤波器的结构如图 1 所示。它是在三条相同的单模光纤(SMF)上连续熔拉三个品字型单模光纤耦合器(DC₁、DC₂和 DC₃)而成, 光纤干涉臂 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 和 l_6 把光纤耦合器 DC₁、DC₂ 和 DC₃ 串联组成一个两级 MZI 级联 3×3 光学梳状滤波器。

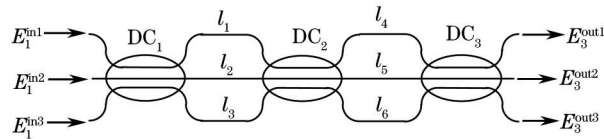


图 1 全光纤 3×3 光学梳状滤波器结构示意图

Fig.1 Structure of all-fiber 3×3 interleaver

对于 3×3 品字型熔锥型光纤耦合器, 其传输矩阵为^[14-16]

$$\mathbf{M}(k_j) = \begin{bmatrix} A_j & B_j & B_j \\ B_j & A_j & B_j \\ B_j & B_j & A_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $A_j = [\exp(2ik_j) + 2\exp(-ik_j)]/3$ 、 $B_j = [\exp(2ik_j) - \exp(-ik_j)]/3$, k_j 是第 $j(j=1\sim 3)$ 个 3×3 品字型熔锥型光纤耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积(简称耦合系数)。根据文献[16]取第二个和第三个耦合器之间光纤干涉臂的相位延时分别为 $\theta, 0, -\theta$, 其中 $\theta = 2\pi n(l_4 - l_5)/\lambda = -2\pi n(l_6 - l_5)/\lambda = 2\pi n\Delta l/\lambda$; 而第一个和第二个耦合器之间光纤干涉臂的相位延时分别为 $3\theta, \varphi, -3\theta$, 其中 $3\theta = 2\pi n(l_1 - l_2)/\lambda = -2\pi n(l_3 - l_2)/\lambda = 6\pi n\Delta l/\lambda$; λ 是传输光波长, n 是光纤的有效折射率。

假设输入光场 E_1^{inj} , 则输出光场可表示为

$$[E_3^{outj}] = \mathbf{M}(k_3)\mathbf{M}^{\varphi_2}\mathbf{M}(k_2)\mathbf{M}^{\varphi_1}\mathbf{M}(k_1)[E_1^{inj}], \quad (2)$$

式中 E_3^{outj} 是光学梳状滤波器第 j 端口的输出光场, \mathbf{M}^{φ_1} 和 \mathbf{M}^{φ_2} 是耦合器之间光纤干涉臂的传输矩阵, 分别为 $\text{diag}[\exp(3i\theta), \exp(i\varphi), \exp(-3i\theta)]$ 和 $\text{diag}[\exp(i\theta), 1, \exp(-i\theta)]$, φ 为调整相位因子。

由于器件中光纤很短, 忽略传输损耗, 三个输出端口的归一化输出光强可分别表示为 $T_j(\theta) = |E_3^{outj}|^2$ 。为简单起见, 假设输入光场 $E^{in} = [0, E^{in}, 0]$, 则 $T_j(\theta)$ 可表示为

$$\begin{cases} T_1(\theta) = a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 3\theta + a_4 \cos 4\theta + a_5 \cos 5\theta + a_6 \cos 6\theta + a_7 \cos 7\theta + a_8 \cos 8\theta - a_9 \sin \theta - \\ \quad a_{10} \sin 2\theta - a_{11} \sin 3\theta - a_{12} \sin 4\theta - a_{13} \sin 5\theta - a_{14} \sin 6\theta - a_{15} \sin 7\theta - a_{16} \sin 8\theta + a_0, \\ T_2(\theta) = -2(a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 3\theta + a_4 \cos 4\theta + a_5 \cos 5\theta + a_6 \cos 6\theta + a_7 \cos 7\theta + a_8 \cos 8\theta) + b_0, \\ T_3(\theta) = a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 3\theta + a_4 \cos 4\theta + a_5 \cos 5\theta + a_6 \cos 6\theta + a_7 \cos 7\theta + a_8 \cos 8\theta + a_9 \sin \theta + \\ \quad a_{10} \sin 2\theta + a_{11} \sin 3\theta + a_{12} \sin 4\theta + a_{13} \sin 5\theta + a_{14} \sin 6\theta + a_{15} \sin 7\theta + a_{16} \sin 8\theta + a_0, \end{cases} \quad (3)$$

