

偏振模耦合分布式光纤传感器空间分辨率研究^{*}

周晓军[†] 杜 东 龚俊杰

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术重点实验室, 成都 610054)

(2004 年 5 月 31 日收到, 2004 年 9 月 27 日收到修改稿)

分析了偏振模耦合原理的分布式光纤传感器的自相干与互相干光, 实验测量的干涉光证明了理论分析是正确的, 利用偏振模耦合原理传感与白光干涉检测的分布式光纤传感器的空间分辨率是由光纤偏振色散系数与光源的谱宽决定的, 由实验测量的偏振模耦合分布式光纤传感器的空间分辨率为 6cm.

关键词: 光纤传感器, 保偏光纤, 空间分辨率, 偏振模耦合

PACC: 4281, 4281P, 4225J, 4225K

1. 引 言

偏振模色散是光纤通信传输速率大于 10Gb/s 时限制系统发展的一个重要因素, 已有不少学者进行了深入研究^[1,2]. 然而光纤的偏振模色散特性受到环境压力、温度等因素的影响, 因此利用光纤的偏振模色散特性可以制成高性能的传感器, 其原理是外界压力、温度场的扰动下, 高线双折射光纤(例如椭圆芯光纤、熊猫光纤和蝴蝶结光纤等)的纤芯折射率或应力面上应力会发生变化, 改变光纤原有的双折射特性, 使两个本征线偏振模 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模之间发生模式耦合. 利用干涉仪检测出偏振模的耦合光功率, 可对温度、压力传感^[3-5]. 单点光纤偏振模耦合温度、压力传感器的稳定性优于相位型光纤传感器. 例如偏振模耦合的压力传感器, 可用主轴旋转 90° 的保偏光纤作为温度补偿, 实现对压力的绝对测量, 并且对激光器与引导光纤的光漂移不灵敏^[6]. 近年来, 单点光纤传感器又向单点传感器串联、并联的准分布传感器阵列发展^[7].

另一方面, 人们也在探索利用长保偏光纤的分布式偏振模耦合的光纤传感器. 这种分布式光纤传感器比基于散射机理的 OTDR, BOTDR 及 Raman 散射的分布传感器有更高的空间分辨率. Chen 等人研究了具有温度补偿作用的光纤位置传感器^[8]; Saida 等人研究了采用合成相干函数方法的分布式光纤压

力传感器^[9]; Rogers 等研究了同时测量压力和温度的偏振相干分布式光纤传感器^[10]. 本文将通过理论分析与实验测量研究偏振模耦合分布式光纤传感器的空间分辨率, 以及改善空间分辨率的方法.

2. 理论分析

偏振模耦合分布式光纤传感器利用被测量引起的偏振模耦合效应传感、利用白光干涉原理检测传感信号. 白光干涉仪通常由两个干涉仪串联组成, 一个是信号干涉仪, 另一个是接收干涉仪. 由于保偏光纤的两个本征偏振模式 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y 模具有不同的群速度, 通过同样长度保偏光纤后两个模式之间的光程差正比于群速度差, 因此可将保偏光纤看作信号干涉仪. 在保偏光纤的末端可用一迈克耳孙干涉仪检测分布传感信息.

偏振模耦合分布传感器如图 1 所示. 光源为一宽谱的超辐射发光二极管(SLD). 光从 SLD 尾纤输出经光纤起偏器成为线偏振光后进入保偏光纤, 再经透镜聚焦后送入迈克耳孙干涉仪. 干涉仪检测沿光纤主轴之一偏振的线偏振光, 经放大后输出信号. 步进电机在控制系统作用下带动迈克耳孙干涉仪可动臂扫描, 检测沿光纤各点的压力引起的偏振模耦合产生的相干光强.

保偏光纤末端输出的沿光纤主轴(y 轴)偏振的光波电场为

^{*} 总装备部预研基金(批准号 5140204010102)资助的课题.

