

基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪 稳定控制系统

叶全意¹, 高英杰^{2,4}, 田 锦¹, 苏守宝³, 王永嘉²

1. 金陵科技学院 网络与通信工程学院, 江苏 南京 211169;
2. 金陵科技学院 电子信息工程学院, 江苏 南京 2101169;
3. 金陵科技学院 计算机工程学院, 江苏 南京 211169;
4. 东南大学 信息科学与工程学院, 江苏 南京 210009

摘要: Mach-Zehnder 光纤干涉仪(MZI)是一种利用光干涉原理制成的仪器,具有体积小、重量轻、结构紧凑、抗电磁干扰和灵敏度高等优点。但是,Mach-Zehnder 光纤干涉仪是一种非平衡并行结构,易受环境等因素影响导致其性能不稳定。因此,高性能测量系统和通信系统对光纤干涉仪的稳定工作提出了严格的要求。提出了一种基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 干涉仪的稳定控制系统,其目的是通过对探测器的输出信号进行调制,并反馈到光纤干涉仪的一臂上进行偏置控制,从而实现 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的稳定工作。该方法实现简单,克服了现有 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪不能稳定工作的问题。

关键词: 稳定控制; Mach-Zehnder 光纤干涉仪; 3 dB 光纤耦合器

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1022003

Stability control system of fiber Mach-Zehnder interferometer based on 3 dB fiber coupler

Ye Quanyi¹, Gao Yingjie^{2,4}, Tian Jin¹, Su Shoubao³, Wang Yongjia²

1. School of Network and Communication Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 201169, China;
3. School of Computer Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China;
4. School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210009, China)

Abstract: Due to the advantages on small size, light-weight, compact structure, immunity electronmagnetic interference and high sensitivity, fiber Mach-Zehnder interferometer has been considered in various applications. However, the abilization of the fiber Mach Zehnder interferometer has recently become the most important problem to the measurement and communication system with higher accuracy and

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61375121,61302167); 国家自然科学基金青年科学基金(61701204);

江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB510010, 13KJB510025); 江苏省自然科学基金(BK20130095);

金陵科技学院基金(jit-2016-jlxm-26, jit-2016-jlxm-22, jit-b-201408, jit-b-201511);

江苏省高等学校大学生实践创新训练计划(201613573042X)

作者简介: 叶全意(1982-), 女, 讲师, 博士, 主要从事微波光子学、光通讯方面的研究。Email: fjnuyqy@163.com

通讯作者: 高英杰(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事电磁场及微波技术方面的研究。Email: gaoyingjie@jit.edu.cn

performance, because its non balanced parallel structure. A stability control system of the fiber Mach-Zehnder interferometer was introduced, which was based on 3dB optical coupler. It was realized the stability control by bias control, the output signal of microwave photonic link feedback to one of the fiber Mach-Zehnder interferometer arms. This simple method was effective to overcome the unstably problem of the fiber Mach-Zehnder interferometer which composed of 3dB fiber coupler.

Key words: stability control; fiber MZI; 3 dB fiber coupler

0 引言

Mach-Zehnder 光纤干涉仪(MZI)是利用光干涉原理制成的仪器,具有体积小、重量轻、结构紧凑、抗电磁干扰和灵敏度高等优点,日益受到重视^[1-3]。Mach-Zehnder 光纤干涉仪已广泛应用于压力磁场、折射率、微震动、微位移、激光相位噪声、频率噪声等的全光纤传感器测量系统以及光载微波通信系统^[5-6]。在相位调制微波光子学链路系统中,Mach-Zehnder 光纤干涉仪是实现相位-幅度转换的重要器件,其性能是保证整个微波光链路稳定工作的前提^[7-9]。在高性能的测量系统和通信系统中,对 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的稳定工作提出了更严格的要求。

但是,和 Sagnac 干涉仪不同,Mach-Zehnder 光纤干涉仪是一种非平衡并行结构,干涉的两束光经历不同的光路,其相位和偏振易受环境因素的影响,导致 Mach-Zehnder 光纤干涉仪性能不稳定。这使得 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的研究一直停留在实验室阶段,很难运用到实际工作中。因此,解决 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的稳定问题,是关系到其能否应用到实际系统中的一个关键问题。