式中 a_0, b_0 以及 $a_1 \sim a_{16}$ 的表达式为

$$\begin{aligned} a_0 &= \{4(|A_1 A_2|^2 + 2|B_1 B_2|^2)\sin^2(3k_3/2) + (|A_1 B_2|^2 + |B_1 B_2|^2 + |B_1 A_2|^2)[2\cos(3k_3) + 7]\}/9, \\ b_0 &= a_0 + [2\cos(3k_3) + 1](|B_1|^2 - |A_1|^2)(|B_2|^2 - |A_2|^2)/3, \\ a_1 &= \{2\sin^2(3k_3/2)\{(|A_1|^2 + |B_1|^2)(A_2 B_2^* + A_2^* B_2) + 2|B_1 B_2|^2 - 2|B_2|^2[A_1 B_1^* \exp(-i\varphi) - A_1^* B_1 \exp(i\varphi)]\} + \\ &\quad i3\sin(3k_3)(|A_1|^2 - |B_1|^2)(A_2 B_2^* - A_2^* B_2)\}/9, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_2 &= -\{4 \sin^2(3k_3/2)\{|B_1|^2(A_2B_2^* + A_2^*B_2) + |A_1B_2|^2\} - 2A_1B_1^*B_2^*(A_2 + B_2)\exp(-i\varphi) - 2A_1^*B_1B_2(A_2^* + B_2^*)\exp(i\varphi)\} + \\
 &\quad i3 \sin(3k_3)[A_1^*B_1B_2 \exp(i\varphi)(A_2^* - B_2^*) - A_1B_1^*B_2^*(A_2 - B_2)\exp(-i\varphi)]/9, \\
 a_3 &= \{8 \sin^2(3k_3/2)[A_1A_2B_1^*B_2^* \exp(-i\varphi) + A_1^*A_2^*B_1B_2 \exp(i\varphi)] + [2 \cos(3k_3) + 7][A_1B_1^*B_2(A_2^* + B_2^*)\exp(-i\varphi) + \\
 &\quad A_1^*B_1B_2^*(A_2 + B_2)\exp(i\varphi)]\}/9, \\
 a_4 &= \{3i \sin(3k_3)(|B_2|^2 - |A_2|^2)[A_1^*B_1 \exp(i\varphi) - A_1B_1^* \exp(-i\varphi)] + 2 \sin^2(3k_3/2)\{|A_2|^2 + |B_2|^2\}[A_1B_1^* \exp(-i\varphi) + \\
 &\quad A_1^*B_1 \exp(i\varphi)] - 2|B_1B_2|^2\}/9, \\
 a_5 &= 4 \sin^2(3k_3/2)\{|B_1B_2|^2 - A_1A_2^*B_1^*B_2 \exp(-i\varphi) - A_1^*A_2B_1B_2^* \exp(i\varphi)\}/9, \\
 a_6 &= |B_1|^2\{(A_2B_2^* + A_2^*B_2)[2 \cos(3k_3) + 7] + 8|B_2|^2 \sin^2(3k_3/2)\}/9, \\
 a_7 &= |B_1|^2[2 \sin^2(3k_3/2)(A_2B_2^* + A_2^*B_2) - i3 \sin(3k_3)(A_2B_2^* - A_2^*B_2)]/9, \\
 a_8 &= -4|A_2B_1|^2 \sin^2(3k_3/2)/9, \\
 a_9 &= \{2 \sin(3k_3)\{|A_1|^2 + |B_1|^2\}(A_2B_2^* + A_2^*B_2) + 2|B_1B_2|^2 - 2|B_2|^2[A_1B_1^* \exp(-i\varphi) + A_2^*B_1 \exp(-i\varphi)]\} + \\
 &\quad 3i \sin^2(3k_3/2)(|A_1|^2 - |B_1|^2)(A_2B_2^* - A_2^*B_2)/3, \\
 a_{10} &= \{2 \sin(3k_3)[2|B_1|^2(A_2B_2^* + A_2^*B_2) + 2|A_1B_2|^2 - A_1B_1^*B_2^*(A_2 + B_2)\exp(-i\varphi) - A_1^*B_1B_2(A_2^* + B_2^*)\exp(i\varphi)] + \\
 &\quad 2i \sin^2(3k_3/2)[A_1^*B_1B_2 \exp(i\varphi)(A_2^* - B_2^*) - A_1B_1^*B_2^*(A_2 - B_2)\exp(-i\varphi)]\}/3, \\
 a_{11} &= [2 \cos(3k_3) + 1]\{A_1B_1^*B_2(B_2^* - A_2^*)\exp(-i\varphi) + i2A_1^*B_1B_2^*[A_2 \exp(i\varphi) - B_2 \exp(-i\varphi)]\}/6, \\
 a_{12} &= \{\sin(3k_3)\{|B_2|^2 + |A_2|^2\}[A_1B_1^* \exp(-i\varphi) + A_1^*B_1 \exp(i\varphi)] - 2|B_1B_2|^2 + 2i \sin^2(3k_3/2)(|A_2|^2 - |B_2|^2) \times \\
 &\quad [AB_1^* \exp(-i\varphi) - A_1^*B_1 \exp(i\varphi)]\}/6 \\
 a_{13} &= -2 \sin(3k_3)\{|B_1B_2|^2 - A_1A_2^*B_1^*B_2 \exp(-i\varphi) - A_1^*A_2B_1B_2^* \exp(i\varphi)\}/3, \\
 a_{14} &= i|B_1|^2(|A_2|^2 - |B_2|^2)[2 \cos(3k_3) + 1]/3, \\
 a_{15} &= |B_1|^2[(A_2B_2^* + A_2^*B_2)\sin(3k_3) - 2i(A_2B_2^* - A_2^*B_2)\sin^2(3k_3/2)]/3, \\
 a_{16} &= 2|A_2B_1|^2 \sin(3k_3)/3,
 \end{aligned}$$

