

双法布里-珀罗干涉仪传感模型 的理论分析

李瑞铭 叶声华 王春和
(天津大学 精密仪器工程系)

提 要

本文提出了一种用发光二极管作为光源、用自聚焦透镜构成法布里-珀罗腔的双法布里-珀罗干涉仪光纤位移传感模型。根据部分相干光的干涉理论,得到了这个传感模型输出光强与两个法布里-珀罗干涉仪腔长之差的函数曲线。

关键词: 光纤传感器、双法布里-珀罗干涉仪系统。

一、引 言

在干涉仪型光纤传感器中常常使用半导体激光器作为光源,这种激光器自身的噪声及外部产生的反馈光所引起的噪声对这类传感器的灵敏度有一定影响^[1,2],在这类光纤传感器中采用相干光源还会产生所谓初始条件模糊问题^[3]。双干涉仪系统对于光源的相干性要求不高,在这种系统中用发光二极管作为光源可以避免上述问题,用发光二极管作为光源由迈克尔逊干涉仪和法布里-珀罗干涉仪构成的光纤位移和温度传感器^[4~6]已有报道, Cielo 提出过单模光纤双法布里-珀罗干涉仪光纤水听器的方案^[7],论述了这种水听器采用相干光源时的工作原理。在单模光纤双法布里-珀罗干涉仪系统中用发光二极管作为光源,在实际中是行不通的,因为发光二极管与单模光纤的光耦合效率非常低。

本文提出了一种用发光二极管作为光源的双法布里-珀罗干涉仪光纤位移传感模型,其中的微型法布里-珀罗干涉仪是用自聚焦透镜组成的。设计这种光纤传感器的信号探测系统时,需要知道输出光强与两个法布里-珀罗干涉仪腔长差值的函数关系。按文献[8]的方法,通过用数值计算方法求一个积分^[8],就可以得到上述函数的曲线,由于发光二极管的光谱宽度较宽,所以这个积分的积分范围较宽,且被积函数中含有正弦函数,做数值计算时步长不能取得较大,因此,通过数值计算方法求这个积分需花很长的计算时间,根据数值计算结果绘出函数曲线极为困难。本文根据部分相干光的干涉理论,经过分析,得到了新的公式,并绘出了输出光强与两个法布里-珀罗干涉仪腔长差值的函数曲线。

二、自聚焦透镜双法布里-珀罗干涉仪光学系统

在自聚焦透镜的一个端面用折射率匹配的光学胶粘上一个高反多层介质膜镜片,另一

端面与光导纤维直接耦合,两个这样的自聚焦透镜的高反镜片端面平行相对放置就构成了一个微型法布里-珀罗干涉仪,再用光纤把两个法布里-珀罗干涉仪串接起来,就构成了双法布里-珀罗干涉仪系统,如图1所示。在这个系统中,光纤仅用于传输光,选用芯径为 $50\mu\text{m}$

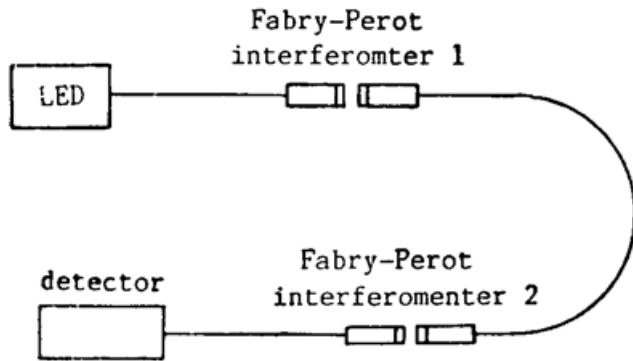


Fig. 1 Schematic of the optical fibre displacement sensor with a dual Fabry-Perot interferometer system

的多模渐变折射率光纤,并让它与发光二极管直接耦合(使用折射率匹配胶),可使系统的输出光强足够强。图1所示的两个法布里-珀罗干涉仪中,一个是传感干涉仪,一个是参考干涉仪。当这个光纤传感器用于传感微位移时,传感法布里-珀罗干涉仪的机械结构可以用弹簧导轨构成;参考法布里-珀罗干涉仪的一个自聚焦透镜可以直接固定在腔长调制元件(如PZT)上。当传感干涉仪的腔长发生微小变化时,伺服系统通过腔长调制元件使参

