

激光双谱线功率的不一致性与拍波干涉仪对准精度的关系

邓罗根

(北京理工大学应用物理系 北京 100081)

摘要 双谱线功率一致性是拍波干涉测长方案对激光光源提出的特殊要求。本文从拍波干涉仪对准方法的实际出发,在分析双谱线拍波干涉仪输出信号的基础上,研究了双谱线功率不一致与拍波干涉仪对准精度的关系,提出了基本对准盲区和盲区扩大量的新概念,建立了描述盲区扩大量与双谱线相对功率差之间关系的解析表达式。为设计拍波干涉仪的激光稳定环路和提高拍波干涉仪的对准精度提供了理论分析工具。

关键词 拍波干涉仪 双波长干涉计量 对准盲区 盲区扩大量

1 引言

用于大长度绝对测量的拍波干涉仪是近年来出现的新型干涉仪,它具有抗干扰能力强、测量精度高的优点。拍波干涉仪使用的光源一般是双波长的,这种双波长可以由塞曼分裂得到,也可以由一些双波长激光器提供^[1,2]。拍波干涉仪不仅象传统的测长仪一样要求激光的频率和功率稳定,而且还要求双谱线功率相等。因为只有保证双谱线功率相等,才能得到准确的拍波零点,所以这种双谱线功率一致性要求是拍波干涉测长方法对光源提出的特殊要求,是实现拍波干涉测长的基本前提。

本文从拍波干涉仪对准方法的实际情况出发,在分析双谱线拍波干涉仪输出信号的基础上,研究了双谱线功率差与拍波干涉仪对准精度的关系,提出了基本对准盲区和盲区扩大量的新概念,导出了盲区扩大量与双谱线相对功率差关系的解析表达式。利用本文结果对3.3912 μm 、3.3922 μm 双谱线He-Ne激光红外拍波干涉仪^[3]的分析表明:为了使盲区扩大量不大于2 μm ,3.3912 μm 和3.3922 μm 双谱线的相对功率差应小于千分之一。

2 基本公式

拍波干涉仪通常采用双波长同时干涉、混和探测的光路布局。该布局可以避免分光的麻烦。现对干涉仪的输出信号分析如下：

设振幅为 $E_1 \exp i(\omega t) + E_2 \exp i(\omega t)$ 的双波长激光共线同时入射图1所示的迈克尔逊干涉仪，则到达探测器的输出光波场为

$$E = \sum_{j=1}^2 \{ E_{j1} \exp i[\omega t - k_j(2l_1 + s)] + E_{j2} \exp i[\omega t - k_j(2l_2 + s)] \} \quad (1)$$

式中 E_{j1} 表示波长为 λ_j 的光波经反射 M_1 反射后到达探测器 D 上的光波振幅； E_{j2} 是波长为 λ_j 的光波经反射镜 M_2 反射后到达探测器 D 上的光波振幅； s 是反射镜 M_1 和 M_2 上的反射光共同走过的光程； $k_j = 2\pi/\lambda_j$ 是波数； $\omega = 2\pi V/\lambda_j$ 是与 λ_j 对应的角频率 (V 是介质中的光速)。根据光探测的基本原理^[4,5]，光电流

$$i(t) = \frac{e \cdot \eta_h \cdot |E|^2 \cdot A_d}{Z_0 \cdot h\nu} \quad (2)$$

式中 e 是电子电荷； η_h 是探测器的量子效率； h 是普朗克常数； ν 是入射光频率； A_d 是光敏面的面积； Z_0 为自由空间阻抗。把(1)式代入(2)式，展开后得

$$i(t) = \frac{e \cdot \eta_h \cdot A_d}{Z_0 \cdot h\nu} \left[\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 E_{ij}^2 + 2E_{11}E_{12} \cos 2k_1(l_1 - l_2) + 2E_{21}E_{22} \cos 2k_2(l_1 - l_2) \right] +$$

$$\text{频率为 } |\omega - \omega| \text{ 的拍频项} \quad (3)$$

当探测器的响应速度跟不上频率 $|\omega - \omega|$ 时，(3)式成为

$$i(t) = (I_{11} + I_{12} + 2 I_{11}I_{12} \cos 2k_1 Z) + (I_{21} + I_{22} + 2 I_{21}I_{22} \cos k_2 Z) \quad (4)$$