其中 A_j^* 和 B_j^* 分别是 A_j 和 B_j 的共轭函数。

3 器件最佳参数的确定

一个理想的全光纤 3×3 光学梳状滤波器在输出端口应该具有相同的输出波形,这就要求输出函数 $T_i(\theta)$ 必须满足下列条件:

$$T_1(\theta) = T_2(\theta - 2\pi/3) = T_3(\theta - 4\pi/3). \quad (4)$$

根据(3)式和(4)式,由等式 $T_1(\theta) = T_2(\theta - 2\pi/3)$ 可以得出系数 a_0, b_0 以及 $a_1 \sim a_{16}$ 之间有以下关系:

$$\begin{cases}
 \sqrt{3}a_1 = a_9, -\sqrt{3}a_2 = a_{10}, a_3 = 0, a_6 = 0, \\
 \sqrt{3}a_4 = a_{12}, -\sqrt{3}a_5 = a_{13}, a_{11} = 0, a_{14} = 0, \\
 \sqrt{3}a_7 = a_{15}, -\sqrt{3}a_8 = a_{16}, b_0 = a_0,
 \end{cases} \quad (5)$$

取(5)式中的任一等式进行计算,例如

$$a_{16} + \sqrt{3}a_8 = \frac{8\sqrt{3}|A_2B_1|^2}{9} \sin\left(\frac{3k_3}{2}\right) \sin\left(\frac{3k_3}{2} - \frac{\pi}{3}\right). \quad (6)$$

显然,满足(6)式等于零的条件是 $k_3 = 2\pi/9$ 或 $k_3 = 2\pi/3$ 。进一步计算结果表明, $k_3 = 2\pi/9$ 时, (5)式中所有等式都成立。据此得出的结论是:实现全光纤 3×3 光学梳状滤波器输出光谱具有相同输出波形的条件就是要求输出耦合器的分光比为 1:1:1,此结论和文献[14]中结论完全一致。较文献[16]的设计更为简单,文献[16]给出的满足三个输出端口具有相同输出波形的条件是 k_2 和 k_3 必须同时满足 $k_2 = 2\pi/9$ 和 $k_3 = 4\pi/9$ 。对输出和中间耦合器分光比的同时约束,不仅增加了器件的实际制作难度,而且在改善信道平顶度以及信道隔离度等方面少了

