

文章编号: 0253-2239(2008)10-1867-07

基于 3×3 耦合器的迈克耳孙干涉仪相位特性分析

何俊肖 浩冯磊 李芳 张松伟 刘育梁

(中国科学院半导体研究所光电系统实验室, 北京 100083)

摘要 研究了基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的相位特性。由光纤耦合器的散射矩阵理论, 推导出了当 3×3 耦合器分光比不均匀时, 干涉仪三路输出信号相位差的表达式。根据实际使用的 3×3 耦合器各通道的插入损耗, 经计算与修正得到其散射矩阵, 并求出干涉仪三路输出信号的相位差分别为 120.21° 、 120.77° 和 119.02° , 与理想值 120° 的偏差在 1° 以内。实验测得的干涉仪三路输出信号的相位差随时间随机变化, 经分析是由光偏振态随机变化引起的。相位差与理想值 120° 的偏离均在 1° 以内, 符合理论分析得到的结论。

关键词 光纤光学; 迈克耳孙干涉仪; 散射矩阵; 3×3 耦合器; 相位特性

中图分类号 TN253; TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082810.1867

Analysis of Phase Characteristics of Fiber Michelson Interferometer Based on a 3×3 Coupler

He Jun Xiao Hao Feng Lei Li Fang Zhang Songwei Liu Yuliang

(Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract The phase characteristics of an unbalanced Michelson interferometer based on a 3×3 coupler was investigated. Using the scattering matrix theory of fiber couplers, the phase differences between each two of the three outputs of the interferometer were deduced when an unideal 3×3 coupler was used. The scattering matrix of a commercial 3×3 fiber coupler was obtained from the insert loss of each channel after calculation and modification. The phase differences of the three outputs of the interferometer are calculated to be 120.21° , 120.77° and 119.02° , with deviation less than 1° from the ideal 120° . An experiment was carried out to measure the three outputs of the interferometer. Small fluctuation of the phase differences is observed, which is due to the random change of polarization state. The maximum of the deviations from the ideal 120° is within 1° , and the experimental results are in accordance with the theoretical expectations.

Key words fiber optics; Michelson interferometer; scattering matrix; 3×3 coupler; phase characteristics

1 引言

3×3 耦合器是一种重要的光纤器件, 在光纤传感和相干光通信等领域都有着广泛的应用^[1]。近年来, 基于 3×3 耦合器的干涉仪引起了人们极大的研究兴趣, 它可以用来实现干涉式光纤传感器^[2]、光纤光栅传感器^[3,4]以及光纤激光传感器^[5]的信号解调。基于 3×3 耦合器的干涉式解调方案属于被动解调, 与相位载波法, 有源零差法、外差法等主动解调方案相比, 有着明显的优势: 结构简单、紧凑; 不需要引入相位调制, 不存在有源器件; 测量动态范围大、频谱

范围宽等。基于 3×3 耦合器的解调方案依赖于干涉仪三路输出信号相互之间的 120° 相位差, 而这个相位差取决于 3×3 耦合器的相位特性。对于理想的 3×3 耦合器, 三路分光比相等、无损耗、与偏振态无关, 这时三路信号之间的相位差为 120° 。但是在实际应用中, 3×3 耦合器的分光比并不均匀, 存在损耗, 并且还受到偏振特性的影响。文献[6]指出: 干涉仪输出信号的相位差如果偏离 120° , 而仍采用理想情况下的解调算法, 得到的信号将会发生严重的失真。因此, 有必要对非理想情况下基于 3×3 耦

收稿日期: 2007-12-12; 收到修改稿日期: 2008-04-30

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z415)资助课题。

作者简介: 何俊(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感器信号解调与组网技术等方面的研究。

E-mail: hejun07@semi.ac.cn

导师简介: 刘育梁(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光纤传感网络的关键技术及其工业应用和用于智能光网络的集成光学器件等方面的研究。E-mail: ylliu@semi.ac.cn

合器的干涉仪的相位特性加以分析,得到输出信号相互之间的实际相位差,来代替理想情况下的 120° ,以减小信号解调的失真。

本文构建了一个基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪,利用散射矩阵对该干涉仪的相位特性进行了理论分析;根据实际使用的 3×3 耦合器的插入损耗值,计算得到三路输出信号之间的相位差;然后通过实验测试了该干涉仪输出信号之间的相位差。

2 光纤耦合器的散射矩阵

不考虑偏振态的影响,则光纤中任意一点光信号的电场强度矢量退化为一个标量:

$$E(t) = E_1 \exp(j\omega t), \quad (1)$$

$$E_1 = E \exp(j\phi), \quad (2)$$

E_1 为复振幅,包含振幅 E 和相位 ϕ ,在确定零相位参考点后, ϕ 与位置有关。因此,采用复振幅来描述一个光信号。

光纤耦合器的传输特性由散射矩阵 \mathbf{S} 描述^[7]。假定耦合器互易且无反射,则其散射矩阵的一半元素为零,其形式变成

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & M^t \\ M & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中上角标 t 表示伴随矩阵。因此,对于 2×2 耦合器和 3×3 耦合器,其输出和输入光信号的复振幅之间的关系分别由散射矩阵 \mathbf{M}_2 和 \mathbf{M}_3 来描述:

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} A \exp(j\phi_a) & B \exp(j\phi_b) \\ C \exp(j\phi_c) & D \exp(j\phi_d) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} s_{41} \exp(j\phi_{41}) & s_{42} \exp(j\phi_{42}) & s_{43} \exp(j\phi_{43}) \\ s_{51} \exp(j\phi_{51}) & s_{52} \exp(j\phi_{52}) & s_{53} \exp(j\phi_{53}) \\ s_{61} \exp(j\phi_{61}) & s_{62} \exp(j\phi_{62}) & s_{63} \exp(j\phi_{63}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(4)式、(5)式中, $A, B, C, D, \phi_l (l = a, b, c, d)$ 以及 $s_{ki}, \phi_{ki} (k = 4, 5, 6; i = 1, 2, 3)$ 均为实数。 \mathbf{M}_2 和 \mathbf{M}_3 中各相位项依赖于各端口零相位参考点的选择,通过合适调整参考点^[7],使得: $\phi_a = \phi_b = \phi_c = 0, \phi_{41} = \phi_{42} = \phi_{43} = \phi_{51} = \phi_{61} = 0$ 。

若耦合器无损耗,则根据能量守恒定律,输入总功率等于输出总功率:

$$\mathbf{M}_2 \mathbf{M}_2^t = \mathbf{M}_2^t \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_3 \mathbf{M}_3^t = \mathbf{M}_3^t \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

将(4)式代入(6)式,则 2×2 耦合器的散射矩阵 \mathbf{M}_2 满足

$$\mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} A & B \\ B & -A \end{bmatrix}, \quad A^2 + B^2 = 1, \quad (8)$$

将(5)式代入(7)式,则 3×3 耦合器的散射矩阵 \mathbf{M}_3 满足

$$\begin{aligned} s_{41}^2 + s_{51}^2 + s_{61}^2 &= 1, \\ s_{42}^2 + s_{52}^2 + s_{62}^2 &= 1, \\ s_{43}^2 + s_{53}^2 + s_{63}^2 &= 1, \\ s_{41}^2 + s_{42}^2 + s_{43}^2 &= 1, \\ s_{51}^2 + s_{52}^2 + s_{53}^2 &= 1, \\ s_{61}^2 + s_{62}^2 + s_{63}^2 &= 1, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\cos \phi_{52} = \frac{s_{43}^2 s_{53}^2 - s_{41}^2 s_{51}^2 - s_{42}^2 s_{52}^2}{2s_{41} s_{51} s_{42} s_{52}}, \quad \phi_{52} > 0$$

$$\cos \phi_{53} = \frac{s_{42}^2 s_{52}^2 - s_{41}^2 s_{51}^2 - s_{43}^2 s_{53}^2}{2s_{41} s_{51} s_{43} s_{53}}, \quad \phi_{53} < 0$$

$$\cos \phi_{62} = \frac{s_{43}^2 s_{63}^2 - s_{41}^2 s_{61}^2 - s_{42}^2 s_{62}^2}{2s_{41} s_{61} s_{42} s_{62}}, \quad \phi_{62} < 0$$

$$\cos \phi_{63} = \frac{s_{42}^2 s_{62}^2 - s_{41}^2 s_{61}^2 - s_{43}^2 s_{63}^2}{2s_{41} s_{61} s_{43} s_{63}}, \quad \phi_{63} > 0$$

3 基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪三路输出信号相位差的推导

基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪如图1所示。非平衡干涉仪两干涉臂存在光程差,因此可以用来将入射光的波长变化转化为干涉仪两臂相位差的变化,实现对波长调制型光纤传感器的信号解调。 3×3 耦合器的端口5、6分别接上两根长度不等的光纤,尾端带法拉第旋转镜(FRM),形成一个非平衡迈克耳孙干涉仪。光通过 2×2 耦合器入射,由FRM反射后经 3×3 耦合器的端口1、2、3出射,端口1、3的信号直接输出,被探测器1、3接收,而端口2出射的光信号再次经过 2×2 耦合器后输出,被探测器2接收。

设输入干涉仪的光功率为 P_{in} ;三路探测器接收到的光的复振幅分别为 $E_{out1}, E_{out2}, E_{out3}$,功率分别为 $P_{out1}, P_{out2}, P_{out3}$;迈克耳孙干涉仪长臂和短臂的光纤链路损耗(含光纤损耗,光纤连接或熔接的损耗)分别为 α_L, α_S (双程),光通过两臂后的相位变化分别为 ϕ_L, ϕ_S (双程);法拉第旋转镜的插入损耗为 α_F ; 2×2 耦合器和 3×3 耦合器之间的光纤链路损耗为 α_0 ,相位延迟为 ϕ_0 ; 2×2 耦合器和 3×3 耦合器的传输特性分别由矩阵(5)式、(8)式描述,(5)式中各元素满足(9)式、(10)式。