式中 $I_{ij} = e\eta_h \cdot A_d \cdot E_{ij}^2 / (h\nu) \cdot Z_0$ 是光电流信号的直流部分； $Z = l_1 - l_2$ 是干涉仪反射镜的臂长差。(4)式是双波长拍波干涉仪输出信号的基本表达式，其波形如图2所示。

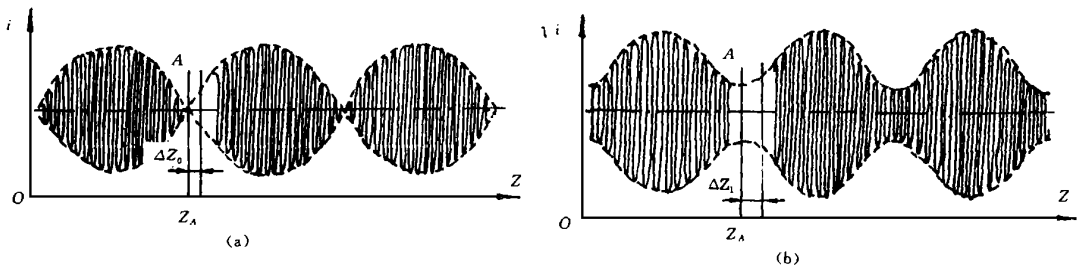


Fig. 2 The detector output signal versus the arm length difference of the interferometer

(a) equal power output; (b) unequal power output

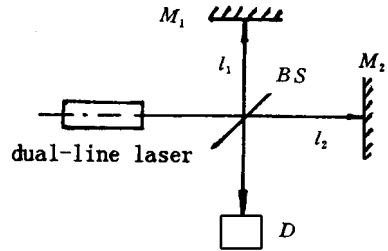


Fig. 1 Principle of two wavelength simultaneous interference and hybrid detection

3 分析和结果

拍波干涉测长利用拍波零点作为测取条纹尾数的对准点, 因此要求双谱线功率具有良好的 consistency。在干涉实验中, 如果相干涉的两束光的强度不等, 那么干涉条纹的可见度会下降。同样, 在双谱线拍波绝对距离干涉计量中, 如果作为光源的激光器所输出的双谱线的功率不平衡, 那么将会导致拍波干涉零点的模糊, 结果直接影响干涉仪条纹尾数 ϵ 的测取精度。具体分析如下:

如上节所述, 在迈克尔逊型双光束干涉仪中, 双波长同时干涉、混合探测且探测器响应速度不能响应拍频的情况下, 光电流信号由(4)式表示。令 $R_1 = 2 I_{11}I_{12}$, $R_2 = 2 I_{21}I_{22}$, 则(4)式可简为

$$i = d.c + R_1 \cos 2k_1 Z + R_2 \cos 2k_2 Z \quad (5)$$

式中 $d.c$ 表示信号的直流部分。容易看出: R_1/R_2 代表双波长 λ_1 和 λ_2 的功率比。光电流 i 与臂长差 Z 的关系如图 2 所示。图 2(a) 是 $R_1/R_2 = 1$, 即等功率情况; 图 2(b) 是 $R_1/R_2 \neq 1$, 即不等功率情况。在 A 点处信号幅度最小, 对应臂长差 $Z = Z_A$ 。由于存在着噪声, 即使在 $R_1/R_2 = 1$ 的理想情况下, Z_A 的位置也存在着一个相当大的不确定度 ΔZ_0 。我们把 $2\Delta Z_0$ 称为基本对准盲区。在这个基本对准盲区内, 与干涉仪反射镜位置变化相对应的信号变化埋在噪声中不可分辨。为了分析双谱线功率不平衡对盲区的影响, 假定基本对准盲区是一定的, 另外还人为地规定信噪比

$$\begin{cases} SNR_0 > 1, & \text{盲区外} \\ SNR_0 \leq 1, & \text{盲区内} \end{cases} \quad (6)$$

