

时间平均像面全息研究及应用

徐寿泉

(怀化师范专科学校, 怀化 418008)

提要 以简谐振动漫射平面物为例,对微振幅时间平均像面全息检测给出一种有应用价值的结果。

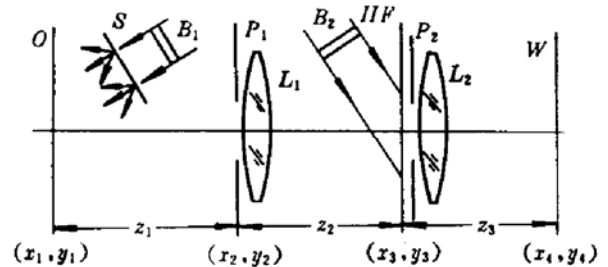
关键词 时间平均像面全息干涉术,微振幅,Fourier 频谱,检测灵敏度

1 引言

Powell 和 Stelson 于 1965 年首先提出一种分析机械振动的全息方法^[1,2],开创了用全息方法研究应变位移的领域。Tiziani 于 1971 年实现了用频谱干涉仪对漫射表面机械振幅的记录^[3,4]。近期,Гyцев 将时间平均全息干涉测量技术应用到横向应变位移测量,获得较好的实验结果^[5,6]。时间平均全息术作为“时间调制全息术”^[7]的一种特例,在信息提取上比较容易实现。但是,为了从漫射全息图上获得更多的信息,减少噪声和色模糊量,降低图像灰雾,改善全息图的质量是完全必要的。本文在时间平均全息干涉测量中加进像面全息技术,提出时间平均像面全息干涉术,采用光学信息处理方法,对机械微振幅的时间平均像面全息检测导出一个有应用价值的结果,并对微振幅全息检测灵敏度以及相关联的诸方面进行充分的讨论。

Fig. 1 The system for studying the time-averaged image plane holographic interferometry

B_1, B_2 : reference and reconstruction laser beams; S : frosted glass; P_1, P_2 : stops; O : diffusing objective plane; HF : recording media; L_1, L_2 : convergent lens; W : screen



2 时间平均像面全息检测光场分析

设图 1 所示的装置在操作过程均满足 Fresnel 条件,且平面物沿 x 轴作简谐振动,辐射率为 $a(x_1 + b \sin \omega t, y_1)$,其中 b 为微振幅, ω 为角频率。毛玻璃板 S 经 He-Ne 激光束 B_1 照明时透射光波复振幅用空间随机函数 $t(x_0, y_0)$ 表示。利用二次相位函数 $q(x, y; 1/\lambda z) \equiv \exp\{j\pi[(x^2 + y^2)/\lambda z]\}$ ^[8],平面 (x_3, y_3) 上入射光波复振幅可表示为

$$u^-(x_3, y_3, t) = \{ [[[[t(x_0, y_0) * * B_{01} q(x_0, y_0; 1/\lambda z_0)] * * a(x_1 + b \sin \omega t, y_1) * * B_{12} q(x_1, y_1; 1/\lambda z_1)] * * \tilde{p}_1(x_2, y_2) q^*(x_2, y_2; 1/\lambda f_1)] * * B_{23} q(x_2, y_2; 1/\lambda z_2)] \} \quad (1)$$

上式两次卷积运算分别在物平面 (x_1, y_1) 及透镜 L_1 平面 (x_2, y_2) 上进行。利用线性平移不变光学

系统的脉冲响应,可简便地完成物平面上的二维积分,同时使用像面全息条件 $1/z_1 + 1/z_2 = 1/f_1$, (1) 式可简化为

$$u^-(x_3, y_3, t) = B_{01}B_{12}B_{23} \exp\left[jk \frac{x_3^2 + y_3^2}{2z_2}\right] \cdot \left\{ \left[a(-\mu_1 x_3 + b \sin \alpha t, -\mu_1 y_3) \cdot \exp\left[jk \frac{(x_3^2 + y_3^2) \mu_1^2 (z_1 + z_0)}{2z_1 z_0}\right] \right] \cdot \tilde{T}\left(-\frac{\mu_1 x_3}{\lambda z_0}, -\frac{\mu_1 y_3}{\lambda z_0}\right) \right\} * * \tilde{P}_1\left(\frac{x_3}{\lambda z_2}, \frac{y_3}{\lambda z_2}\right) \quad (2)$$

这里,令 $I(x_0, y_0) \equiv I(x_0, y_0) \exp\left[jk \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z_0}\right]$, 式中 $\tilde{T}\left(-\frac{\mu_1 x_3}{\lambda z_0}, -\frac{\mu_1 y_3}{\lambda z_0}\right)$, $\tilde{P}_1\left(\frac{x_3}{\lambda z_2}, \frac{y_3}{\lambda z_2}\right)$ 分别是 $I(x_0, y_0)$, $\tilde{p}_1(x_2, y_2)$ 的 Fourier 频谱,且 $\mu_1 = z_1/z_2$ 。