一个控制条件,这显然对全光纤的设计和实际制作不利。

将 $k_3=2\pi/9$ 代入到 a_0, b_0 和 $a_1\sim a_{16}$ 中,经过简单计算,(3)式可简化为

$$\begin{cases} T_1(\theta) = 1/3 + 2[a_1 \cos(\theta + \pi/3) + a_2 \cos(2\theta - \pi/3) + a_3 \cos(4\theta + \pi/3) + a_4 \cos(5\theta - \pi/3) + a_5 \cos(7\theta + \pi/3) + a_6 \cos(8\theta - \pi/3)], \\ T_2(\theta) = 1/3 - 2(a_1 \cos \theta + a_2 \cos 2\theta + a_3 \cos 4\theta + a_4 \cos 5\theta + a_5 \cos 7\theta + a_6 \cos 8\theta), \\ T_3(\theta) = 1/3 + 2[a_1 \cos(\theta - \pi/3) + a_2 \cos(2\theta + \pi/3) + a_3 \cos(4\theta - \pi/3) + a_4 \cos(5\theta + \pi/3) + a_5 \cos(7\theta - \pi/3) + a_6 \cos(8\theta + \pi/3)], \end{cases} \quad (7)$$

式中 $a_1\sim a_6$ 分别为

$$\begin{aligned} a_1 &= \{(|A_1|^2 - |B_1|^2)[i\sqrt{3}(A_2^*B_2^* - A_2^*B_2) - |B_2|^2] - 2|B_2|^2[A_1^*B_1^* \exp(-i\varphi) - A_1^*B_1 \exp(i\varphi)]\}/6, \\ a_2 &= -\{i\sqrt{3}[A_1^*B_1B_2 \exp[i(\varphi + k_2)] - A_1B_1^*B_2^* \exp[-i(\varphi + k_2)]] + (|A_1|^2 - |B_1|^2)|B_2|^2 + 2A_1A_2^*B_1^*B_2 \exp(-i\varphi) + 2A_1^*A_2B_1B_2^* \exp(i\varphi)\}/6, \\ a_3 &= \{i\sqrt{3}(|B_2|^2 - |A_2|^2)[A_1^*B_1 \exp(i\varphi) - A_1B_1^* \exp(-i\varphi)] - 2|B_1B_2|^2 + (|A_2|^2 + |B_2|^2)[A_1^*B_1^* \exp(-i\varphi) + A_1^*B_1 \exp(i\varphi)]\}/6, \\ a_4 &= [|B_1B_2|^2 - A_1A_2^*B_1^*B_2 \exp(-i\varphi) - A_1^*A_2B_1B_2^* \exp(i\varphi)]/3, \\ a_5 &= |B_1|^2[i\sqrt{3}(A_2^*B_2 - A_2B_2^*) - |B_2|^2]/6, \\ a_6 &= -|A_2B_1|^2/3. \end{aligned}$$

由(7)式知 $T_j(\theta)$ 之和满足能量守恒,即

$$T_1(\theta) + T_2(\theta) + T_3(\theta) = 1. \quad (8)$$

由于三个输出通道具有相同的输出波形,可以仅对(7)式中任一表达式进行分析而不影响结果,因此取 $T_2(\theta)$ 进行分析。为了保证得到最大的信道平顶度,要求^[16]

$$\left. \frac{\partial T_2(\theta)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 T_2(\theta)}{\partial^2 \theta} \right|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad T_2(\theta_c) = T_{2,\max}, \quad (9)$$

其中 θ_c 为 $T_2(\theta)$ 的极值点。再对(8)式求导,结合(9)式显然有

$$\left. \frac{\partial [T_1(\theta) + T_3(\theta)]}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 [T_1(\theta) + T_3(\theta)]}{\partial^2 \theta} \right|_{\theta=\theta_c} = 0, \quad (10)$$

联解(9)式和(10)式,得到 $k_1=2.199, k_2=1.466$ 和 $\varphi=\pi$ 。

取光纤的纤芯有效折射率 $n=1.457$ 、传输中心波长 $\lambda_0=1550$ nm, $k_1=2.199, k_2=1.466, k_3=0.698$ 和 $\varphi=\pi$, 信道间隔为 100 Hz, 计算结果如图 2 所示。在图 2 中,虚线、实线和点划线分别代表输出端口的归一化输出功率 $T_j(\theta)$ 曲线。

