# 单模光纤耦合器的传输光谱温度特性

李 彦 章 敏 李立京 杨德伟

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

**摘 要**: 在温变条件下,对光纤光源发出光波经单模光纤耦合器传输后的输出光谱进行了测试. 借助测试结果,仿真计算了耦合器的透射光波和耦合光波分别进入 Sagnac 干涉仪后干涉仪输出信号的误差随温度的变化情况. 结果表明:当环境温度发生变化时,耦合器透射光波和耦合光波的平均波长和功率都会发生变化,且透射光波的平均波长和功率的温度稳定性远远高于耦合光波的稳定性;当透射光波作为干涉仪输入光波时,由温变引起的干涉仪输出误差比耦合光波作为输入光波时的误差小一个数量级.

**关 键 词**: 光纤耦合器; 光谱; 稳定性; 光纤陀螺

**中图分类号**: O 434.19

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)06-0819-04

## Transmitting spectra-temperature characteristic of single-mode fiber coupler

Li Yan Zhang Min Li Lijing Yang Dewei

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract**: The output spectra of fiber sources which transmitted through a single-mode fiber coupler were measured by changing temperature. When the input wave of Sagnac interferometer from the fiber coupler were transmitting wave and coupling wave respectively, the temperature characteristics of signal-errors outputted from Sagnac interferometer were simulated. The above experimental results demonstrate that the output power and mean-wavelength of the spectra traveling through the arm of directly-transmission and that of the coupling of coupler will both change when the temperature changes. And the temperature-stability of output power and mean-wavelength of the directly-transmission arm is higher than that of the coupling arm. The simulated results demonstrate that the interferometer's errors caused by the light wave outputting from the directly-transmission arm of SM fiber coupler are one order smaller than that of the coupling arm.

**Key words**: fiber coupler; spectrum; stability; fiber-optic gyroscope

光纤耦合器是各种干涉型传感器和相干通信的关键器件,是构成高精度光纤陀螺的基础元件之一. 在光纤陀螺中,耦合器主要起到传输光的作用,其优劣直接影响陀螺的性能.

鉴于光纤耦合器在光纤传感和光纤通信领域中的重要作用,国内外人士对耦合器展开了各方面的研究. 文献[1-5]分别对单模光纤耦合器的耦合系数和损耗进行了理论分析. 文献[6-9]分别对耦合器的分光比、损耗和偏振特性进行了测试. 文献[10]从制作工艺的角度分析了拉锥和扭转对单模耦合器性能的影响.

以上主要对耦合器的工作原理、制作工艺及影响耦合器参数的因素进行分析,而对于耦合器传输光谱温度特性的研究迄今为止尚未见报道.

## 1 理论分析

### 1.1 光纤耦合器的耦合机理

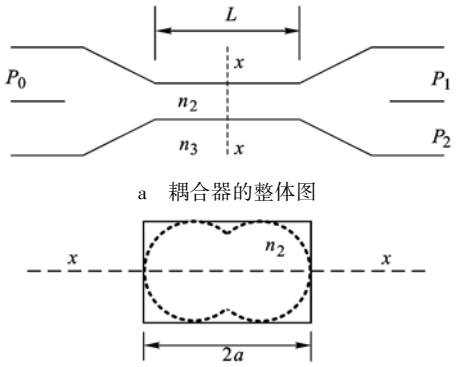
本论文的研究对象是锥体颈部区域纵向为平行线形,横向为矩形的熔融拉锥型单模光纤耦合器,如图 1 所示.

**收稿日期**: 2011-04-02; **网络出版时间**: 2012-06-15 15:44

**网络出版地址**: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120615.1544.027.html

**基金项目**: 国家自然科学基金资助项目(60207002)

**作者简介**: 李 彦(1975-),女,河北灵寿人,讲师,lettlrom@aspe.buaa.edu.cn.




a 耦合器的整体图




b 耦合器锥区横截面放大图

$L$—双锥间颈部长度;$n_2$—包层折射率;$n_3$—填充媒质的折射率;$a$—耦合器颈部最小截面尺寸;$P_0$—输入光功率;$P_1$—直通臂的输出光功率;$P_2$—耦合臂输出光功率.