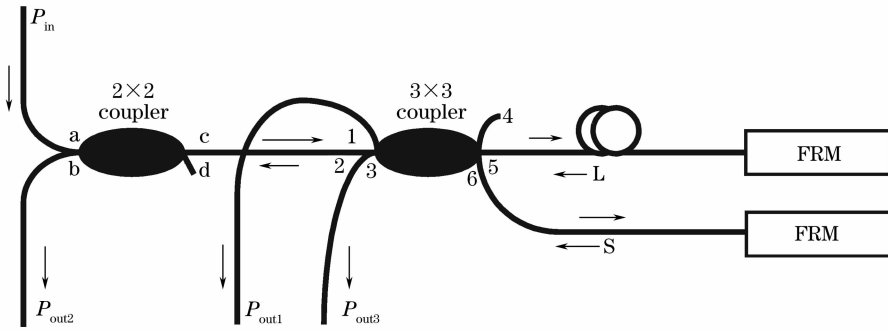


图 1 基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪示意图

Fig.1 Schematic diagram of the unbalanced Michelson interferometer based on a 3×3 coupler

光通过 2×2 耦合器,并经过一段光纤入射 3×3 耦合器,3×3 耦合器输出为

$$\begin{bmatrix} E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{41} \exp(j\phi_{41}) & s_{42} \exp(j\phi_{42}) & s_{43} \exp(j\phi_{43}) \\ s_{51} \exp(j\phi_{51}) & s_{52} \exp(j\phi_{52}) & s_{53} \exp(j\phi_{53}) \\ s_{61} \exp(j\phi_{61}) & s_{62} \exp(j\phi_{62}) & s_{63} \exp(j\phi_{63}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\alpha_0} \exp(j\phi_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & B \\ 0 & B & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{P_{in}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

3×3 耦合器的输出端口 4 不使用,并忽略其反射;而输出端口 5、6 分别经长臂光纤和短臂光纤传输后,由 FRM 反射,再次通过两光纤传输,回到 3×3 耦合器发生干涉。由于发生干涉的两束光,其偏振态变化会影响干涉条纹可见度,所以必须考虑两干涉臂中传输光的偏振态。

设当光通过端口 5、6 进入两光纤臂时,其偏振态分别为: $\begin{bmatrix} E_{5,x} \\ E_{5,y} \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} E_{6,x} \\ E_{6,y} \end{bmatrix}$,而当光再次通过端口 5、6

从两光纤臂进入 3×3 耦合器时,其偏振态分别为 $\begin{bmatrix} E'_{5,x} \\ E'_{5,y} \end{bmatrix}$ 和 $\begin{bmatrix} E'_{6,x} \\ E'_{6,y} \end{bmatrix}$ 。它们之间关系为

$$\begin{bmatrix} E'_{5,x} \\ E'_{5,y} \end{bmatrix} = S_L \cdot T \cdot S'_L \cdot \begin{bmatrix} E_{5,x} \\ E_{5,y} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} E'_{6,x} \\ E'_{6,y} \end{bmatrix} = S_S \cdot T \cdot S'_S \cdot \begin{bmatrix} E_{6,x} \\ E_{6,y} \end{bmatrix},$$

式中 S_L, S_S 分别为考虑光纤双折射效应后,两臂的琼斯(Jones)矩阵, S'_L, S'_S 为考虑光纤双折射效应后,光返回时两臂的琼斯矩阵, T 为法拉第旋转镜的琼斯矩阵。 S_L, S_S 可以写为^[8]

$$S_L = \frac{\alpha_L^{1/4} \exp(j\phi_L/2)}{d_L} \begin{bmatrix} a_L & -b_L^* \\ b_L & a_L^* \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$S_S = \frac{\alpha_S^{1/4} \exp(j\phi_S/2)}{d_S} \begin{bmatrix} a_S & -b_S^* \\ b_S & a_S^* \end{bmatrix},$$

a_L, b_L, a_S, b_S 都是与光纤双折射有关的参数, * 表示复共轭, $d_L^2 = a_L a_L^* + b_L b_L^*$, $d_S^2 = a_S a_S^* + b_S b_S^*$ 。而光

返回时, S'_L, S'_S 可以写为^[8]

$$S'_L = \frac{\alpha_L^{1/4} \exp(j\phi_L/2)}{d_L} \begin{bmatrix} a_L & -b_L \\ b_L^* & a_L^* \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$S'_S = \frac{\alpha_S^{1/4} \exp(j\phi_S/2)}{d_S} \begin{bmatrix} a_S & -b_S \\ b_S^* & a_S^* \end{bmatrix}.$$

法拉第旋转镜中旋光晶体的旋光角度为 45°, 因此其反射光的偏振态正好与入射光正交,有^[8]

$$T = \alpha_F^{1/2} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

将(13)式~(15)式代入(12)式,得到:

$$\begin{bmatrix} E'_{5,x} \\ E'_{5,y} \end{bmatrix} = \sqrt{\alpha_L \alpha_F} \exp(j\phi_L) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{5,x} \\ E_{5,y} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} E'_{6,x} \\ E'_{6,y} \end{bmatrix} = \sqrt{\alpha_S \alpha_F} \exp(j\phi_S) \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{6,x} \\ E_{6,y} \end{bmatrix}.$$

