

多模液芯光纤干涉的实验研究

里佐威 韩玉华 侯兰田
(吉林大学物理系)

高淑珍
(吉林工业大学物理系)

提 要

本文介绍了多模液芯光纤干涉的一些性质,干涉条纹的最大可见度条件,给出了干涉传感的二种测量结果。

关键词: 光线理论,干涉传感,干涉条纹。

一、引 言

近年来,光纤传感技术正以惊人的速度发展着。以干涉原理为基础的传感器灵敏度极高,引起了人们的极大兴趣。其中一大类是单模光纤,由于单模光纤输出光有相同的位相和振幅,所以干涉条纹容易产生,并且条纹清晰。与单模光纤相比,多模光纤干涉是大量模之间干涉,干涉场有光斑出现^[1],干涉条纹也没有单模光纤干涉条纹那样简单和清晰。必须仔细观察才能作精确测量。然而多模光纤芯径大,便于与光源耦合;干涉场强度大,干涉条纹便于观察。因此,多模光纤干涉传感仍然引起人们的重视。本文介绍的液芯光纤具备模变换系数小^[2];保偏性好等特点。在光纤干涉传感中,与石英光纤相比就具有更多的优越性。

二、多模光纤干涉的一些性质

电磁场理论证明,阶跃型多模光纤通过逐渐改变入射光束的入射角度,可以激发出连续变化的模(模带)。每种模式有不同的传模常数,因而有不同的延迟时间,光纤的光线理论给出了(对较大芯径光纤)简单明了的结果。子午线的最小延迟时间 t_0 , 对应于入射角 $\theta=0^\circ$; 最大延拓时间 t_{\max} , 对应于入射角 $\theta_{\max}=\sin^{-1}(\sqrt{n_1^2+n_2^2}/n_1)$ 。最大延迟时间差为 $T=t_{\max}-t_0=(\sec\theta_{\max}-1)t_0=(1/2)\sin^2\theta_{\max}t_0$ ^[3]。多模光纤的这一特性,为双光路干涉中连续改变某一路程,实现不等臂光纤干涉提供了理论基础。这种不等臂干涉,不仅具有条纹容易产生 测量精度高的特点,还可以通过选用不同长度光纤,得到不同的测量精度。

Gloge 证明^[3],随着入射角的增加,光纤中激发的模式由低模转向高模,光纤输出端功率模间分布也将发生变化。在双光路干涉中,只要有一路发生这种变化,将会影响条纹质量和分布规律。多模光纤的光不是一个模 而是一个模带,高质量光纤能传播较窄的模带,窄模带容易产生清晰的干涉条纹^[3],因而,在多模光纤传感中,应选择模变换系数小的光纤。

三、双光路液芯光纤干涉最大条纹可见度的获得

选用自制的液芯光纤,采用图1所示的干涉装置。相干光源选用 He-Ne 激光器,设加补

偿片, 获得了不同入射光强, 不同背景下的最大干涉条纹可见度。

1. 相干光纤长度的选择

实验室所用的 He-Ne 激光器, 时间相干度的一般表达式为^[4]:

$$\begin{aligned} |\psi_N(\Delta l)| &= \frac{1}{N} \left| \sum_{m=1}^N \exp \left\{ \left[2m - (N+1) \frac{\pi \Delta l}{2L} \right] \right\} \right| \\ &= \frac{1}{N} \left| \exp \left[-i \frac{(N+1)\pi \cdot \Delta l}{2L} \right] \sum_{m=1}^N \exp \left(i \frac{m\pi \cdot \Delta l}{2L} \right) \right| \\ &= \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(N\pi \Delta l / 2L)}{\sin(\pi \cdot \Delta l / 2L)} \right|, \end{aligned} \quad (1)$$