考干涉仪的腔长跟随这一变化^[7],由此得到待测物作用于传感干涉仪所产生的位移。这种光纤传感器只适用于传感微位移,所以它的微型法布里-珀罗干涉仪的腔长可选为几百微米。

三、理论分析

发光二极管的相干长度一般是几个到十几个微米,几百微米的法布里-珀罗干涉仪腔长远大于这个相干长度。发光二极管的光对图1所示的两个法布里-珀罗干涉仪是正入射,按照文献[8]的理论,只有当两个法布里-珀罗干涉仪的腔长差是近整数倍关系时,这种双法布里-珀罗干涉仪系统的输出光将产生干涉现象。由于这个光纤传感器是在两个法布里-珀罗腔腔长近似相等的条件下工作的,所以下面的理论分析是在这一条件下进行的。在图1所示的光学系统中,自聚焦透镜和高反多层介质膜镜片等均对光有吸收或损耗,下面的分析中忽略了这些损耗,在两个法布里-珀罗干涉仪之间存在多次反射光,这些反射光对系统输出的光干涉信号影响不大^[7],也可忽略。为了使问题简化,假设发光二极管发射的是,中心圆频率为 ω_0 、带宽为 σ 的单位强度线偏振光,它的电矢量垂直于或平行于入射面,由此可以假设它的光场为

$$E(t) = E_0(t) \exp\{-i[\omega_0 t + \phi(t)]\}, \quad (1)$$

式中 $E_0(t)$ 及 $\phi(t)$ 均为实函数。发光二极管的光谱功率密度为^[9]

$$G(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

这时发光二极管的归一化自相关函数可写为

$$\nu_E(\tau) = \langle E(t) E^*(t + \tau) \rangle. \quad (3)$$

这里尖括号代表时间平均。由 $G(\omega)$ 的逆傅里叶变换可以得到^[10]

$$\nu_E(\tau) = \exp(i\omega_0 \tau) \exp(-\sigma^2 \tau^2 / 2). \quad (4)$$

由(1)、(3)和(4)式可以得到

$$\langle E_0(t) E_0(t + \tau) \exp\{i[\phi(t + \tau) - \phi(t)]\} \rangle = \exp(-\sigma^2 \tau^2 / 2). \quad (5)$$

假设图 1 所示光学系统中,两个法布里-珀罗干涉仪除了腔长以外是完全相同的,为了方便公式推导,在图 2 所示的光路图中,两个法布里-珀罗腔中的正入射光及反射光被分离开来,光在两个腔中的往返时间分别为 S_1 和 S_2 ($S_1 = (2L_1/c)$, $S_2 = (2L_2/c)$, c 为光在两腔中的速度)。并设

$$S_1 - S_2 = S_0 \quad (6)$$

象常用的表示方法一样,设光从法布里-珀罗腔内进入自聚焦透镜的振幅透射系数和反射系数分别为 t 和 r ,反之为 t' 和 r' 。如果 R 和 T 是高反镜片的反射率和透射率,则有关系式

$$r = -r', R = r^2 = r'^2, T = tt', R + T = 1. \quad (7)$$

由图 2 可知,输入光透过两个法布里-珀罗干涉仪后,输出光的合振幅 $V(t)$ 为

$$V(t) = T^2 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} R^n R^m E_0(t - nS_1 - mS_2) \times \exp\{-i\omega_0(t - nS_1 - mS_2) + \phi(t - nS_1 - mS_2)\}, \quad (8)$$

通常认为光波场是平稳的和各态历经的,所以时间平均项与时间原点无关,考虑到(5)~(8)式并用 $[t + (n+m)S_2 + nS_0]$ 代替 t ,则输出光强 I 有

$$I = \langle |V(t)|^2 \rangle = T^4 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n'=0}^{\infty} \sum_{m'=0}^{\infty} R^n R^m R^{n'} R^{m'} \times \exp\{i\omega_0[(n+m-n'-m')S_2 + (n-n')S_0]\} \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \sigma^2 [(n+m-n'-m')S_2 + (n-n')S_0]^2\right\}. \quad (9)$$