从(16)式中可以看出,由于采用了法拉第旋转镜,两臂传输的光的偏振态变化为确定值,消除了光纤双折射效应的影响,使得干涉条纹可见度保持稳定。不再考虑两束光的偏振态,这时返回 3×3 耦合器端口 4、5、6 的光的复振幅为

$$\begin{bmatrix} E'_4 \\ E'_5 \\ E'_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\alpha_F \alpha_L} \exp(j\phi_L) & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{\alpha_F \alpha_S} \exp(j\phi_S) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_4 \\ E_5 \\ E_6 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

光反方向通过 3×3 耦合器,此时 3×3 耦合器的散射矩阵为矩阵(5)式的转置,端口 1、2、3 输出为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \\ E'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{14} \exp(j\phi_{14}) & s_{15} \exp(j\phi_{15}) & s_{16} \exp(j\phi_{16}) \\ s_{24} \exp(j\phi_{24}) & s_{25} \exp(j\phi_{25}) & s_{26} \exp(j\phi_{26}) \\ s_{34} \exp(j\phi_{34}) & s_{35} \exp(j\phi_{35}) & s_{36} \exp(j\phi_{36}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_4 \\ E'_5 \\ E'_6 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

其中 $\phi_{14} = \phi_{15} = \phi_{16} = \phi_{24} = \phi_{34} = 0$ 。

将(11)式、(17)式依次代入(18)式,得到

$$\begin{aligned} E'_1 &= A \sqrt{\alpha_F \alpha_0} P_{in} \{ \sqrt{\alpha_L} s_{15} s_{52} \exp[j(\phi_L + \phi_0 + \phi_{52} + \phi_{15})] + \sqrt{\alpha_S} s_{16} s_{62} \exp[j(\phi_S + \phi_0 + \phi_{62} + \phi_{16})] \}, \\ E'_2 &= A \sqrt{\alpha_F \alpha_0} P_{in} \{ \sqrt{\alpha_L} s_{25} s_{52} \exp[j(\phi_L + \phi_0 + \phi_{52} + \phi_{25})] + \sqrt{\alpha_S} s_{26} s_{62} \exp[j(\phi_S + \phi_0 + \phi_{62} + \phi_{26})] \}, \\ E'_3 &= A \sqrt{\alpha_F \alpha_0} P_{in} \{ \sqrt{\alpha_L} s_{35} s_{52} \exp[j(\phi_L + \phi_0 + \phi_{52} + \phi_{35})] + \sqrt{\alpha_S} s_{36} s_{62} \exp[j(\phi_S + \phi_0 + \phi_{62} + \phi_{36})] \}, \end{aligned} \quad (19)$$

端口 1, 3 直接输出, 因此 $E_{out1} = E'_1, E_{out3} = E'_3$ 。

而 2 端口的光要经过一段光纤, 再次通过 2×2 耦合器, 由端口 b 输出:

$$\begin{bmatrix} E'_a \\ E'_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & -A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\alpha_0} \exp(j\phi_0) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} E_{out2} = E'_b &= AB\alpha_0 \sqrt{\alpha_F} P_{in} \{ \sqrt{\alpha_L} s_{25} s_{52} \exp[j(\phi_L + 2\phi_0 + \phi_{52} + \phi_{25})] + \\ &\sqrt{\alpha_S} s_{26} s_{62} \exp[j(\phi_S + 2\phi_0 + \phi_{62} + \phi_{26})] \}, \end{aligned} \quad (21)$$

三路探测器接收的光信号的功率分别为

$$\begin{aligned} P_1 &= E_{out1} E_{out1}^* = \\ &A^2 \alpha_F \alpha_0 P_{in} [s_{15}^2 s_{52}^2 \alpha_L + s_{16}^2 s_{62}^2 \alpha_S + 2s_{15} s_{16} s_{52} s_{62} \sqrt{\alpha_L \alpha_S} \cos(\phi_L - \phi_S + \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{15} - \phi_{16})], \\ P_2 &= E_{out2} E_{out2}^* = \\ &A^2 B^2 \alpha_F \alpha_0^2 P_{in} [s_{25}^2 s_{52}^2 \alpha_L + s_{26}^2 s_{62}^2 \alpha_S + 2s_{25} s_{26} s_{52} s_{62} \sqrt{\alpha_L \alpha_S} \cos(\phi_L - \phi_S + \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{25} - \phi_{26})], \\ P_3 &= E_{out3} E_{out3}^* = \\ &A^2 \alpha_F \alpha_0 P_{in} [s_{35}^2 s_{52}^2 \alpha_L + s_{36}^2 s_{62}^2 \alpha_S + 2s_{35} s_{36} s_{52} s_{62} \sqrt{\alpha_L \alpha_S} \cos(\phi_L - \phi_S + \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{35} - \phi_{36})], \end{aligned} \quad (22)$$

记为

$$\begin{aligned} P_1 &= D_1 + A_1 \cos(\Delta\phi + \phi_1), \\ P_2 &= D_2 + A_2 \cos(\Delta\phi + \phi_2), \\ P_3 &= D_3 + A_3 \cos(\Delta\phi + \phi_3), \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $\Delta\phi = \phi_L - \phi_S$ 为迈克耳孙干涉仪两臂相位差,