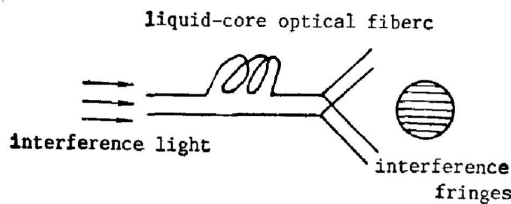


Fig. 1 Principle of liquid-core optical fiber interference

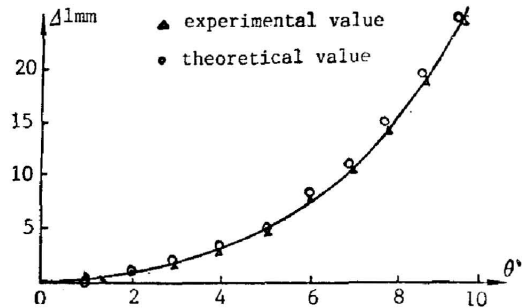


Fig. 2 Relation of incidence angle and optical path

式中 N 为激光器振荡带内所有的纵模数, L 为激光器腔长, Δl 为光程差, $\Delta l = C$ 。由(1)式可以看出, 时间相干度的模是一个以 $2L$ 为周期的周期函数。根据(1)式, 要获得最大相干度, 应该使两路光程差为 $2L$ 的整数倍。若两根相干的液芯光纤的几何长度为 l_1 、 l_2 , 光纤芯中液体折射率为 n_1 , 在光源相干长度之内, l_1 、 l_2 应近似满足下式:

$$(l_1 - l_2) n_1 / 2L = \text{整数} (0^\circ \text{角入射}), \quad (2)$$

我们用实验证明了这一结论。采用如图 1 的实验装置。两根光纤放在隔离箱内, 免受温度、振动等影响。两根光纤输出端用一放大镜观察条纹及其变化。逐渐增加光光束的入射角。这时每根光纤增加光程差为:

$$\Delta l_i = [1 - (\sin^2 \theta / n_1^2)] l_i n_1, \quad (3)$$

两根光纤实际增加光程差为:

$$\Delta l' = [(1 - \sin^2 \theta / n_1^2)^{1/2} - 1] (l_1 - l_2) n_1, \quad (4)$$

l_1' 为改变后的 l_1 的实际几何长度。为恢复最大可见度, 改变入射角 θ 后, 应该改变一根光纤长度(剪掉部分)为:

$$\Delta l = (l' - l_2) [(1 - \sin^2 \theta / n_1^2)^{-1/2} - 1] / (1 - \sin^2 \theta / n_1^2)^{-1/2}. \quad (5)$$

表 1 的实验数据和图 2 曲线证实了(5)式的正确。由表 1 和 2 图不难看出, 双光路光纤干涉

Table 1 The length variation for different incidence angle

Incidence angle	degree	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
	Δl (mm)	Exp. value	0.24	0.96	2.17	3.85	6.00	8.61	11.74	15.33	19.38
theor. value		0	1.00	2.00	4.00	6.00	9.00	12.00	16.00	20.00	24.00

条纹最大可见度要满足光程差为 $2L$ 整数倍。

此外,分别以不同角度入射两根相干光纤以及用不断改变 l_1 或 l_2 长度,直到条纹可见度最大。每次测量得到两光路光程差都可以得出以上结论。

2. 入射角 θ 的选择

可以证明,随着入射角 θ 的增加,光纤中模式由低模逐渐转向高模,输出光强分布也就越复杂。形成的干涉条纹也就不可能有简单规律,干涉传感测量也就增加了困难。当入射角 $\theta \approx 0^\circ$ 时,模间功率随角度变化最小。在实验中,我们也发现入射角为 0° 时,条纹规律性好,可见度最大。这是在干涉传感中应选用的入射角度。

3. 液芯相干光纤的选择

与石英光纤相比,液芯光纤具有传输功率大,模式少等特点。将它用于干涉传感能获得清晰明了的干涉条纹。结构为 8000 个模式的液芯光纤,由于液芯光纤的模变换系数小,可以传输单模 (HE₁₁) 超过几百米。经测试,我们研制的液芯光纤,在应用中模应换系数约为 $(2.0 \sim 6.0) \times 10^{-6} \text{ rad}^2/\text{m}$ 。与相同几何尺寸的石英光纤相比要小 1~2 个数量级。在干涉传感中,不仅应选择模变换系数小的光纤,且两光路光纤应尽可能相同,还应不受压力、不弯曲(或弯曲半径尽量大),以减少模变换系数的增加。