发光二极管的光谱宽度 σ 和它的相干时间 τ_c 成反比,即

$$\sigma \sim \frac{1}{\tau_c}. \quad (10)$$

由于 L_2 远大于发光二极管的相干长度,所以 $S_2 \gg \tau_c$,根据(10)式,当 $m+n-n'-m' \neq 0$ 时,(9)式中对应项(n, m, n', m' 项)的最后一个指数函数将使该项趋于零。在 $n+m-n'-m'=0$ 的条件下,还需要就 S_0 的大小对(9)式的影响进行讨论。

1. 当 $S_0 \gg \tau_c$ 时

这时(9)式中只有 $n=n', m=m'$ 的项不为零,考虑到 $R+T=1$,所以

$$I = T^4 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} R^{2n} R^{2m} = \left(\frac{1-R}{1+R}\right)^2. \quad (11)$$

2. 当 $0 \leq S_0 < \tau_c$ 时

(9)式右边的诸项中,只需考虑 $n+m=n'+m'$ 的那些项,设 $t=n+m=n'+m'$,对于某一个 t 值,(9)式中共有 $(t+1)^2$ 个项满足 $t=n+m=n'+m'$,在这 $(t+1)^2$ 个项中有 $(t+1)$ 个项满足 $n=n', m=m'$,剩下的 $t(t+1)$ 个项中 $n=n'$,设 $q=n-n'$,则 q 的取值范围是 $-t$ 至 $-1, 1$ 至 t 。对于一个正 q 值,(9)式中有 $(t-q+1)$ 个项使得 $n-n'=q$,如果(9)式中仅用正 q 表示,并考虑到 $2 \cos \alpha = e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}$ 及(11)式,则(9)式可改写成

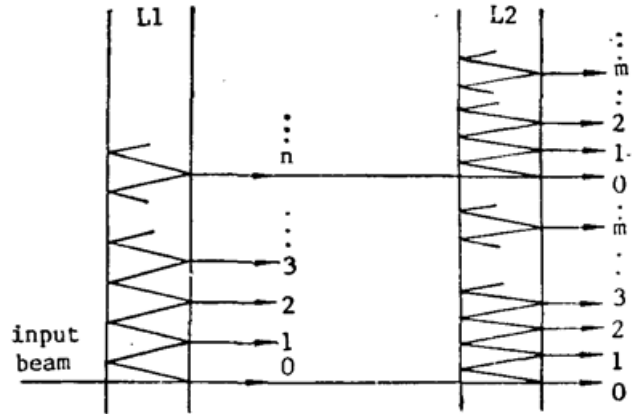


Fig. 2 Schematic of the reflection and transmission lights in the dual Fabry-Perot interferometer system

$$I = \left(\frac{1-R}{1+R} \right)^2 + 2T^4 \sum_{t=1}^{\infty} \sum_{q=1}^t (t-q+1) R^{2t} \cos(\omega_0 q S_0) \exp(\sigma^2 q^2 S_0^2 / 2), \quad (12)$$

如果在(12)式中令 $S_0=0$, 根据等差级数和无穷级数求和公式则有

$$I = \frac{(1-R)(1+R^2)}{(1+R)^3}. \quad (13)$$

对于 $S_0=0$ 的情形, 按文献[8]中所得到的公式, 也可得到(13)式, 可见两个方法的结果一致。

(12)式中由于 R^{2t} 的衰减作用使得 t 最大取值为 30 时, 通过数值计算就可以得到精确的 I 值。对于国产中心波长为 $1.29 \mu\text{m}$ 的发光二极管 ($\omega_0=1.46 \times 10^{15} \text{ rad/sec}$, $\sigma=1.019 \times 10^{13} \text{ rad/sec}$), 通过数值计算所得出的 I 与 L_0 ($L_0=cS_0/2$) 的函数曲线如图 3 所示。对于 $R=70\%$ 的曲线, 中心极大峰的“半宽度”大约为 $0.14 \mu\text{m}$ 左右。信号探测系统利用这个极大峰探测两个法-珀腔腔长之差, 可以使这个光纤传感器具有较高的灵敏度。