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{15} - \phi_{16}, \\ \phi_2 &= \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{25} - \phi_{26}, \\ \phi_3 &= \phi_{52} - \phi_{62} + \phi_{35} - \phi_{36}, \end{aligned} \quad (24)$$

表 1 3×3 耦合器的传输参数

Table 1 Transmission parameters of 3×3 coupler

	Insertion loss /dB			Power transmission matrix			Modified power transmission matrix		
	In 1	In 2	In 3	In 1	In 2	In 3	In 1	In 2	In 3
Out 4	5.35	5.47	5.46	0.2917	0.2838	0.2844	0.3365	0.3290	0.3344
Out 5	4.81	4.98	5.36	0.3304	0.3177	0.2911	0.3485	0.3363	0.3150
Out 6	5.22	4.95	4.80	0.3006	0.3199	0.3311	0.3148	0.3345	0.3506

将插入损耗换算成功率比形式[记为 ω_{ki}^2 ($k \in 4, 5, 6, i \in 1, 2, 3$)], 得到功率传输矩阵, 如表 1 所示。可以看出, $\omega_{k1}^2 + \omega_{k2}^2 + \omega_{k3}^2 < 1$ ($k \in 4, 5, 6$), 故该 3×3 耦合器存在损耗, 而(10)式是针对无损耗时的散射矩阵得到的。但由于各通道都存在着损耗, 总损耗由各项叠加而成, 因此可以将损耗补偿到功率传

D_1, D_2, D_3 分别为三路探测器信号的直流项; A_1, A_2, A_3 为三路信号交流项的幅度。

4 计算干涉仪输出信号的相位差

商品化的 3×3 耦合器在出厂的测试报告上都有各通道插入损耗的数据, 利用插入损耗, 就能够计算出干涉仪输出信号的相位差。本文采用的 3×3 耦合器的各通道插入损耗如表 1 所示。

传输矩阵的各项中去, 经修正得到无损耗的功率传输矩阵, 再由此计算出该 3×3 耦合器的散射矩阵^[9]。

光由端口 i ($i = 1, 2, 3$) 正向输入和由端口 k ($k = 4, 5, 6$) 反向输入时, 总损耗分别为

$$\delta_i = 1 - \omega_{4i}^2 - \omega_{5i}^2 - \omega_{6i}^2, \quad (25)$$

$$\delta_k = 1 - \omega_{k1}^2 - \omega_{k2}^2 - \omega_{k3}^2, \quad (26)$$

设每一项损耗为 $\delta_{ki} [k \in \{4,5,6\}, i \in \{1,2,3\}]$, 则有

$$\delta_k = \delta_{k1} + \delta_{k2} + \delta_{k3}, \quad (k \in \{4,5,6\}) \quad (27)$$

$$\delta_i = \delta_{4i} + \delta_{5i} + \delta_{6i}, \quad (i \in \{1,2,3\}) \quad (28)$$

联立(25)式~(28)式,并将表1中功率传输矩阵数据代入,基于使 δ_{ki} 的平方和最小的原则,得到各 δ_{ki} 的值,对功率传输矩阵进行修正:

$$s_{ki}^2 = \omega_{ki}^2 + \delta_{ki}, \quad (k \in 4,5,6, i \in 1,2,3) \quad (29)$$

修正结果如表1中修正的功率传输矩阵所示,代入(10)式,得到光由1、2、3端口输入时,散射矩阵中相位角为

$$\begin{aligned} \phi_{52} &= 122.56^\circ, & \phi_{33} &= -120.24^\circ, \\ \phi_{62} &= -117.21^\circ, & \phi_{63} &= 117.01^\circ, \end{aligned} \quad (30)$$

将表1中修正后的功率传输矩阵转置代入(10)式,得到4、5、6端口输入时,散射矩阵中相位角为

$$\begin{aligned} \phi_{25} &= 122.56^\circ, & \phi_{26} &= -117.23^\circ, \\ \phi_{35} &= -120.24^\circ, & \phi_{36} &= 119.00^\circ, \end{aligned} \quad (31)$$

将(30)式、(31)式代入(24)式,得到干涉仪三路输出信号的相位

$$\phi_1 = -120.24^\circ, \quad \phi_2 = 119.55^\circ, \quad \phi_3 = 0.53^\circ, \quad (32)$$

三路信号相互之间的相位差(表示为在区间 $-180^\circ \sim 180^\circ$ 的形式)为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \phi_1 - \phi_2 + 360^\circ = 120.21^\circ, \\ \Delta\phi_{13} &= \phi_1 - \phi_3 = -120.77^\circ, \\ \Delta\phi_{23} &= \phi_2 - \phi_3 = 119.02^\circ. \end{aligned} \quad (33)$$

由此可以得出:对于本文采用的非理想 3×3 耦合器,因其分光比不均匀引起的干涉仪相位差与理想值(120°)的偏离为 1° 左右。考虑到各光纤器件存在着偏振相关损耗,而光偏振态的演变具有一定的随机性^[10],则相位差还会在一定范围内发生随机起伏。

