

文章编号: 0253-2239(2004)05-605-4

白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器分析*

周晓军 龚俊杰 刘永智 周建华

(电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 成都 610054)

摘要: 分布式光纤传感器能够测量沿光纤长度上连续分布的外界量。用保偏光纤作为传感光纤的分布式光纤传感器,被测外界量引起保偏光纤中传播的两正交偏振模的相互耦合。用迈克尔逊干涉仪两臂光程差来补偿两个偏振模的光程差的方法探测传感信号。为了设计白光干涉偏振模耦合分布式传感器,根据统计光学原理分析了传感器的互相干特性。在此基础上分析了传感器的空间分辨力、光纤耦合点分辨力、最大传感光纤长度。波长 1310 nm、谱宽 36 nm 的超辐射发光二极管(SLD)作光源,用色散参量为 600 ps/km,拍长 3 mm 的保偏光纤的分布传感器空间分辨力和光纤耦合点分辨力分别为 6 cm 和 3 mm。

关键词: 光纤光学; 分布式光纤传感器; 偏振模耦合; 白光干涉; 空间分辨力
中图分类号: TN29 文献标识码: A

Analysis of White-Light Interference Distributed Optic Fiber Sensor by Polarized Modes Coupling

Zhou Xiaojun Gong Junjie Liu Yongzhi Zhou Jianhua

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

(Received 4 March 2003; revised 20 May 2003)

Abstract: The distributed optical fiber sensors can measure the environment factors which continuously distributed along a length of optical fiber. For a distributed fiber sensor taking a polarization-maintaining fiber as sensing fiber, the environment factors induce the orthogonal polarization modes propagated in the fiber coupling each other. The sensing signal is detected by means of compensating the optical path difference of the two orthogonal polarization modes by two arms path difference of Michelson interferometer. In order to design white light interference distributed optical fiber sensor by polarized modes coupling, the mutual coherent characteristics of the sensor were analyzed according to the principle of statistic optics. On these bases, the length resolution, fiber coupling point resolution and maximum sensing fiber spatial of the sensor were obtained. The length resolution and the coupling point resolution are 6 cm and 3 mm respectively for a distributed optical fiber sensor with a superradiant light-emitted diode(SLD) source of center wavelength 1310 nm, spectral width 36 nm and a polarization-maintaining fiber of polarization dispersion coefficient 600 ps/km and beat length 3 mm.

Key words: fiber optics; distributed fiber sensor; polarization mode coupling; white-light interference; spatial resolution

1 引 言

采用低相干光源的白光干涉仪与高相干光源干

涉系统相比,不仅可对物理量绝对测量,而且传感的动态范围大,分辨力高。在研究及发展白光干涉测量方面人们进行了大量的研究工作。最近,白光干涉在光纤传感技术、光纤色散测量、保偏光纤器件测量、表面形貌测量、群折射率测量中得到成功的应用^[1~6]。为了使干涉信号零级条纹与次级极大条纹的强度差

* 总装备部预研基金资助课题。

E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

收稿日期:2003-03-04;收到修改稿日期:2003-05-20

变大,研究了白光干涉多光源波长组方法^[7]。

白光干涉系统采用低相干光源,将不平衡的干涉仪光程看作对光的一种调制。解调方法可分为两类:一类是对测量干涉仪输出的信号作频谱分析,以得到传感量信息。这类方法需要复杂的信号分析系统。另一类是采用解调干涉仪的方法,例如采用迈克尔逊干涉仪。通过改变解调干涉仪两臂光程差来补偿测量干涉仪的光程差,并通过输出干涉光强的位置与幅度得到传感量沿光纤的分布^[8]。本文根据统计光学理论分析后者作为分布式光纤传感器的空间分辨力、耦合点分辨力和最大传感光纤长度。

2 白光干涉分布式光纤传感器系统与原理

通常白光干涉仪由测量与解调两个干涉仪组成。利用解调干涉仪补偿测量干涉仪的光程差,得到干涉信号^[9]。保偏光纤中传播的 HE_{11}^x 模和 HE_{11}^y

模传播速度不同。 HE_{11}^y 模到达长度为 L 的光纤终点所需时间为 $L \frac{d\beta_y}{d\omega}$, 光纤上 z 点由于压力等传感量使 HE_{11}^x 模向 HE_{11}^y 模耦合, 耦合模到达终点所需时间为 $z \frac{d\beta_x}{d\omega} + (L-z) \frac{d\beta_y}{d\omega}$ 。当迈克尔逊干涉仪两臂的时延差, 抵消掉 HE_{11}^y 模与耦合模的时延差时, 探测器可检测出互相干信号。白光干涉分布式光纤传感器系统如图 1 所示。光源为超辐射发光二极管发出的光束经过起偏器 P1 后, 以与 x 轴 45° 角射入保偏光纤, 检偏器 P2 的透光轴方向平行于 y 轴方向。经过 P2 后沿 y 轴偏振的光波电场为