(6) 式是对准盲区的定义式, 与后续信号处理仪器无关。之所以这样定义, 一方面是考虑拍波干涉仪对零的实际情况, 另一方面是为了便于分析。虽然现在某些电信号处理仪器能检测埋在噪声中的信号, 但对准盲区应是客观的, 其定义不能以某个电路或某种电子仪器检测信号的能力为依据。定义式(6)贯彻了这一思想。

由(5)式可得等功率 ($R_1/R_2 = 1$) 情况下的光电流信号表达式为

$$i = d.c + 2R_2 \cos[(k_1 + k_2)Z] \cdot \cos(k_s \cdot Z) \quad (7)$$

式中 $k_s = 2\pi/\lambda_s$, $\lambda_s = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 是所谓的合成波长(即拍长)。由(7)式, 与基本对准盲区 $2\Delta Z_0$, 即与位置 $Z = Z_A + \Delta Z_0$ (此处, $Z_A = (n + 1/2) \frac{\lambda}{2}$, n 是整数) 对应的拍信号幅度(不计直流项)为

$$S_0 = |2R_2 \cos(k_s \cdot Z)|_{Z=Z_A+\Delta Z_0} = 2R_2 |\sin(k_s \cdot \Delta Z_0)| \quad (8)$$

当 $k_s \Delta Z_0$ 很小时, 上式成为

$$S_0 = 2R_2 k_s \Delta Z_0 \quad (9)$$

对于 $R_1/R_2 > 1$ 的不等功率情况, (5)式可改写为

$$i = d.c + 2R_2 \cos[(k_1 + k_2)Z] \cdot \cos(k_s \cdot Z) + (R_1 - R_2) \cos(2k_1 Z) \quad (10)$$

与该式对应的波形见图 2(b)。由该图可见, (10)式所对应的拍零点已不很明显。(10)式中与(7)式对应的前半部分是信号; 最后一项 $(R_1 - R_2) \cos(2k_1 Z)$ 可看作是噪声, 它的存在使对准

零点的精度大为下降。设 $2\Delta Z_1$ 是不等功率($R_1/R_2 > 1$) 情况下的拍波对准盲区, 显然 $\Delta Z_1 > \Delta Z_0$, 与推导(9) 式类似, 在 $Z = Z_A + \Delta Z_1$ 处, 信号幅度为

$$S_1 = 2R_2 k_s \Delta Z_1 \quad (11)$$

噪声幅度

$$N_1 = N_0 + (R_1 - R_2) \quad (12)$$

式中 N_0 是在等功率情况下也同样存在与基本对准盲区对应的信号噪声。由定义式(6) 得 $N_0 = S_0$, 所以信噪比

$$SNR_1 = \frac{S_1}{N_1} = \frac{S_1}{S_0 + (R_1 - R_2)} = \frac{2R_2 k_s \Delta Z_1}{2R_2 k_s \Delta Z_0 + (R_1 - R_2)} \quad (13)$$

根据盲区的定义, 令 $SNR_1 = 1$, 我们得到

$$2\Delta Z_1 = 2\Delta Z_0 + (R_1 - R_2)/(R_2 \cdot k_s) \quad (14)$$

盲区扩大量

$$2(\Delta Z_1 - \Delta Z_0) = \frac{\lambda_s}{2\pi} \cdot \frac{R_1 - R_2}{R_2} \quad (15)$$

为了使盲区扩大量不超过允许的范围, 双谱线的相对功率差必须满足下述关系

$$(R_1 - R_2)/R_2 < (\Delta Z_1 - \Delta Z_0) \cdot k_s \quad (16)$$

(16) 式是在 $k_s \Delta Z_1$ 很小的条件下导出的。一般地说, 由于 k_s 比较小(拍长 λ 大), $k_s \Delta Z_1$ 很小的条件容易得到满足。