5 实验测试与结果分析

干涉仪输出信号的实验测试系统如图2所示。光源采用可调谐分布反馈(DFB)光纤激光器,在 980 nm 的激光二极管抽运下,输出波长为 1535 nm 的激光。将 DFB 光纤激光器贴在压电陶瓷片(PZT)上,对 PZT 施加正弦电压,产生正弦应变,从而调谐光纤激光器输出激光的波长。

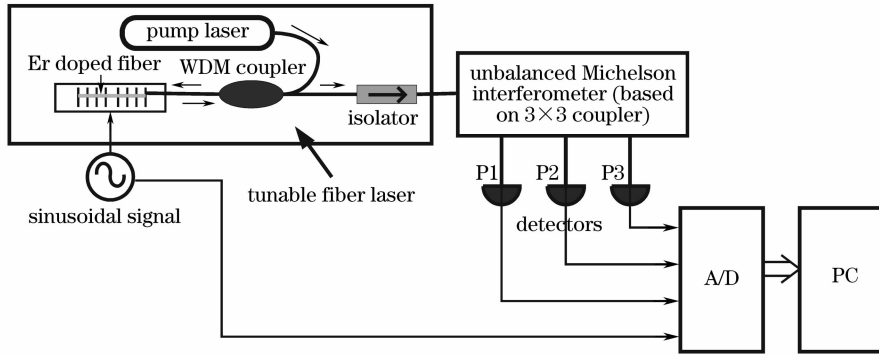


图2 基于 3×3 耦合器的迈克耳孙干涉仪相位特性测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the test system of the Michelson interferometer based on a 3×3 coupler

非平衡迈克耳孙干涉仪采用如图1所示结构,臂长差为 1.5 m,两臂尾端带法拉第旋转镜,同时实现反射镜和补偿两光纤臂双折射效应的功能。干涉仪输出信号经探测器接收和数据采集卡(采集速率为 100 kHz/s)采样后,送入计算机进行处理。

非平衡迈克耳孙干涉仪两臂相位差为

$$\Delta\phi = \phi_L - \phi_S = \Delta\phi_{\text{laser}} + \Delta\phi_0 = \phi_{\text{laser}} \cos \omega t + \Delta\phi_0, \quad (34)$$

式中 $\Delta\phi_{\text{laser}}$ 为调制光源波长而带来的相位调制, ϕ_{laser} 为相位调制幅度, ω 为调制频率,而 $\Delta\phi_0$ 为干涉仪受外界环境噪声影响带来的相位差。

将(34)式代入(23)式,得到三路探测器接收的光功率为

$$\begin{aligned} P_1 &= D_1 + A_1 \cos(\phi_{\text{laser}} \cos \omega t + \Delta\phi_0 + \phi_1), \\ P_2 &= D_2 + A_2 \cos(\phi_{\text{laser}} \cos \omega t + \Delta\phi_0 + \phi_2), \\ P_3 &= D_3 + A_3 \cos(\phi_{\text{laser}} \cos \omega t + \Delta\phi_0 + \phi_3). \end{aligned} \quad (35)$$

对可调谐激光器加以 300 Hz 的正弦调制信号,并增大其幅度,使探测器接收的三路信号的相位调制幅度 ϕ_{laser} 达到 π ,加载在激光器上的调制信号和三路探测器输出的干涉信号如图3所示。实时测定的三路输出信号中,任意两路之间构成椭圆曲线,即利萨如图形^[11],如图4所示。受光强变化,光电转化电路增益起伏,及各光器件的偏振相关性的影响,(35)式中各系数会在小范围内随时间变化,这导致了利萨如图形呈现出一定的厚度,而并非为一个单一的椭圆。