[†] E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

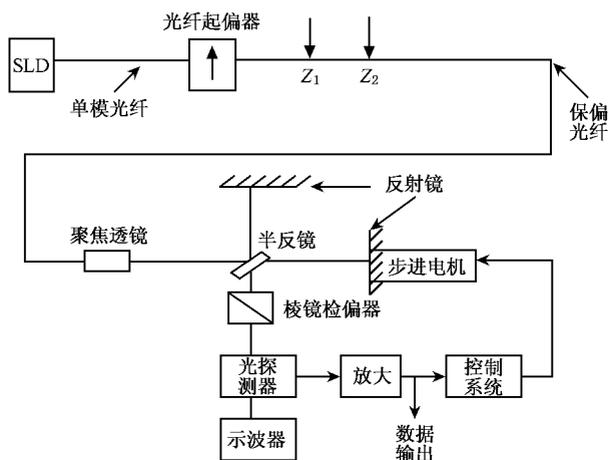


图1 偏振模耦合分布式光纤传感器

$$E_y = E_{yy} + E_{xy}, \quad (1)$$

式中 E_{yy} 是保偏光纤输入为 HE_{11}^x 模输出仍为 HE_{11}^x 模的光波电场, E_{xy} 是输入为 HE_{11}^x 模, 由于光纤在某点受到压力扰动, 从 HE_{11}^x 模耦合到 HE_{11}^y 模的光波电场. 设迈克耳孙干涉仪两臂光程差产生的时延差为 τ , 光探测器得到的干涉光强为

$$I = \frac{I_0}{2} + \frac{1}{2} \text{Re} [E_{yy}(t) \cdot E_{yy}^*(t + \tau) + E_{xy}(t) \cdot E_{xy}^*(t + \tau) + E_{xy}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau) + E_{yy}^*(t) \cdot E_{xy}(t + \tau)], \quad (2)$$

上式包含了本征模的自相干(式中第一项)、耦合模的自相干(式中第二项)和耦合模的互相干(式中第三、四项)。

2.1. 自相干光

如果迈克耳孙干涉仪两臂的时延差远小于光源的相干时间 τ_c ($\tau \ll \tau_c$), 且受力点两个本征模的时延差远大于迈克耳孙干涉仪两臂的时延差

$$\left| \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} \right| z \gg \tau \quad (3)$$

时, 不存在耦合模电场 E_{xy} 与本征模电场 E_{yy} 之间的互相干, 光探测器接收的干涉光强为本征模自相干与耦合模自相干之和, 即

$$I = \frac{I_0}{2} + \frac{1}{2} \text{Re} [E_{yy}(t) \cdot E_{yy}^*(t + \tau) + E_{xy}(t) \cdot E_{xy}^*(t + \tau)]. \quad (4)$$

通常外界压力等物理量引起的模式耦合很弱, 耦合模的自相干光比本征模自相干光小得多, 可忽略式中最后一项。

2.2. 互相干光

当如果迈克耳孙干涉仪两臂的时延差远大于光源的相干时间 τ_c ($\tau \gg \tau_c$), 并且满足

$$\left| \frac{d\beta_x}{d\omega} - \frac{d\beta_y}{d\omega} \right| z \approx \tau \quad (5)$$

时, 则只存在耦合模电场与本征模电场之间的互相干

$$I = \frac{I_0}{2} + \frac{1}{2} \text{Re} [E_{xy}(t) \cdot E_{yy}^*(t + \tau) + E_{yy}^*(t) \cdot E_{xy}(t + \tau)]. \quad (6)$$

迈克耳孙干涉仪可动臂扫描时将出现沿光纤各点分布的互相干光. 令 $t + \tau = \tau'$ 代入(6)式, 其第二项变为 $E_{yy}^*(\tau' - \tau) \cdot E_{xy}(\tau')$ 是比(6)式第一项提前时间 τ 的互相干光. 因此, 扫描探测的互相干光的位置应是对称于自相干光的。