四、液芯光纤干涉的应用

在很多测量中,液芯光纤对外场响应灵敏,保偏性好。在干涉传感中,容易产生清晰,规律性好的干涉条纹。可以广泛地应用于各种测量。

相对光程延迟时间为 T 的两光纤干涉系统,产生的干涉条纹强度可表示为:

$$I(T) = I_0(1 + \cos 2\pi m), \quad (6)$$

整数 m 为条纹级数, $m = \nu T \circ m$ 的变化可以是光源频率 ν 的变化,也可以是 T 的变化而引起。如果 T 固定,频率变化能通过计数条纹的变化 dm 精确测量出来。

$$d\nu = dm/T, \quad (7)$$

如果 ν 固定,则条纹变化 dm 是由于 T 的变化 dT 引起。

$$dT = dm/\nu, \quad (8)$$

T 的变化可以是光程、折射率、温度、压力、磁场等变化引起的。我们通过测量条纹变化,实现对频率、位移、温度、压力、磁场等物理量的测量。

作为液芯光纤干涉传感的应用。我们测量了 He-Ne 激光器受热腔长变化所引起的频率漂移和温度变化。在这两种应用中,均采用不等臂干涉。较长光纤作为敏感元,根据测量精度的要求,选择光纤的长度。相干光束从 0° 角入射两光纤,以获得清晰条纹。

根据 (7) 式,固定 T , 就可以测量出相干光源的频率变化。我们以待测的 He-Ne 激光器作相干光源。两相干光纤放在隔离箱内,免受外场影响,以保证 T 不变化。经测量,He-Ne 激光器受热腔长总变化和频率漂移为 10^{-3} cm 和 10^6 Hz 。可以相信,适当加长液芯光纤长度,采用电子学方法处理信号,测量精度提高到 10^{-4} \AA 和 10^8 Hz 以上是可能的^[5]。

液芯光纤对温度影响极为灵敏。温度的微小变化,就会引起折射率较大变化。从而引起相对延迟时间 T 的变化。根据 (8) 式,由条纹变化,就可测出温度的变化。我们测出了

$10^{-4} \sim 10^{-5}^{\circ}\text{C}$ 的温度变化量。若加长灵敏元光纤长度, 进一步处理测量信号, 则可以测量出 $10^{-7} \sim 10^{-9}^{\circ}\text{C}$ 的温度变化量。

五、结 论

多模光纤可以构成双光路不等臂干涉仪。在测量中, 可以根据精度的需要, 选择相干光纤长度。多模光纤干涉, 要注意到模延迟引起的附加光程差。干涉条纹的质量, 与入射光束和光纤轴线所成的角度 θ 有关, $\theta=0^{\circ}$ 时, 条纹质量高。

液芯光纤具有一些石英光纤不具备的特点。液芯光纤芯内液体物理性质均匀, 无内应力, 保偏性好, 模变换系数小, 能传输窄模带。在干涉传感中, 既容易产生清晰的干涉条纹又容易与光源耦合。视场强度大, 便于观察。制造液芯光纤的液体, 对温高、压力、磁场等影响敏感。使光纤传感测量有很高的精度。液芯光纤传感具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Chandrasekhar Roychoudhuri; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 12 (Jun), 1903~1906.
- [2] Takanori O-Kashi; *Optical Fiber*, (Orlando, San Dngo, New York, 1982), 39.
- [3] W. A. Gambling; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 7 (Jul), 1538~1542.
- [4] 印建平; *光学学报*, 1987, **7**, No. 4 (Apr), 341~345.
- [5] A. Papp, H. Harms; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, No. 5 (May), 1315~1319.

A experimental study on interferometry of mul-timodal liquid-core optical fiber

LI ZOUWEI, HAN YUHUA AND HOU LANTIAN

(Department of Physics, Jilin University, Changchun)

GAO SHUQIN

(Jilin University of Technology, Changchun)

(Received 12 October 1987; revised 30 January 1988)

Abstract

This paper describes the properties of interferometer of the mul-timodal liquid-core optical fiber and indicates the condition of the maximal visibility of interference fringe. Two examples of measured results of interference sensing are given.

Key words: ray theory; interference sensing; interference fringe.