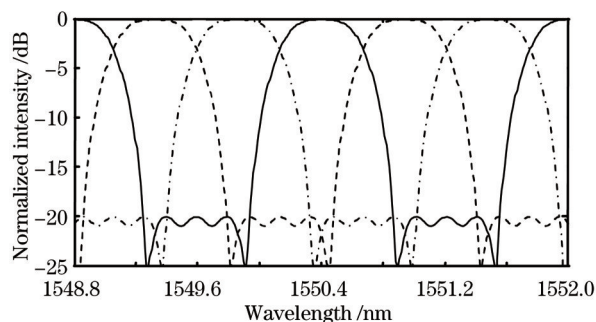


图 2 全光纤 3×3 光学梳状滤波器的输出光谱计算结果图

Fig.2 Calculated transmission spectra of the all-fiber 3×3 interleaver

图 2 的计算结果和文献[16]的计算结果相比,信道隔离度提高了约 16 dB,信道间的功率旁瓣峰值得到很好地抑制;和文献[14]的计算结果相比,虽然信道隔离度有所下降,但 -0.5 dB 通带带宽显著提高,克服了文献[14]的输出光谱为正弦型的不足。

耦合器耦合系数与耦合器的分光比有着直接的关系,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原因的限制,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,因此讨论耦合器耦合系数偏差对光学梳状滤波器输出光谱的影响是十分必要的。

在实际拉制级联型光学梳状滤波器的过程中,一般第一个拉制的光纤耦合器分光比可以准确控制^[8,10]。由于输出耦合器的分光比直接影响光学梳状滤波器输出光谱的对称性,为了保证其耦合系数接近理想值,一般应第一个被拉制,以便可以准确控制耦合系数。因此假设输出光纤耦合器DC₃的耦合系数为理想值,仅考虑DC₁和DC₂的耦合系数产生一定的偏差,即 $k_1 \pm \Delta k_1$ 和 $k_2 \pm \Delta k_2$ 。其中 k_1 、 k_2 等其他参数与图2的计算取值一样,其计算结果如图3所示。为了和文献[16]的分析有对比性,取 $\Delta k_1 = k_1 \times 5\%$ 、 $\Delta k_2 = k_2 \times 5\%$ 。

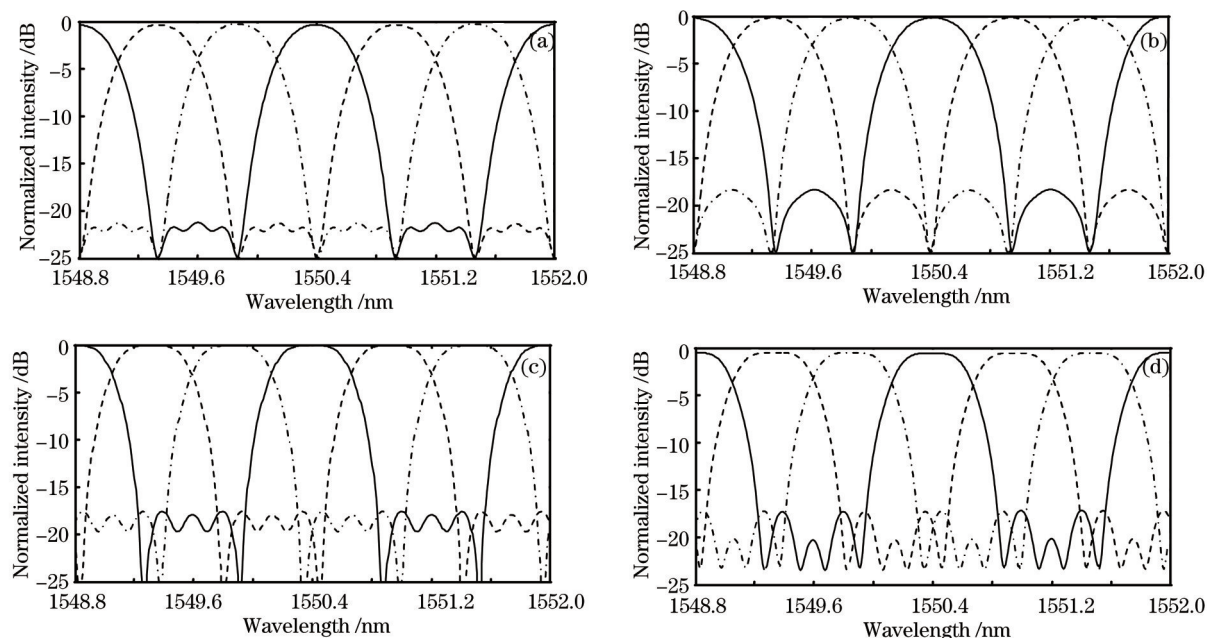


图3 当(a) $k_1 - \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$, (b) $k_1 - \Delta k_1, k_2 - \Delta k_2$, (c) $k_1 + \Delta k_1, k_2 - \Delta k_2$, (d) $k_1 + \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$ 时,光学梳状滤波器的输出光谱图
Fig.3 Spectral responses of the interleaver with (a) $k_1 - \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$, (b) $k_1 - \Delta k_1, k_2 - \Delta k_2$, (c) $k_1 + \Delta k_1, k_2 - \Delta k_2$, (d) $k_1 + \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$