图 1 纵向为平行线、横切面为矩形的熔锥型耦合器

当组成耦合器的两根光纤相同,且 $P_0 = 1$ 时,根据无损耗光波导系统中能量守恒原理,耦合器的输出功率为[11]

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \cos^2(CL) \\ P_2 &= \sin^2(CL) \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

因此耦合器的分光比为

$$R_C = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \times 100\% = \cos^2(CL) \times 100\% \tag{2}$$

式中,$C$ 为耦合系数,其表达式为

$$C = \frac{3\pi\lambda}{32 n_2 a^2} \frac{1}{1 + 1/V} \tag{3}$$

式中,$\lambda$ 为输入光波的波长;$V$ 为光纤的归一化频率,其表达式为

$$V = a k_0 (n_2^2 - n_3^2)^{1/2} \tag{4}$$

式中,$k_0 = 2\pi/\lambda$.

从分光比的理论表达式可以看出,$R_C$ 是由 $n_2, n_3, L, a, \lambda$ 等决定的,而这些参数又受外部环境因素(如温度、应力等)的影响. 当温度变化时,一方面由于热膨胀导致 $L$ 伸缩,另一方面热光效应将会引起 $n_2$ 和 $n_3$ 变化. 由式(3)得,两种效应必将引起 $R_C$ 的变化. 文献[11]指出,不仅熔锥型光纤耦合器的分光比随温度发生变化,而且附加损耗也是温度的函数,外界温度的变化直接引起两者变化. 另外,耦合器是两根光纤通过熔融拉锥的方式制成,当温度变化时,两根光纤之间的耦合将会发生变化,致使光波在直通臂和耦合臂中传输时透射光波和耦合光波传输光谱随之变化.

### 1.2 陀螺误差与耦合器输出光波的关系

在光纤陀螺中,光源发出的光经耦合器输入给 Y 波导,然后进入 Sagnac 干涉仪,如图 2 所示.

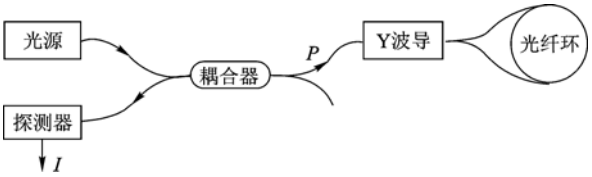



图 2 光纤陀螺的光路结构示意图

采用方波偏置方案的干涉式闭环光纤陀螺探测器的输出为[12]

$$I = K_0 P \frac{2\pi L D}{\bar{\lambda} c} \Omega \tag{5}$$

式中,$K_0 = \eta R_C 10^{-\mathrm{Loss}/10}$,$\eta$ 为探测器的比例系数,Loss 为耦合器的附加损耗;$P$ 为耦合器的输出功率,可以为图 1 中的 $P_1$ 或 $P_2$;$D$ 为光纤环的直径;$\bar{\lambda}$ 为耦合器输出光波的平均波长;$c$ 为光波在真空中的传播速度;$\Omega$ 为陀螺转动角速度. 当 $P$ 和 $\bar{\lambda}$ 为变量,$I$ 为 $P$ 和 $\bar{\lambda}$ 的函数,式(5)求全微分并化简得

$$\mathrm{d}I = I\left(\frac{\mathrm{d}P}{P} - \frac{\mathrm{d}\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}}\right) \tag{6}$$

由式(6)可得,$P$ 和 $\bar{\lambda}$ 不稳定不仅影响光纤陀螺的检测灵敏度和测量精度,而且也将导致光纤环的非互易相移产生漂移.