2.3. 迈克耳孙干涉仪的输出光

迈克耳孙干涉仪活动臂在平衡位置附近扫描, 光程差为零的点附近为自相干光,

$$I_s = \text{Re} [E_{yy}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau)] = \cos(\omega_0 \tau) \exp\left(-\frac{\tau^2 \Delta\omega^2}{2}\right), \quad (7)$$

设光纤所受扰动很小, 模式耦合系数 ϵ 很小, 光纤受力点在 z 处时互相干光强为^[11]

$$I_m = \text{Re} [\langle E_{xy}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau) \rangle] = \sqrt{\epsilon} \cos(2\pi z/L_B - \omega_0 \tau) \exp\left(-\frac{S^2 \Delta\omega^2}{2c^2}\right), \quad (8)$$

$$S = \left(\frac{\partial \beta_x}{\partial \omega} - \frac{\partial \beta_y}{\partial \omega} \right) z c - c\tau = (Dz - \tau)c, \quad (9)$$

式中 L_B 和 D 是光纤的拍长和偏振色散系数, ω_0 和 $\Delta\omega$ 是光源的中心频率和谱宽, c 是光速。

在距离光纤尾端 25cm 处加一压力, 一部分 HE_{11}^x 模耦合为 HE_{11}^y 模. 设耦合系数为 0.15, 根据(7)–(9)式计算的干涉仪输出自相干光(光程差为零处)和互相干光(光程差为 $\pm 46\mu\text{m}$ 处)如图 2 所示。

2.4 空间分辨率

偏振模耦合分布式光纤传感器的空间分辨率 Δz 定义为最大光强下降到 $1/e$ 的距离^[11]

$$\Delta z = \frac{\lambda^2}{\sqrt{2\pi Dc\Delta\lambda}}. \quad (10)$$

图 3(a)为光源波长为 1310nm 时, 空间分辨率与光源

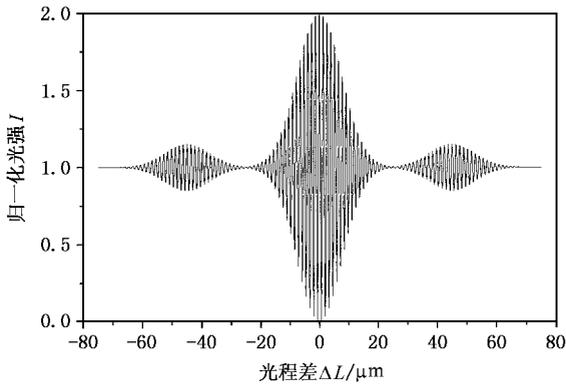


图 2 自相干光与偏振模耦合引起的互相干光

谱宽、偏振色散系数的关系;图 3(b)是光源线宽为 40nm 时,空间分辨力与光源波长、偏振色散系数的关系.在光源波长一定的条件下,光源谱线宽空间分辨力高体现了白光干涉的特点,偏振色散系数大空间分辨力高则反映了耦合模与本征模之间的干涉.