从图3和图2比较结果可以看出,当 $k_1 + \Delta k_1, k_2 \pm \Delta k_2$ 时,信道通带顶部更趋于平坦化,通带峰值略有下降,信道间的功率旁瓣峰增加; $k_1 - \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$ 时,信道通带平坦度虽然劣化了,但信道间的功率旁瓣峰下降,信道隔离度有所提高; $k_1 - \Delta k_1, k_2 - \Delta k_2$ 时,不仅导致信道通带平坦度劣化,同时也使信道间的功率旁瓣峰增加。根据以上分析,在无法保证耦合器理想分光比时,DC₁和DC₂的耦合系数的变化最好满足 $k_1 - \Delta k_1, k_2 + \Delta k_2$,在5%的误差范围内仍可以得到比较理想的输出光谱和信道隔离度。

熔锥型光纤耦合器的分光比和耦合系数、有效耦合长度等密切相关,在实际拉制过程中,耦合系数与有效耦合长度都需要对光纤进行一定程度的熔拉来控制。而在文献[16]的器件结构参数中,参数分别为 $k_1 = 0.0644$ 、 $k_2 = 0.698$ 、 $k_3 = 1.396$ 、 $\varphi_{1,1} = -2.038$ 和 $\varphi_{1,2} = -1.087$ 。显然 $k_1 = 0.0644$ 明显偏小, k_1 偏小意味着耦合长度很小,无疑会给输入耦合器的分光比在实际拉制过程中的控制带来困难;另外文献[16]的设计需要在输入耦合器和中间耦合器之间的干涉臂中引入两个相位调整 $\varphi_{1,1}$ 和 $\varphi_{1,2}$,而本文的设计只需要一个相位调整 φ ,减少了器件的调整难度。

为了验证理论分析的正确性,对理论分析得到的结构参数进行了实验验证。采用和文献[11,14,16]类似的技术拉制器件,其实验结果如图4所示。对测量完的器件利用剪断法测量了各个耦合器的分光比,利用(1)式换算后, $k_1 \sim k_3$ 的测量值分别约为2.186、1.476、0.692。图4的结果和图3的计算结果比较,输出光谱的顶部平坦度、信道隔离度等有所下降,和理论分析基本保持一致。和文献[16]的实验测量值相比,输出光谱的矩形度、通带的顶部平坦度、信道隔离度、信道间的功率旁瓣峰值等均有了明显改善。

由于实验过程、测量方法和文献[11,14,16]基本类似,因此在这里不再详细叙述。

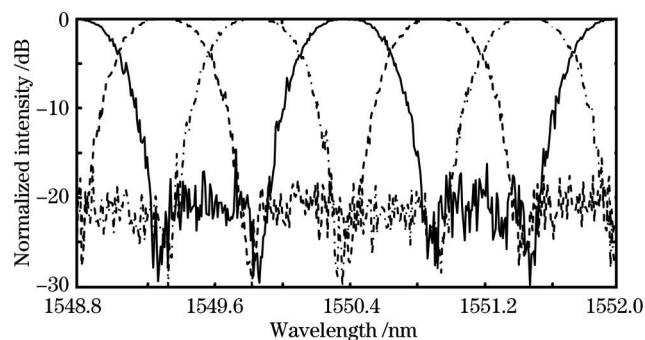


图4 全光纤3×3光学梳状滤波器的输出光谱的测量值

Fig.4 Experimental spectra of the all-fiber 3×3 interleaver

4 结 论

对由三个品字型3×3光纤耦合器形成的两级MZI级联3×3光学梳状滤波器进行了分析和研究,得到了一组新的结构参数,研究表明:采用该结构参数设计的全光纤3×3MZI光学梳状滤波器和以往的全光纤3×3MZI光学梳状滤波器相比,在串扰特性、信道隔离度、阻带抑制、过渡带滚降以及通带平顶度等特性方面明显得到了改善,输出波形更加接近矩形。在设计的结构参数中,输入耦合器的耦合系数与有效耦合长度的乘积有了明显增大,减少了干涉臂相位调整因子数目,实现了光学梳状滤波器在输出端口具有相同输出波形的控制,这对实际制作全光纤3×3MZI光学梳状滤波器是十分有利的。