## 2 实验与仿真

将耦合器放入温箱中,4 根尾纤分别从温箱中伸出. 为了消除输入光偏振态的影响,耦合器的输入尾纤与 Lyot 消偏器熔接,耦合器透射光波与耦合光波的光谱分别由 86142B 型光谱仪测试,光谱仪与计算机连接,实现测试数据的自动采集,实验装置如图 3 所示. 实验中采用的光源是平均波长在 1 545 nm 附近的光纤光源.

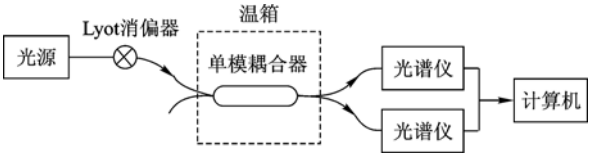



图 3 单模耦合器的传输光谱温度特性实验装置

实验采用的是大多数光纤陀螺的工作温度范围,即 $T$ 为 $-40$℃ ~ $+60$℃,升降温速率为 2℃/min,在 $-40$℃和 $+60$℃各保温 1 h,最后在 20℃保温 20 min. 由式(6)可得,在其它参数不变的情况下,影响光纤陀螺的检测灵敏度和测量精度、并导致光纤陀螺产生非互易相移漂移的因素是 $P$ 和 $\bar{\lambda}$. 因此实验中主要对这两个参数进行测试,测试结果如图 4 所示.

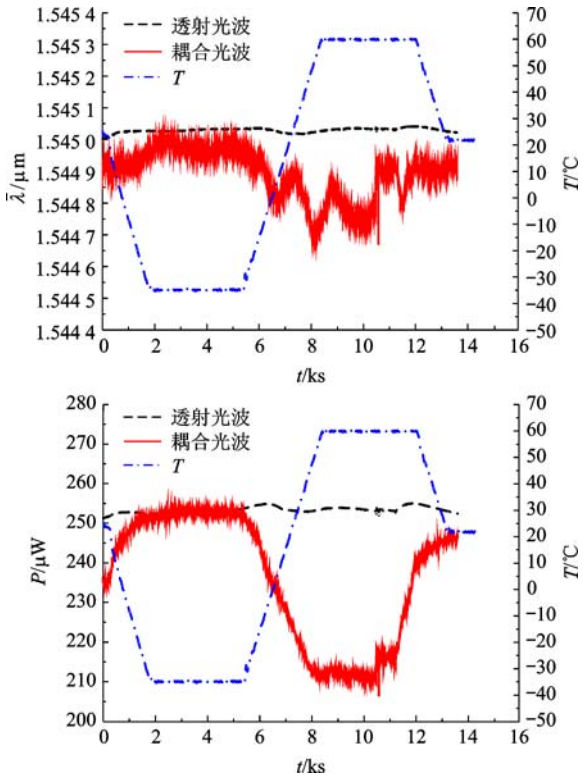



图 4　耦合器传输光谱的温度特性曲线

由图 4 可得,当 $T$ 发生变化时,耦合器透射光波和耦合光波的 $\bar{\lambda}$ 和 $P$ 也随之变化,其中耦合光波的平均波长和功率变化最大,尤其是升降温过程和高温保温段的变化尤为剧烈.

为了衡量在 -40℃ ~ +60℃范围内光谱特征参数的最大变化,对测试结果进行处理,用如下公式分别表示平均波长和功率的最大变化:

$$\Delta\bar{\lambda} = \frac{\bar{\lambda}_{\max} - \bar{\lambda}_{\min}}{\frac{\bar{\lambda}_{\max} + \bar{\lambda}_{\min}}{2}} \times 10^6 \qquad (7)$$

$$\Delta P = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{\frac{P_{\max} + P_{\min}}{2}} \times 100\% \qquad (8)$$

从透射光波和耦合光波平均波长的稳定性考虑,用式(7)进行计算可得,在 -40℃ ~ +60℃温度范围内,透射光波和耦合光波的平均波长都随温度的变化而变化,其中透射光波平均波长的最大变化为 $25 \times 10^{-6}$,耦合光波平均波长的最大变化为 $192 \times 10^{-6}$,约是透射光波平均波长变化的 8 倍,透射光波的平均波长要比耦合光波的平均波长稳定.