由于上面的理论分析中没有考虑光学系统中的损耗, 所以对于实际的系统, (11)式、(12)式的值还会小一些。另外, 发光二极管发射的光不是如假设的线偏振光。实际光学系统的输出光强与两个腔腔长差的关系还有待在实验上进一步研究。

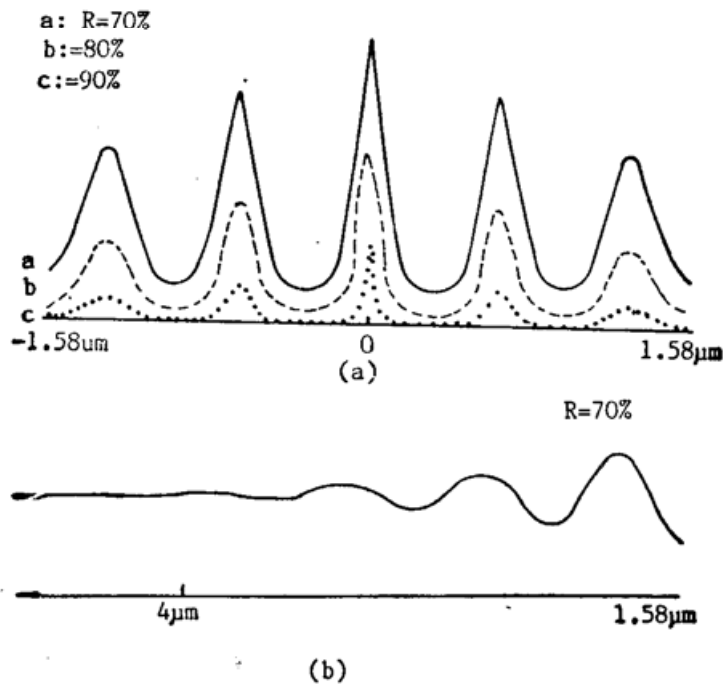


Fig. 3 The curves of the theoretical output intensity of the dual Fabry-Perot interferometer system as the function of the difference of the two cavity lengths
(a) $-1.58 \mu\text{m} < L_0 < 1.58 \mu\text{m}$ (b) $L_0 > 1.58 \mu\text{m}$

四、结 束 语

本文提出的这种光纤位移传感模型可以用于遥测微位移, 它的成本较低, 如果它的传感法布里-珀罗干涉仪的两个自聚焦透镜用线胀系数较大的材料固定起来, 就可以用来传感温度。

参 考 文 献

- [1] T. G. Giallorenzi *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1982, **QE-18**, No. 4 (Apr), 654~657.
- [2] K. Peterman, E. Weidel; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**, No. 7 (Jul), 1251~1256.
- [3] A. S. Gerges *et al.*; *Electron. Lett.*, 1987, **23**, No. 21 (Mar), 1110~1111.
- [4] G. Beheim; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 15 (Aug), 2335~2340.
- [5] G. Beheim; *Electron. Lett.*, 1986, **22**, No. 5 (Jun), 238~240.
- [6] A. S. Gerges *et al.*; *Opt. Commun.*, 1988, **68**, No. 3 (May), 157~160.
- [7] P. G. Cielo; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 17 (Sep), 2933~2937.
- [8] M. Born, E. Wolf; 《光学原理》, (中译本), (科学出版社, 北京, 1978), 475~479.
- [9] B. Culshaw; 《Optical Fiber Sensing & Signal Processing》, (Peter Peregrinus Ltd., 1984), 37.
- [10] 周炳琨等著; 《激光原理》, (国防工业出版社, 北京, 1980), 209.

Theoretical analysis of sensing model with a Dual Fabry-Perot interferometer system

LI RUIMING, YE SHENGHUA AND WANG CHUNHE

(Department of Precision Instrument Engineering, Tianjin University)

(Received 6 March 1990; revised 23 April 1990)

Abstract

A optical fibre displacement sensing model with a dual Fabry-Perot interferometer system consisted of the GRIN lenses and LED source is presented. According to the interference theory of partially coherent light the curves of the output light intensity of the sensing model as the function of the difference between the two cavity length were obtained.

Key words: optical fibre sensor; dual Fabry-Perot interferometer system.