参 考 文 献

- 1 Deng Dapeng, Cao Dongdong, Liao Xiaomin, *et al.*. Design and realization of an all-optical signal optimization structure [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605008.
邓大鹏,曹东东,廖晓闽,等.一种全光信号优化结构的设计与实现[J].中国激光,2013,40(6):0605008.
- 2 Lü Weiwei, Xu Feng, Yu Benli. All-fiber Mach-Zehnder temperature sensor based on inter-modal interference [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050605.
吕卫卫,徐峰,俞本立.基于模间干涉原理的全光纤马赫-曾德尔温度传感器[J].激光与光电子学进展,2014,51(5):050605.
- 3 Zhang Xia, Bai Chenglin, Zhang Xiaoguang. Theoretical analysis and experimental study of noise suppression for high-carrier-noise-rate multi-carrier light source [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1105005.
张霞,白成林,张晓光.高载噪比多载波光源的噪声抑制理论及实验研究[J].中国激光,2013,40(11):1105005.
- 4 Ji Yushen, Fu Guangwei, Fu Xinghu, *et al.*. Sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on the fused tapered photonic crystal fiber sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1006005.
纪玉申,付广伟,付兴虎,等.熔融拉锥型光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪传感特性[J].光学学报,2013,33(10):1006005.
- 5 Bi Weihong, Shen Yuan, Liu Qiang, *et al.*. Refractive index sensing characteristics of Mach-Zehnder interferometer based on directly photonic crystal fiber [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505008.
毕卫红,申远,刘强,等.直接熔融塌陷光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪的折射率传感特性[J].中国激光,2014,41(5):0505008.
- 6 Zou Pin, Han Xiyou, Wang Yu, *et al.*. Study on a tunable radio frequency filter based on integrated optical waveguide [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1013001.
邹品,韩秀友,王瑜,等.可调谐集成光波导射频滤波器研究[J].光学学报,2013,33(10):1013001.
- 7 S W Kok, Y Zhang, C Y Wen, *et al.*. Design of all fiber optical interleavers with a given specification on passband ripples [J]. Opt Commun, 2003, 226(1-6): 241-248.
- 8 A P Luo, Z C Luo, W C Xu, *et al.*. Wavelength switchable flat-top all-fiber comb filter based on a double-loop Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Express, 2010, 18(6): 6056-6063.
- 9 H W Lu, K J Wu, Y Wei, *et al.*. Study of all-fiber asymmetric interleaver based on two-stage cascaded Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Commun, 2012, 285(6): 1118-1122.

- 10 Dong Xiaowei, Pei Li, Xu Ou, et al.. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer [J]. Chinese J Lasers, 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]. 中国激光, 2008, 28(4): 638-642.
- 11 Lu Huaiwei, Zhang Baoge, Wu Kaijun, et al.. Design of all-fiber interleaver with unequal passband based on cascaded Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(8): 2406-2411.
鲁怀伟, 章宝歌, 邬开俊, 等. 级联马赫-曾德尔干涉仪型不等带宽交错滤波器的设计[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2406-2411.
- 12 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, 邬开俊, 魏 贇, 等. 基于对称结构的光纤谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1106005.
- 13 G Weihs, M Reck, H Weinfurter, et al.. All-fiber three-path Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Lett, 1996, 21(4): 302-304.
- 14 E E Ren, H W Lu, B G Zhang, et al.. Optimization design of all-fiber 3×3 multiplexer based on an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer [J]. Opt Commun, 2009, 282(14): 2818-2822.
- 15 Yao Shouquan, Wang Zihua. A dense-wavelength-division-multiplexer by using a three arm Mach-Zehnder interferometer [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(7): 952-956.
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.
- 16 Qijie Wang, Ying Zhang, Yeng Chai Soh. All-fiber 3×3 interleaver design with flat-top passband [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2004, 16(1): 168-170.

栏目编辑: 王晓琰