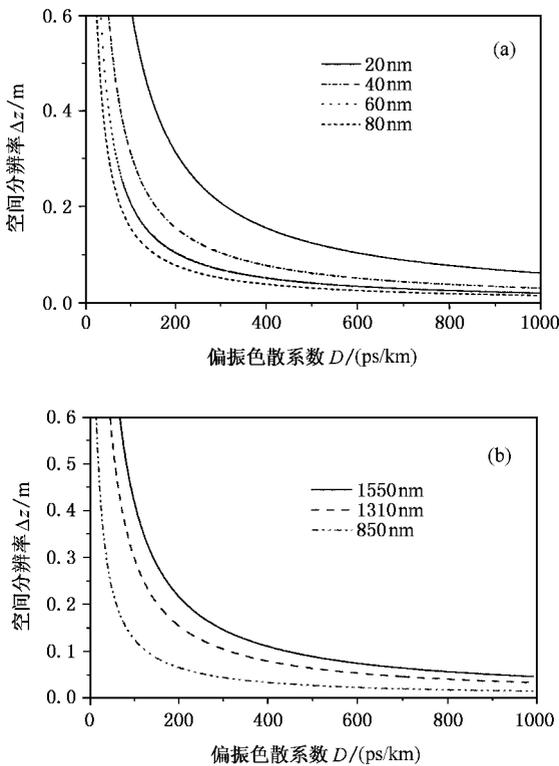


图 3 偏振模耦合分布式光纤传感器的空间分辨力 (a)光源谱宽不同 (b)光源波长不同

2.5. 被测量分布信号的检测

保偏光纤上某点受到外界压力或温度作用时,两正交偏振模发生模式耦合.在弱耦合条件下耦合系数 ϵ 是正比于外力的,传感器输出的互相干光

强与外力呈正比关系.设保偏光纤长度为 L ,外界受力点与输入端的距离为 z .本征模 HE_{11}^y 模到达保偏光纤输出端的时延为 $L \frac{d\beta_y}{d\omega}$,在 z 点耦合模(HE_{11}^x 模 $\rightarrow HE_{11}^y$ 模)到达输出端的时延为 $z \frac{d\beta_x}{d\omega} + (L - z) \frac{d\beta_y}{d\omega}$.对不同的受力点耦合模时延差不同.传感器控制系统发出扫描信号带动步进电机使迈克耳孙干涉仪可动臂逐点扫描,得到的是整个光纤上被测量的分布信息.通常压力产生的模式耦合效应比温度产生的模式耦合强得多.假设整个光纤处于同样温度下,在光纤始端与尾端分别设置固定压力,并以此两点的输出互相干光作为参考信号可以消除温度对压力测量的影响,解决交叉敏感问题.

3. 实 验

实验装置如图 1 所示,光源 SLD 的中心波长为 1294nm,线宽 36nm.保偏光纤长 20m,拍长 3mm,偏振色散系数约为 600ps/km.迈克耳孙干涉仪在光程差为零附近匀速移动由示波器记录的自相干光如图 4 所示.

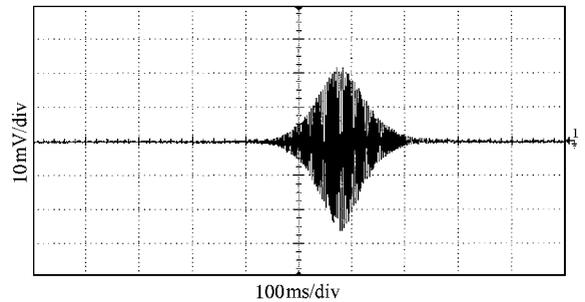


图 4 自相干光(示波器为交流耦合方式,纵坐标:10mV/div,横坐标:100ms/div)

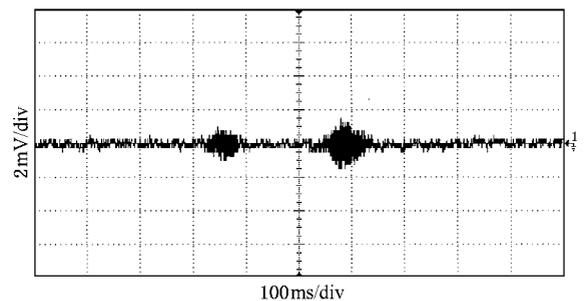


图 5 受力点相距 20cm 的互相干光(示波器为交流耦合方式,纵坐标:2mV/div,横坐标:100ms/div)