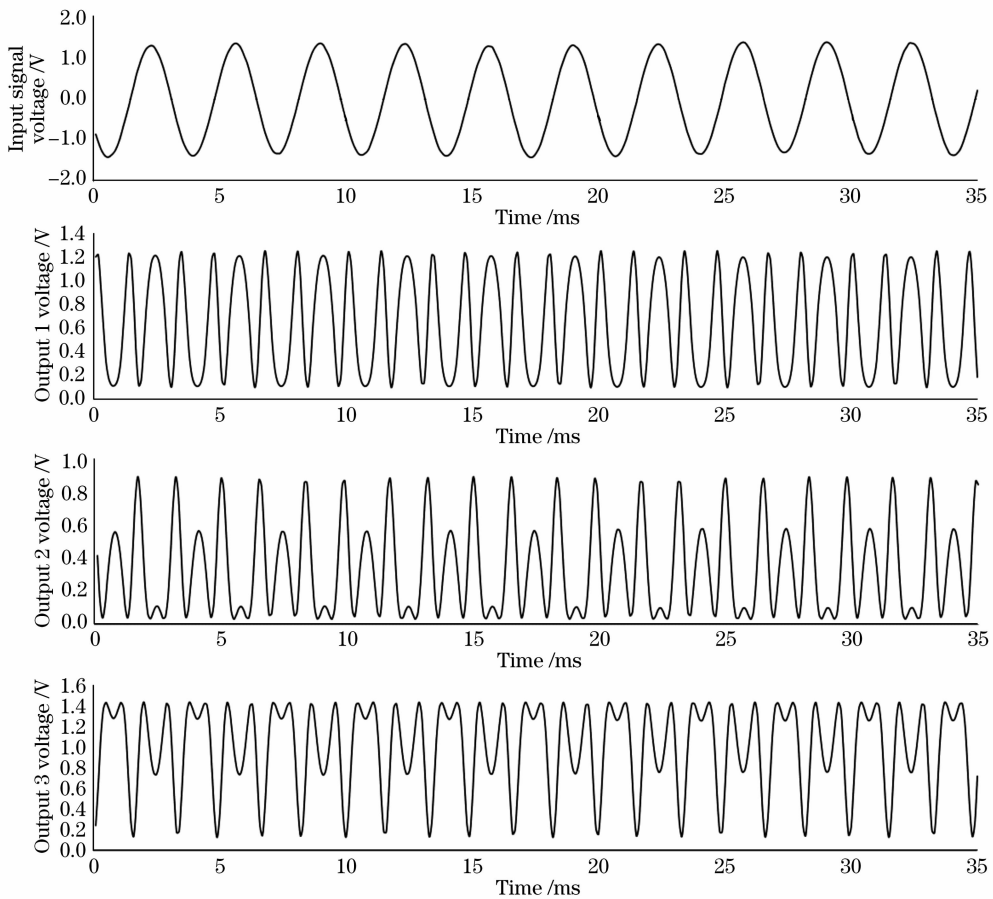


图 3 可调谐激光器的调谐信号及三路探测器的输出信号

Fig. 3 Input sinusoidal signal of the tunable fiber laser and the three outputs of the detectors

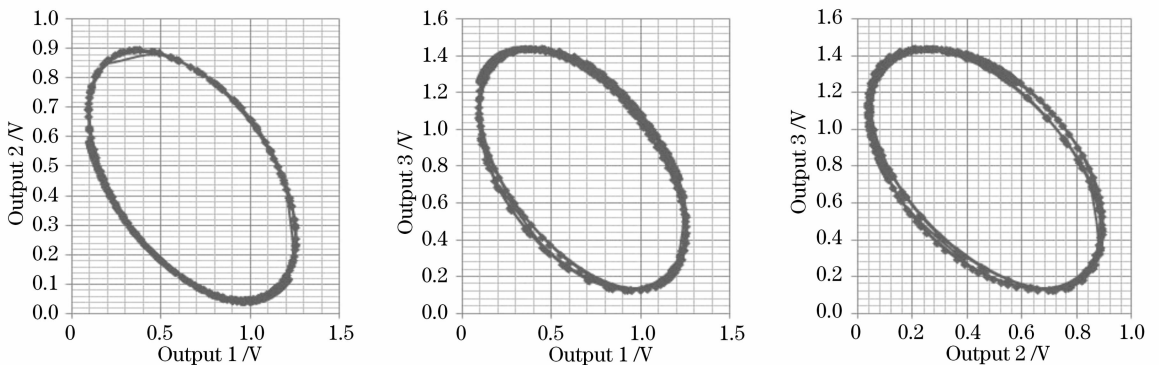


图 4 干涉仪三路输出信号之间的相互关系(利萨如图形)

Fig. 4 Relationships between the three outputs of interferometer (Lissajou figures)

对实验测得的利萨如图形进行最小二乘法拟合, 确定椭圆方程的各系数^[11]。根据三个椭圆方程的系数与(35)式中 $D_1, D_2, D_3, A_1, A_2, A_3, \Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{23}$ 的关系, 经计算可以得到 $\Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{23}$ 。在 75.2 s 的测试时间内, 实验测得的 $|\Delta\phi_{12}|, |\Delta\phi_{13}|, |\Delta\phi_{23}|$ 随时间的变化关系如图 5 所示。 $\Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{23}$ 的平均值分别为: $119.875^\circ, -119.856^\circ, 120.269^\circ$; 其均方差分别为: $0.117^\circ, 0.222^\circ, 0.218^\circ$; 与 120° 理想值的最大

偏差分别为: $-0.522^\circ, 0.784^\circ, 0.803^\circ$, 均在 1° 以内, 这和前面理论分析的结果是一致的。与理想值较小的差别得益于实验所采用的 3×3 耦合器的分光比较为均匀(如表 1 所示)。在实际应用中, 应该尽量采用分光比均匀的耦合器。

实验测得的 $\Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{23}$ 随时间变化的主要原因是由于各光纤器件的偏振相关性, 都存在着偏振相关损耗。例如对于 3×3 耦合器, 由于偏振相关损耗