4 结 束 语

(16) 式是本文推导的结论性公式, 它的左边 $(R_1 - R_2)/R_2$ 是双谱线相对功率差, 右边的 $2(\Delta Z_1 - \Delta Z_0)$ 是与功率差对应的拍波干涉仪的对准盲区扩大量。因此, 该式揭示了双谱线相对功率差与对准盲区扩大量的定量关系。作为一个例子, 下面利用(16) 式对我们曾经研究的 $3.39\mu\text{m}$ 双谱线 He-Ne 激光红外拍波干涉仪^[3] 的有关问题分析如下:

$3.39\mu\text{m}$ 波段双谱线 He-Ne 激光器能同时发射波长为 $\lambda_1 = 3.3922\mu\text{m}(3s_2 - 3p^4)$ 和 $\lambda_2 = 3.3912\mu\text{m}(3s_2 - 3p_2)$ 的两条谱线, 其拍波合成波长 $\lambda_s = 11.5\mu\text{m}$ 。两谱线的中心频差 $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 26\text{GHz}$, 一般探测器不能响应此频差, 所以(4) 式成立。根据(16) 式, 如果要求盲区扩大量

$$2(\Delta Z_1 - \Delta Z_0) < 2\mu\text{m} \quad (17)$$

那么相对功率差须满足

$$(R_1 - R_2)/R_2 < 0.11\% \quad (18)$$

这是 $3.39\mu\text{m}$ 波段双线 He-Ne 激光拍波干涉测长方案对双谱线功率一致性的要求。

基本对准盲区是由于各种噪声引起的, 其中包括激光器本身的噪声、探测器的各类噪声、前置放大器的噪声和干涉仪引起的噪声等。应设法减小基本对准盲区。红外探测器在低温下工作, 可以降低噪声; 前置放大器与探测器之间搞好阻抗匹配, 并贯彻低噪声设计原则, 可以减少噪声。对准盲区扩大量是由双谱线功率不一致引起的。为了避免和减小对准盲区的扩大, 应设法使激光器工作在稳定等功率点上。对于上面提到的 $3.39\mu\text{m}$ 双谱线 He-Ne 激光拍波干涉仪, 稳定伺服环路应能分辨 0.1% 或者更小的相对功率差。这是双谱线功率一致性对激光稳定系统

所提出的要求。

参 考 文 献

- 1 Matsumoto H. Stabilization method of an infrared two-wavelength laser. *Appl Phys*, 1981, 24(1): 65 ~ 67
- 2 Matsumoto H. Recent interferometric measurements using stabilized lasers. *Precision Engineering*, 1984, 6(2): 87 ~ 94
- 3 邓罗根, 梁晋文. 用于绝对距离干涉计量的 $3.39\mu\text{m}$ 双波长红外拍波干涉仪的研究. *仪器仪表学报*, 1992, 13(2): 175 ~ 180
- 4 Tansey R J. An absolute interferometer using a dye laser heterodyne interferometer and spatial separation of beams. *Proc SPIE*, 1983, 429: 43 ~ 54
- 5 刘贤德. 红外系统设计基础. 武汉: 华中工学院出版社, 1985. 54 ~ 55

Dependence of the Aiming Accuracy of a Beat-wave Interferometer on Laser Dual-line Output Power Equilibrium

DENG Luo-Gen

(*Department of Applied Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*)

Abstract

Output power equalization of laser dual spectrum lines is a special requirement which is put on its laser source by two wavelength beat-wave absolute distance interferometry. On the basis of analyzing the output signal of a two wavelength beat-wave absolute distance interferometer, this paper proceeds from the realities of the aiming method of the beat-wave interferometer, conducts an analytical investigations on the dependence of the aiming accuracy of the beat-wave interferometer on laser dual-line output power equilibrium, propose two new concepts— a basic aim blind area and a blind area expansion, and establishes an analytical expression between the blind area expansion and the relative power difference of laser dual lines. The result provides an analytical tool for designing the laser stabilized servo loop of the instrument and improving its aiming accuracy.

Key words: Beat-wave interferometer, Two-wavelength interferometry, Aim blind area, Blind area expansion

邓罗根 男, 1961年2月生。1989年获清华大学博士学位, 现为北京理工大学副研究员和该校物理系激光光谱研究室副主任, 主要从事激光应用和自适应光学等的研究工作。国际光学工程学会 SPIE 会员。