从透射光波和耦合光波输出功率的稳定性考虑,用式(8)进行计算可得,在 -40℃ ~ +60℃温度范围内,透射光波和耦合光波的功率都随温度的变化而发生改变,其中透射光波平均波长的最大变化为 1.3%,耦合光波功率的最大变化为 18.1%,约是透射光波功率变化的 14 倍,透射光波的功率要比耦合光波的功率稳定.

对于长度和直径分别为 1 500 m 和 10 cm 的光纤环,将耦合器输出光波的 $\bar{\lambda}$ 和 $P$ 的测试结果代入式(6),得干涉仪输出信号误差随 $T$ 的变化曲线,如图 5 所示.

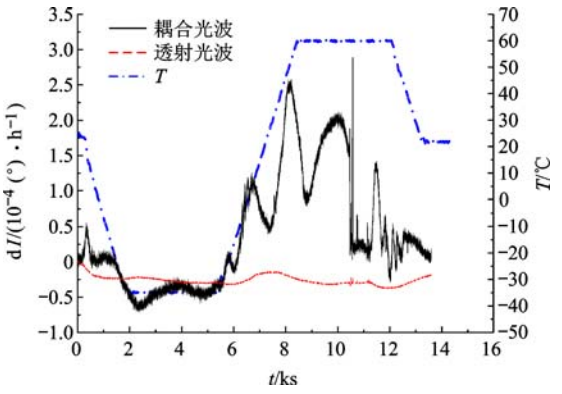



图 5　探测器输出误差与温度关系曲线

由图 5 可得,当 $T$ 发生变化时,不论输入光波是透射光波还是耦合光波,探测器输出信号的误差都随温度的变化而变化,其中耦合光波作为输入光波时,误差随温度变化较大,且在升降温过程和高温保温段变化尤为剧烈. 通过计算得透射光波和耦合光波随温度波动带来的探测器误差最大变化分别是 $3.90 \times 10^{-5}$ (°)/h 和 $3.55 \times 10^{-4}$(°)/h. 透射光波作为干涉仪输入光波时,由温度变化引起的输出误差比耦合光波作为输入光波时的误差小一个数量级.

## 3　结　论

通过实验与仿真计算得出,当温度发生变化时,①经单模光纤耦合器传输的光波,其透射光波的光谱要比耦合光波的光谱稳定;②不论是透射光波还是耦合光波,在升降温过程和高温段光谱的变化尤为剧烈;③当耦合器的输出光波作为干涉仪的输入光波时,光纤陀螺中探测器输出信号的误差随温度发生变化,其中耦合波作为输入光波时,误差随温度变化较大,且在升降温过程和高温段变化尤为剧烈.

为了降低或消除温度对单模耦合器传输光谱稳定性的影响,可以采取两个措施:①采用参数受温度影响小的单模光纤制作耦合器;②优化和完善单模耦合器的制作工艺. 另外,为了提高光纤陀螺的检测灵敏度和测量精度,以及减小光纤环的非互易相移产生的漂移,在制作陀螺时应选择耦合器的直通臂跟 Y 波导的输入尾纤连接.

## 参考文献（References）

[1] Fielding A J, Davis C C. Tapered single-mode optical fiber evanescent coupling[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(1): 53 – 55

[2] 吴晨,李荣玉,殷宗敏,等. 单模光纤耦合器耦合系数影响因素的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2003(2):14 – 15
Wu Chen, Li Rongyu, Yin Zongmin, et al. Analysis of the factors affecting the coupling ratio of single mode fiber coupler[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2003(2): 14 – 15(in Chinese)