在光纤上两个相距 20cm 的点上加 2.95N/mm 的压力,用示波器记录的互相干光如图 5 所示,示波器上可以清楚地区分两受力点.当两个受力点相距

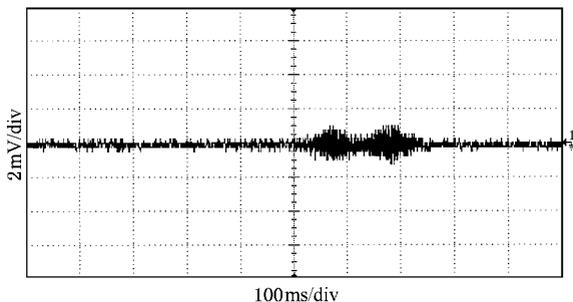


图 6 受力点相距 8cm 的互相干光(示波器为交流耦合方式,纵坐标 2mV/div,横坐标 100ms/div)

8cm 时互相干光如图 6 所示,此时虽然可以分辨两受力点,但互相干光已开始重叠.按照定义,空间分辨率约为 6cm.

4. 结 论

分析了保偏光纤受外界压力或温度作用引起偏振模耦合在白光干涉仪产生的自相干与互相干现象.这种互相干现象可作为一种分布式光纤传感器.对光纤施加压力实验结果表明偏振模耦合分布式光纤传感器空间分辨率可达 6cm,是各种分布式光纤传感器中最高的.增加光源谱宽或使用偏振色散系数大的保偏光纤可增加空间分辨率.

[1] Wang M G , Li T J and Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2818 [in Chinese] [王目光、李唐军、简水生 2003 物理学报 **52** 2818]
 [2] Wu C Q , Fu S N , Dong H and Liu H T 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2542 [in Chinese] [吴重庆、付松年、董 晖、刘海涛 2002 物理学报 **51** 2542]
 [3] Bock K J , Domanski A W and Wolinski T R 1990 *Appl. Opt.* **29** 3484
 [4] Bock K J , Urbanczyk W , Buczynski R and Domanski A W 1994 *Appl. Opt.* , **33** 6078
 [5] Fontaine M , Wu B , Tzolov V P , Bock W J , Urbanczyk W 1996 *J. lightwave Technology* **14** 565

[6] Bock K J , Urbanczyk W , Wojcik J and Fontaine M 1995 *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement* **44** 694
 [7] Bock K J and Urbanczyk W 2000 *IEEE trans. Instrumentation and Measurement* **49** 392
 [8] Chen S *et al* 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 261.
 [9] Saida T and Hotate K 1997 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **9** 484.
 [10] Rogers A J 1998 *Phys. Lett.* **169** 99
 [11] Zhou X , Gong J , Liu Y and Zhou J 2004 *Acta Opt. Sin.* **24** [in Chinese] [周晓军、龚俊杰、刘永智、周建华 2004 光学学报 **24** 1]

Study on spatial resolution of polarized-modes coupling distributed fiber optic sensor^{*}

Zhou Xiao-Jun[†] Du Dong Gong Jun-Jie

(*Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks ,
University of Electronic Science and Technology of China ,Chengdu 610054 ,China*)

(Received 31 May 2004 ; revised manuscript received 27 September 2004)

Abstract

Phenomena of self-coherence and mutual-coherence of the distributed fiber optic sensor based on the principle of polarized-mode coupling are analyzed. The interference characteristics measured by experiment validate the theoretical analysis. The spatial resolution of the distributed fiber optic sensor is determined by the polarized dispersion coefficients of polarization-maintaining fiber and the spectral width of the light source. The spatial resolution of the polarized-modes coupling distributed fiber optic sensor measured by experiment is 6cm.

Keywords : fiber optic sensors , polarization-maintaining optical fiber , spatial resolution , polarized-modes coupling

PACC : 4281 , 4281P , 4225J , 4225K

^{*} Project supported by the pre-research foundation of ministry of accoutrements (No. 5140204010102).

[†] E-mail : xjzhou@uestc.edu.cn