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

E_{yy} 是保偏光纤输入端和输出端均为 HE_{11}^y 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应力扰动, 一部分 HE_{11}^x 模耦合为 HE_{11}^y 模的光波电场。在保偏光纤作用点上耦合模功率正比于外加应力大小, 作用点位置由迈克尔逊干涉仪活动臂位置确定。

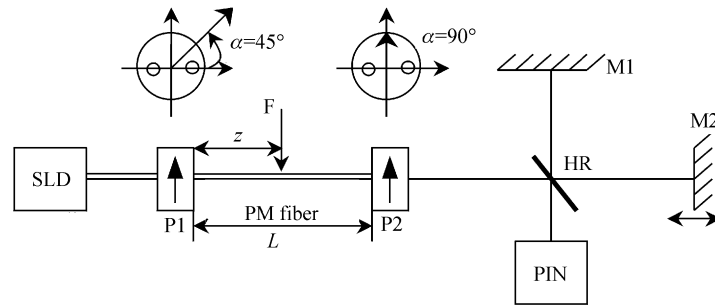


Fig. 1 White-light interference distributed optical fiber sensor by polarized modes coupling. SLD: Superradiant light-emitted diode, HR: half reflective mirror; PIN: PIN photodiode; PM fiber: polarization-maintaining fiber

设迈克尔逊干涉仪半反镜 HR 中心到反射镜 M1、M2 的距离分别为 L_1 和 L_2 。迈克尔逊干涉仪两臂时延差为 $\tau = 2(L_1 - L_2)/c$ 。由于保偏光纤输

出端有一平行于 y 轴的检偏器, 输入端 HE_{11}^x 模光强为 $I_0 = E_y \cdot E_y^*$ 时, 光探测器 PIN 得到的光强为^[8]

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

考虑 $\tau \gg \tau_c$ (光源的相干时间) 的情况, 式中自相干项 $E_{yy}(t) \cdot E_{yy}^*(t + \tau)$ 和 $E_{xy}(t) \cdot E_{xy}^*(t + \tau)$ 为零, 只有在互相干光

$$I = I_0/2 + \text{Re}[\langle E_{xy}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau) \rangle]/2. \quad (3)$$

3 偏振模耦合产生的互相干

将长度为 l 的光纤分为 N 段, 每段长度为 Δz 。外

力分别作用在 N 段光纤上, 整个光纤上耦合模电场为 N 段光纤上产生的耦合效应之和, 因此, 互相干信号由光强的时间平均给出^[1]

$$I = \text{Re}[\langle E_{xy}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau) \rangle] = \text{Re}[\langle \sum_{i=1}^N E_{xyi}^*(t) \cdot E_{yy}(t + \tau) \rangle], \quad (4)$$

设光源功率谱为高斯分布

$$P(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\Delta\omega} \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{2\Delta\omega}\right] = |Q(\omega)|^2, \quad (5)$$

用 ϵ_i 表示第 i 段光纤的功率模耦合系数, 通常 ϵ_i 是与应力等传感量成正比的。 z_i 是第 i 段光纤的中心

点, E_{xyi} 是第 i 段光纤 HE_{11}^x 模向 HE_{11}^y 模转移的光波电场。时域光波电场可表示为频域光波电场的反傅氏变换。因此, 光波电场可表示为

$$\begin{cases} E_{xyi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{\epsilon_i}{1-\epsilon_i}} \prod_{n=1}^N \sqrt{1-\epsilon_n} \int_0^\infty Q(\omega) \exp\{-i[\beta_x z_i + \beta_y(L-z_i) - \omega(t-2L_1/c)]\} d\omega, \\ E_{yy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \prod_{n=1}^N \sqrt{1-\epsilon_n} \int_0^\infty Q(\omega) \exp\{-i[\beta_y L - \omega(t-2L_2/c)]\} d\omega, \end{cases} \quad (6)$$

式中 β_x 和 β_y 分别为保偏光纤 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 模的传播常量, 将(5)式、(6)式代入(4)式得到

$$\begin{aligned} I = \text{Re} \left[\left\langle \sum_{i=1}^N E_{xyi}^*(t) \cdot E_{yy}(t+\tau) \right\rangle \right] &= \frac{1}{2\pi} \text{Re} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{\epsilon_i}{1-\epsilon_i}} \prod_{n=1}^N (1-\epsilon_n) \times \\ &\int_0^\infty \left\{ \int_0^\infty Q(\omega) \exp\{i[(\beta_x - \beta_y)z_i + \omega 2L_1/c]\} d\omega \int_0^\infty Q(\omega') \exp(-i\omega' 2L_2/c) \exp[i(\omega - \omega')] d\omega' \right\} dt = \\ &\text{Re} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{\epsilon_i}{1-\epsilon_i}} \prod_{n=1}^N (1-\epsilon_n) \int_0^\infty P(\omega) \exp[i(\beta_x - \beta_y)z_i - \omega\tau] d\omega, \end{aligned} \quad (7)$$