[3] 柳春郁,余有龙,高应俊. 熔锥型光纤耦合器损耗分析[J]. 激光杂志,2004,25(5):43 – 44
Liu Chunyu, Yu Youlong, Gao Yingjun. Analysis of the excess loss of fused-tapered optical fiber coupler[J]. Laser Journal, 2004, 25(5): 43 – 44(in Chinese)

[4] 魏秀珍,赵红,李勤,等. 保偏光纤耦合器波长耦合比研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2008(1):41 – 42
Wei Xiuzhen, Zhao Hong, Li Qin, et al. Research of wavelength dependent coupling ratio of PM fiber coupler[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2008(1): 41 – 42(in Chinese)

[5] 李绪友,杨汉瑞,杨建华,等. 光纤耦合器稳定性分析及对光纤陀螺的影响[J]. 中国惯性技术学报,2010,18(2):246 – 250
Li Xuyou, Yang Hanrui, Yang Jianhua, et al. Analysis of stability of optical fiber coupler splitting ratio and its influence on FOG [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(2): 246 – 250(in Chinese)

[6] Lee S H, Song K Y, Kim B Y. Fused bitapered single-mode fiber directional coupler for core and cladding mode coupler[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(12): 2631 – 2633

[7] Yang Yuanhong, Wu Di. Experimental study on fused fiber coupler[C]// Liu Jian, Wang Zhigong. Fiber Optics and Optoelectronics for Network Applications. Nanjing, China: SPIE, 2001, 4603: 6 – 9

[8] 杨学礼,王学峰,张蔚. 单模光纤耦合器的偏振温度特性研究[J]. 光子学报,2009,38(4):841 – 846
Yang Xueli, Wang Xuefeng, Zhang Wei. Polarization-temperature characteristic of single-mode fiber coupler[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(4): 841 – 846(in Chinese)

[9] Salazar D, F lix M A, Valenzuela J, et al. Fused fiber optics couplers[C]// Brudny V L, Ledesma S A, Marconi M C. 4th Iberoamerican Meeting on Optics and 7th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications. Tandi, Argentina: SPIE, 2001, 4419: 330 – 333

[10] Anjan Y, Habbel S. Environmental performance of fused PM fiber couplers for fiber gyro Application[J]. IEEE, Photonics Technology Letters, 1991, 3(6): 578 – 580

[11] 刘新宇. 熔锥型单模光纤耦合器的传感特性研究[D]. 广东:暨南大学物理系,2006
Liu Xinyu. The sensitive characteristic of fused-tapered single mode fiber coupler[D]. GuangHong: Department of Physics, Ji'nan University, 2006(in Chinese)

[12] Lefèvre H C. The fiber-optic gyroscope[M]. London: Artech House, 1993


（编　辑:刘登敏）

（上接第 818 页）

## 4 结　论

利用指数分布模型近似计算 Weibull 分布的更新函数是比较方便的,两种模型的使用时机是:①当精确度要求较低时,直接利用指数方法进行近似计算;②当精确度要求较高,且时间较短时,可利用线性加权或几何加权进行近似计算;③当精确度要求较高,且时间较长时,可利用几何加权模型进行近似计算.

类似地,对于其它分布如对数正态分布以及 Gamma 分布等更新函数计算比较复杂的寿命分布同样可通过指数分布的近似方法来解决.


## 参考文献（References）

[1] Eric Smeitink, Rommert Dekker. A simple approximation to the renewal function[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1990, 39(1): 71 – 75

[2] McConalogue D J. Numerical treatment of convolution integrals involving distributions with densities having singularities at the origin[J]. Communications in Statistics, 1981, B10: 265 – 280

[3] Jiang R. A Gamma-normal series truncation approximation for computing the Weibull renewal function[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93: 616 – 626

[4] Jiang R. A simple approximation for the renewal function with an increasing failure rate[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95: 963 – 969

[5] Jiang R. A simple approximation for the Weibull renewal function [C]//Proceedings of the 2009 IEEE IEEM. Hong Kong: IEEE, 2009: 1146 – 1149


（编　辑:娄　嘉）