对 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定性方面的研究主要有基于 3×3 耦合器平衡检测进行相位自动跟踪补偿的方法,或通过光电转换的直流信号来进行反馈控制的方法,它们的统一特点就是系统较为复杂,实现起来较为困难。文中提出一种针对 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的稳定控制系统,通过对微波光链路中光电探测器输出电信号进行调制,并反馈到 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的一臂上进行偏置控制实现稳定控制。该系统设计结构简单,可克服现有 Mach-Zehnder 光纤干涉仪不能稳定工作的问题。

1 理论分析

基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪如图 1 所示,由 2 个光纤耦合器和特定长度的光纤组成。它的工作原理是激光器发出的光被 3 dB 光纤耦合器分为功率相等的两束光,再传输到 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的上臂和下臂。两臂中特定长度的光纤会使传输的光波发生相位变化,并且两束光在第 2 个 3 dB 光纤耦合器输出端得到重组并输出。

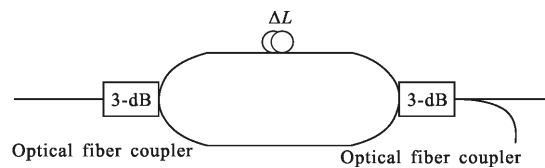


图 1 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的结构图

Fig.1 Structure diagram of fiber Mach-Zehnder interferometer

Mach-Zehnder 光纤干涉仪透射谱的特点是具有一系列等距的传输峰值,且峰值间距取决于光干涉仪上下两臂的光程差 ΔL 。对应的相邻传输峰值光频率间隔 Δf (即自由光谱范围 FSR)定义如下:

$$FSR = \Delta f = \frac{c}{\lambda^2} d\lambda = \frac{c}{n\Delta L} \quad (1)$$

由上式可以看出,在光传播速度 c 和光折射率 n 为一定值情况下,Mach-Zehnder 光纤干涉仪的自由光谱范围(FSR)取决于上下两臂的光程差。

由光波导理论可知,真空波长为 λ_0 光通过长度为 L 的光纤,输出光的相位变化 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi nL}{\lambda_0} = k_0 nL \quad (2)$$

式中: n 为光纤有效折射率; $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为光在真空中的传播常数。光纤温度 T 的变化会影响光纤折射率 n 和长度 L ,Mach-Zehnder 光干涉仪中其输出光相位

的变化 $\Delta\varphi$ 可表示为:

$$\frac{d\varphi}{dT} = \frac{2\pi L}{\lambda_0} \cdot \frac{dn}{dT} + \frac{2\pi n}{\lambda_0} \cdot \frac{dL}{dT} \quad (3)$$

由公式(3)可以看出, 光纤几何长度和光纤折射率的变化会影响光纤相位的变化。即 Mach-Zehnder 光纤干涉仪器件对环境的变化非常敏感, 只有采取一定的反馈控制回路才能保证其性能稳定。

基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉稳定控制系统结构如图 2 所示: 包含 1 个分光比为 90:10 的光纤耦合器、1 个光电探测器、1 个偏置控制电路和 1 个相位调制器, 以便实时调节 Mach-Zehnder 光干涉仪的延时差。

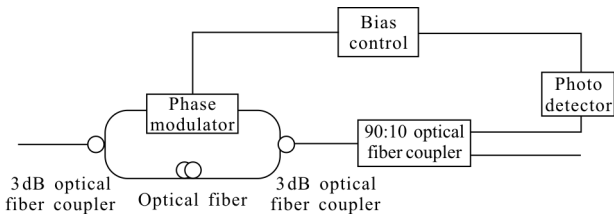


图 2 基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉稳定控制系统

Fig.2 Stability control system of fiber Mach-Zehnder interferometer based on 3 dB fiber coupler

2 个 3 dB 光纤耦合器构成一个简易结构的 Mach-Zehnder 光干涉仪。3 dB 光纤耦合器的输出端连接一个 90:10 的光纤耦合器, 光纤耦合器把 10% 的光信号通过光电探测器进行光电转换, 然后作为偏置控制电路的输入信号。然后, 偏置控制电路的输出信号调制相位调制器并作用在 Mach-Zehnder 光干涉仪的其中一臂。在上述系统中, 光纤耦合器尾纤全为慢轴对齐的保偏光纤, 尾纤端口的连接使用 FC/APC 法兰头。