上式推导利用了关系 $\frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \exp[i(\omega - \omega')t] dt = \delta(\omega - \omega')$ 和 $\int_0^\infty f(\omega') \delta(\omega - \omega') d\omega' = f(\omega)$ 。将 β_x 和 β_y 按光源功率谱中心角频率 ω_0 展开, 忽略高阶项, 得到

$$\beta_x = \beta_{x0} + \left. \frac{\partial \beta_x}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0), \quad \beta_y = \beta_{y0} + \left. \frac{\partial \beta_y}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0), \quad (8)$$

代入(7)式得到

$$\text{Re} \left[\left\langle E_{xyi}^*(t) \cdot E_{yy}(t+\tau) \right\rangle \right] = \sqrt{\frac{\epsilon_i}{1-\epsilon_i}} \prod_{n=1}^N (1-\epsilon_n) \cos[(\beta_{x0} - \beta_{y0})z_i - \omega_0\tau] \exp\left(-\frac{S_i^2 \Delta\omega^2}{2c^2}\right), \quad (9)$$

$$S_i = (\partial\beta_x/\partial\omega - \partial\beta_y/\partial\omega)z_i c - c\tau = (Dz_i - \tau)c, \quad (10)$$

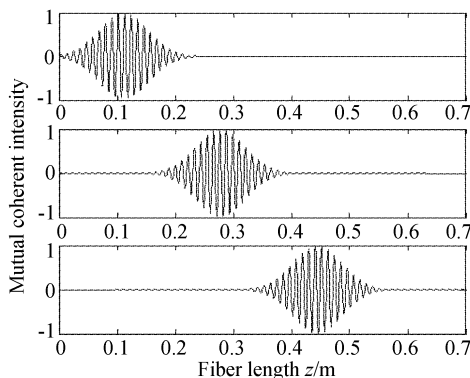


Fig. 2 The mutual coherent intensity of Michelson interferometer

对每段光纤都存在一平衡点, 干涉仪时延差满足 $\tau_i = Dz_i/c$, 即 $S_i = 0$ 。在此点干涉仪信号最大, 对应此点的光纤坐标和干涉仪光程差(时延差)分别为 z_i 和 $\Delta L_i(\tau_i)$ 。 N 段光纤对应迈克尔逊干涉仪 N

个平衡点, 有 N 个最大值。图 2 表示了光源中心波长为 $1.31 \mu\text{m}$, 谱宽为 36 nm , 保偏光纤偏振色散系数 600 ps/km , 干涉仪光程差为 $20 \mu\text{m}$ 、 $60 \mu\text{m}$ 、 $100 \mu\text{m}$ 时的互相干光强。

4 白光干涉分布式光纤传感器的分辨力

4.1 空间分辨力

对每段光纤的中心点 z_i , 干涉仪反射镜 M2 可以找到适当的位置使 $S_i = 0$, 使干涉仪输出的包络达到最大值。当光纤输入沿 y 偏振的 HE_{11}^y 模, 光纤上没有施加应力等物理量不存在模耦合时, 在相干时间内, 输出只有自相干信号, 由(6)式第二式得到

$$I_s = \text{Re} \left[\left\langle E_{yy}^*(t) \cdot E_{yy}(t+\tau) \right\rangle \right] = \prod_{n=1}^N (1-\epsilon_n) \cos(\omega_0\tau) \exp\left(-\frac{\tau^2 \Delta\omega^2}{2}\right), \quad (11)$$

在干涉仪两臂的平衡点上, $\tau = 0$

$$I_s = \prod_{n=1}^N (1 - \epsilon_n), \quad (12)$$

归一化互相干光强为

$$\frac{I}{I_s} = \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{\epsilon_i}{1 - \epsilon_i}} \cos[(\beta_{x0} - \beta_{y0})z_i - \omega_0 \tau] \times \exp(-S_i^2 \Delta\omega^2 / 2c^2), \quad (13)$$

当反射镜扫描时,对应 $S_i = 0$ 的点,归一化光强包络有 N 个离散的最大值点。定义空间分辨力 Δz_s 为 $S_i = 0$ 的点到归一化光强包络下降为 $1/e$ 点的距离,则得到空间分辨力

$$\Delta z_s = \sqrt{2}/D\Delta\omega = \lambda^2 / \sqrt{2}\pi Dc \Delta\lambda. \quad (14)$$