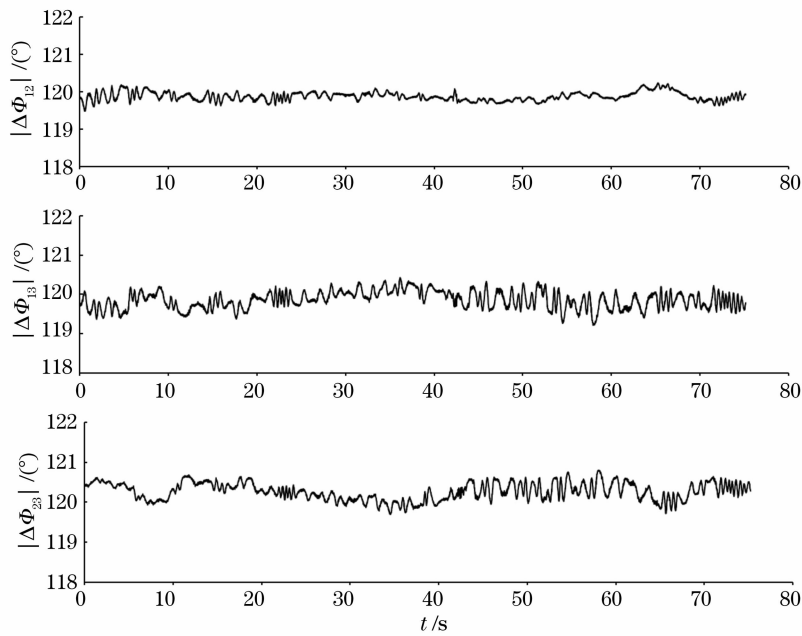


图 5 实验测得的 $|\Delta\phi_{12}|$, $|\Delta\phi_{13}|$, $|\Delta\phi_{23}|$ 随时间的变化关系

Fig. 5 Measured variations of the $|\Delta\phi_{12}|$, $|\Delta\phi_{13}|$, $|\Delta\phi_{23}|$ versus time

的存在,其散射矩阵就和入射光的偏振态有关,对于入射光不同的偏振态有着不同的散射矩阵,因此,偏振态会影响其相位特性。而偏振态的变化具有一定的随机性,这导致了实验测得的干涉仪相位差的随机起伏。

6 结 论

本文研究了基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的相位特性。由耦合器的散射矩阵理论,推导出了当 3×3 耦合器分光比不均匀时,干涉仪三路输出信号相位差的表达式。根据实际使用的 3×3 耦合器的各通道插入损耗值,经换算为功率传输比并修正后,得到该 3×3 耦合器的散射矩阵,从而求出干涉仪三路输出信号的相位差,与 120° 理想值的偏差在 1° 以内。与理想值较小的差别得益于实验所采用的 3×3 耦合器的分光比较为均匀。实验测得的干涉仪的三路输出信号随时间变化,但是其变化幅度在 1° 以内,与理论分析得到的结论相吻合。随时间变化的原因经分析是受光纤器件偏振相关性的影响。这种对干涉仪相位特性的分析方法,不仅适用于迈克耳孙干涉仪,同样很容易推广到其他类型干涉仪,如马赫-曾德尔、萨尼亚克(Sagnac)等干涉仪的相位特性的分析中。

致谢 感谢徐团伟提供了本文实验中使用的可调谐光纤激光器。

参 考 文 献

- 1 J. Pietzsch. Scattering matrix analysis of 3×3 fiber couplers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(2): 303~307
- 2 Chen Desheng, Xiao Ling, Cui Jie *et al.*. Analysis of 3×3 coupler demodulation method for optical fiber interferometer and polarization fading[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(5): 523~525
陈德胜,肖灵,崔杰等. 光纤干涉信号的 3×3 耦合器解调及偏振衰落分析[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(5): 523~525
- 3 Jiang Yi, Chen Shufen. Direct demodulation for signal from fiber grating sensors by interferometer based on 3×3 coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11): 1487~1490
江毅,陈淑芬. 用 3×3 耦合器的干涉仪直接解调光纤光栅传感器的信号[J]. *光学学报*, 2004, **24**(11): 1487~1490
- 4 Huang Chong, Cai Haiwen, Geng Jianxin *et al.*. Wavelength interrogation based on a Mach-Zehnder interferometer with a 3×3 fiber coupler for fiber Bragg grating sensors[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1397~1400
黄冲,蔡海文,耿建新等. 基于 3×3 耦合器的马赫-曾德尔干涉仪的光纤光栅波长解调技术[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1397~1400
- 5 Yi Jiang. Wavelength division multiplexing addressed four-element fiber optical laser hydrophone array[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(15): 2939~2948
- 6 M. D. Todd, M. Seaver, F. Bucholtz. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler[J]. *Electron. Lett.*, 2002, **38**(15): 784~786
- 7 R. G. Priest. Analysis of fiber Interferometer utilizing 3×3 fiber coupler[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **18**(10): 1601~1603
- 8 A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer[J]. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6): 518~520
- 9 F. Schliep. Nonideal behaviour of singlemode fibre-optic 3×3 directional couplers[J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(17): 1496~1498
- 10 Song Muping, Zhuang Baiyun. Polarization-induced fading elimination technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715
宋牟平,庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715
- 11 Liu Tingting, Cui Jie, Chen Desheng *et al.*. A new demodulation technique for optical fiber interferometric sensors with $[3 \times 3]$ directional couplers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(1): 12~15