图 2 的稳定控制实质是一个比例积分环节, Mach-Zehnder 光干涉仪的传递函数为 $G_0(s)=k_m$, 稳定控制的原理和实物如图 3 所示。

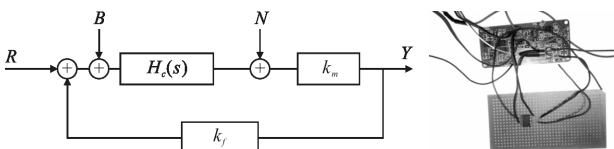


图 3 稳定控制原理图和实物图

Fig.3 Stability control schematic and practicality diagrams

则开环系统的传递函数为:

$$H_c(s)k_m k_f k_s = k_m k_f k_s \frac{1+sR_8(C_3+C_4)}{R_{10}C_4s(1+sR_8C_3)} \quad (4)$$

闭环系统传递函数为:

$$H_n(s) = \frac{k_m}{1+k_m k_f k_s \frac{1+sR_8(C_3+C_4)}{R_{10}C_4s(1+sR_8C_3)}} \quad (5)$$

2 实验分析

光纤 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的稳定性主要表现为相位和幅度的抖动。由于目前技术不能直接检测光相位, 对光相位不便于观察, 因此必须把光相位转为光强进行测试或者通过其他方法进行间接测量。在此次实验中, 为验证 3 dB 光纤耦合器结构的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制效果, 笔者采用间接方法, 即用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪构成一个相位调制微波光链路。由于 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的光相位不稳定会导致微波光链路增益的抖动, 可通过矢量网络分析仪来分析微波光链路的增益来间接分析 Mach-Zehnder 光干涉仪的稳定效果。此次实验使用安捷伦的 N5242A 型矢量网络分析仪观察相位调制光链路的增益, 分析稳定控制系统的效果。采用矢量网络分析仪(商用矢量网络分析仪的分辨率可高达 1 Hz), 一方面可以快速扫频并自动记录光链路的增益数据, 减少人为操作的误差; 另一方面可以在矢量网络分析仪的显示界面上实时观察增益曲线的抖动。

基于 Mach-Zehnder 光干涉仪构造的相位调制微波光链路结构如图 4 所示, 主要包含以下主要器件: DFB 激光器、相位调制器、传输光纤、Mach-Zehnder 光干涉仪和光电探测器。通过相位调制器, 微波信号被调制到光载波上。被调制的光信号通过光纤进行传输, 然后通过光电探测器还原出微波信号。

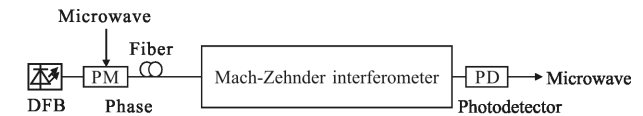


图 4 相位调制微波光链路结构图

Fig.4 Structure diagram of the phase modulated microwave optical link

根据参考文献[10], 相位调制微波光链路的小信号增益 G 定义如下:

$$G=4\pi^2\left(\frac{I_{dc}}{V_{\pi}}\right)^2 R_{in}R_{out}\sin^2\left(\frac{\Delta L\omega_{RF}}{2c}\right) \quad (6)$$

式中： I_{dc} 为光电探测器的光电流； V_{π} 为相位调制器的半波电压； R_{in} 与 R_{out} 分别为链路负载阻抗与输入阻抗，一般为 $50\ \Omega$ ； ΔL 为光干涉仪两臂的光程差； ω_{RF} 为微波信号的角频率； c 为光在真空的传输速度 $3\times 10^8\ \text{m/s}$ 。由公式(6)可知，微波光链路的增益与光电探测器光电流的平方成正比，与相位调制器半波电压的平方成反比；同时相位调制光链路的增益受微波调制频率 ω_{RF} 和光干涉仪两臂的光程差 ΔL 的限制。只有在 $\sin^2(\Delta L\omega_{RF}/2c)=1$ 情况下，相位调制光链路的增益达到峰值。使用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统前后，实验测量得的微波光链路增益如图 5 所示。笔者设计的 10 GHz 传输链路，根据公式(6)，采用的光干涉仪两臂的光程差 ΔL 为 1.5 cm，对应的 FSR 值为 20 GHz，如图 5 所示。

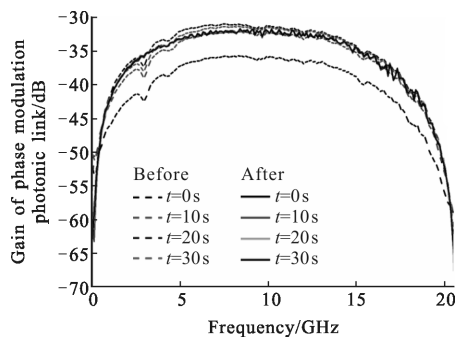


图 5 加稳定控制系统前后，相位调制光子链路增益在不同时刻的对比图

Fig.5 Gain of the phase modulated photonic link at different time, before and after with stability control system