空间分辨力与光纤的偏振色散系数 D 和光源中心波长的平方呈反比关系,与光源的谱宽 $\Delta\lambda$ 呈正比关系。图 3 给出了超辐射发光二极管中心波长为 $1.31 \mu\text{m}$,谱宽分别为 20 nm , 40 nm , 60 nm , 80 nm 传感器空间分辨力与光纤偏振色散系数的关系。

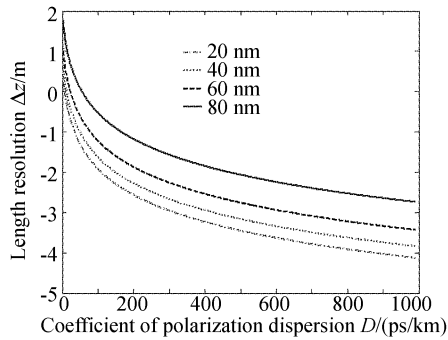


Fig. 3 The relationship of the spatial resolution of the distributed fiber sensor with the coefficient of the polarization dispersion of PM fiber and the spectral width of the source

4.2 光纤耦合点分辨力

在各个平衡点 $S_i = 0$ 附近,互相干光强是周期变化的。峰值互相干光强在一个周期内变化,耦合点分辨力为

$$\Delta z_T = 2\pi / |\beta_x - \beta_y| = L_B, \quad (15)$$

耦合点分辨力由保偏光纤的拍长 L_B 决定。

4.3 最大传感光纤长度

对于特定的光纤,最大传感光纤长度由迈克尔逊干涉仪两臂的最大光程差决定 ΔL_{\max} ,

$$z_{\max} = \Delta L_{\max} / Dc, \quad (16)$$

式中 D 是光纤的色散系数, c 是光速。

结论 根据统计光学推导了白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器输出的互相干光强的表达式,分析了传感器的空间分辨力、耦合点分辨力和最大传感

光纤长度。将传感光纤分为 N 段,每段长度为 Δz_s ,迈克尔逊干涉仪活动臂在对应的平衡点附近扫描可得到互相干光强。白光干涉偏振模耦合分布式光纤传感器对物理量及位置的测定需要确定中心干涉条纹的位置与幅度。如果采用谱宽 36 nm 中心波长 $1.31 \mu\text{m}$ 的超辐射发光二极管作光源,用色散参量 D 为 600 ps/km ,拍长 L_B 为 3 mm 的保偏光纤作传感光纤。根据以上分析空间分辨力为 6 cm ,对应的迈克尔逊干涉仪光程差 $10 \mu\text{m}$;光纤耦合点分辨力 3 mm ,对应的光程差 $0.54 \mu\text{m}$ 。对于直接用迈克尔逊干涉仪检测的传感器系统要求反射镜机械扫描精度十分高,以中心条纹用十个点分辨计算,扫描精度需 $0.054 \mu\text{m}$ 。这样的机械扫描精度是很难达到的,可以在迈克尔逊干涉仪上用 CCD 扫描^[10] 或移频器^[1] 的方法获得中心条纹的精确位置与幅度。

参 考 文 献

- 1 Tsubokawa M, Higashi T, Negishi Y. Mode couplings due to external forces distributed along a polarization-maintaining fiber: an evaluation. *Appl. Opt.*, 1988, **27** (1):166~173
- 2 Wang Tao, Zhou Kejiang, Ye Wei *et al.*. Interferometric measurement of polarization distribution in fiber. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(6):737~740 (in Chinese)
- 3 Zhang Jinghua. Application of white-light interference in measurement and principal axis alignment of polarization-maintaining fibers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(12):1308~1311 (in Chinese)
- 4 Zhou Kejiang, Wang Tao. Research on fiber white-light interferometer. *Laser & Infrared*, 1997, **27** (8): 242~244 (in Chinese)
- 5 Zhou Mingbao, Lin Dajian, Gao Lvrong *et al.*. Expanding depth measurement rang by white-light phase-shift interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20** (8):1065~1071 (in Chinese)
- 6 Li maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement by optical fiber michelson interferometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(9):1294~1296 (in Chinese)
- 7 Song Guiju, Fang Zujie, Wang Xiangzhao. The optimum wavelength combination in multi-light-source white-light interferometer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21** (4):463~467 (in Chinese)
- 8 Luo Fei, Pan Junying, Huang Shanglian. Research of stress sensor technology by using high-birefringence fiber. *Chin. J. Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1993, **14**(3):292~296 (in Chinese)
- 9 Grattan K T V, Meggitt B T. *Optical Fiber Sensor Technology*. Kluwer Academic Publishers, 1999. 241~255
- 10 Koch A, Ulrich R. Displacement sensor with electronically scanned white light interferometer. *Proc. SPIE*, 1990, **1267**:126~133