图 5 中，虚线是未使用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统，在 0~30 s 时间内测得的微波光链路增益曲线；而实线是采取 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统后，在 0~30 s 时间内测得的微波光链路增益曲线。由此可看出，未使用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统时，微波光链路增益抖动的最大值之处为 5 dB 左右，远远不能满足工作需要。而使用 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统后，3 条微波光链路的增益曲线只在较小范围内抖动。其中 10 s 左右微波光链路增益还有小幅度的抖动，但是抖动最大处小于 1 dB，说明 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统已经开始工作。再对比

20 s 和 30 s 的微波光链路增益曲线，可看出这两条曲线基本吻合，由此说明 Mach-Zehnder 光纤干涉仪稳定控制系统能在短时间(20 s)内实现系统的稳定工作。

3 结论

文中设计了一种基于 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光干涉仪的稳定控制系统，通过对微波光链路中光电探测器的输出电信号进行相位调制，并反馈到 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的一臂上进行偏置控制，从而实现其稳定工作。该方法实现简单，克服了现有 3 dB 光纤耦合器构成的 Mach-Zehnder 光纤干涉仪不能稳定工作的问题，为满足未来应用打下了基础，具有一定的实用价值。

参考文献：

- [1] Li Lecheng, Xia Li, Xie Zhenhai, et al. All-fiber Mach-Zehnder interferometers for sensing applications [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11109–11120.
- [2] Tian Zhaobing, Yam Scott S H, Barnes Jack, et al. Refractive index sensing with Mach-Zehnder interferometer based on concatenating two single-mode fiber tapers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(8): 626–628.
- [3] Chi Hao, Zou Xihua, Yao Jianping. Analytical models for phase-modulation based microwave photonic systems with phase modulation to intensity modulation conversion using a dispersive device [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(5): 511–521.
- [4] Wu Bing, Yang Jun, Yuan Yonggui, et al. Online stability monitoring technology of long-baseline homodyne laser interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(6): 178–183. (in Chinese)
吴冰, 杨军, 苑勇贵, 等. 单频长基线激光干涉仪的在线稳定性监测方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 178–183.
- [5] Tang Chao, Wang Jinchan, Zhang Chunmin. Analysis and calculation of system responsivity for a novel wind imaging interferometer[J]. *Electronics Optics & Control*, 2016, 23(2): 51–59. (in Chinese)
汤超, 王金婵, 张淳民. 新型风成像干涉仪系统响应率的分析与计算[J]. *电光与控制*, 2016, 23(2): 51–59.
- [6] Li Feng, Geng Chao, Li Xinyang, et al. Technical research of adaptive fiber coupler array based on SPGD algorithm[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (7): 2156–2161. (in Chinese)

- 李枫, 耿超, 李新阳, 等. 基于 SPGD 算法的自适应光纤耦合器阵列技术研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2156–2161.
- [7] Liu Wenjuan, Hu Chengzhi, Jiang Peipei, et al. Ultra high resolution spectrometry incorporating two-dimension dispersing spectrometer and tunable Fabry-Perot filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630007. (in Chinese)
- 柳文娟, 胡澄之, 姜培培, 等. 结合二维分光光谱仪与可调谐法布里-珀罗干涉仪的超高分辨率光谱测量技术研究 [J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630007.
- [8] He Cunfu, Zheng Xingqiang, Luo Jianwei, et al. Research on a pipeline leakage detection system and its stability based on depolarized sagnac fiber interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 19(2): 142–146. (in Chinese)
- 何存富, 郑兴强, 骆建伟, 等. 消偏型 Sagnac 光纤管道泄漏检测系统及其稳定性研究 [J]. 中国激光, 2012, 19(2): 142–146.
- [9] Ye Quanyi, Su Shoubao, Yang Juan, et al. Free spectral range tunable fiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optical Communication Technology*, 2015, 39(5): 37–39. (in Chinese)
- 叶全意, 苏守宝, 杨娟, 等. 自由光谱范围可调谐的 Mach-Zehnder 全光纤干涉仪 [J]. 光通信技术, 2015, 39(5): 37–39.
- [10] Urlick V J, Bucholtz F, McKinney J D, et al. Long-haul analog photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(8): 1182–1205.