干板上对于线度满足条件 $D \leq \frac{d_1 z_0}{\mu_1 (z_1 + z_0)}$ 的区域 (d_1 为透镜 L_1 的入瞳直径), 当曲率半径为 $\frac{z_1 z_0}{\mu_1^2 (z_1 + z_0)}$ 的球面波位相改变不超过 π 时, (2) 式中描述球面波传播特征的指数因子可由卷积符号中移出。

全息记录时,取曝光时间为 T ,干板上记录的信息中包含有 $u^-(x_3, y_3, t)$ 在时间 T 内的平均值。记录干板经线性处理后复位,在原光束 B_2 照射下,再现光场中必包含有以下波场信息(略去常数因子)

$$u^+(x_3, y_3) \sim \exp\left\{jk \frac{(x_3^2 + y_3^2) [z_1 z_0 + z_2 \mu_1^2 (z_1 + z_0)]}{2z_2 z_1 z_0}\right\} \cdot \left[\tilde{T}\left(-\frac{\mu_1 x_3}{\lambda z_0}, -\frac{\mu_1 y_3}{\lambda z_0}\right) \frac{1}{T} \int_0^T a(-\mu_1 x_3 + b \sin \alpha t, -\mu_1 y_3) dt * * \tilde{P}_1\left(\frac{x_3}{\lambda z_2}, \frac{y_3}{\lambda z_2}\right) \right] \quad (3)$$

若选择实验装置参数,使得 f_2, z_3 满足条件

$$\frac{z_0 + \mu_1 (z_1 + z_0)}{z_2 z_0} + \frac{1}{z_3} = \frac{1}{f_2} \quad (4)$$

用函数 $e^{j \sin \varphi}$ 的 Fourier 展开,经类似的信息变换操作,观察平面 (x_4, y_4) 上的波场复振幅中必包含有以下波场信息

$$u(x_4, y_4) \sim \exp\left[jk \frac{x_4^2 + y_4^2}{2z_3}\right] \left\{ \left\{ J_0\left(\frac{k b x_4}{\mu_1 z_3}\right) \cdot A\left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3}\right) * * I(\mu_2 x_4, \mu_2 y_4) \right\} \cdot \exp\left[jk \frac{(x_4^2 + y_4^2) z_0}{2\mu_1^2 z_3^2}\right] \tilde{P}_1(-\mu_3 x_4, -\mu_3 y_4) \right\} * * \tilde{P}_2\left(\frac{x_4}{\lambda z_3}, \frac{y_4}{\lambda z_3}\right) \quad (5)$$

式中 $A\left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3}\right)$ 是辐射率 $a(x_1, y_1)$ 的 Fourier 频谱, $\tilde{P}_2(x_4/\lambda z_3, y_4/\lambda z_3)$ 是孔径函数 $\tilde{p}_2(x_2, y_2)$ 的 Fourier 频谱,且 $\mu_2 = z_0/\mu_1 z_3$, $\mu_3 = z_2/z_3$ 。

设源平面 (x_0, y_0) 上被照明的区域线度为 d_0 ,当微振幅满足条件 $2b \leq (\lambda/d_0)z_0$ 时,物平面 (x_1, y_1) 上辐射的光波场 $u^+(x_1, y_1, t)$ 是光学相关的;同时,还考虑到因子 $J_0(k b x_4/\mu_1 z_3)$ 的周期总大于紧束底座频谱函数 $\tilde{P}_2(x_4/\lambda z_3, y_4/\lambda z_3)$ 的宽度。于是 Bessel 函数因子可从与函数 $I(\mu_2 x_4, \mu_2 y_4) \exp\left[jk \frac{(x_4^2 + y_4^2) z_0}{2\mu_1^2 z_3^2}\right]$ 以及函数 $\tilde{P}_2(x_4/\lambda z_3, y_4/\lambda z_3)$ 的卷积符号中移出。这时,观察平面 W 上照度分布必包含有以下信息(不计背景光场,略去常数因子)

$$I(x_4, y_4) \sim J_0^2\left(\frac{k b x_4}{\mu_1 z_3}\right) \left\{ \left\{ A\left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3}\right) * * I(\mu_2 x_4, \mu_2 y_4) \exp\left[jk \frac{(x_4^2 + y_4^2) z_0}{2\mu_1^2 z_3^2}\right] \right\} \right\}$$

$$\cdot \bar{p}_1(-\mu_3 x_4, -\mu_3 y_4) \} * * \bar{P}_2(x_4/\lambda z_3, y_4/\lambda z_3) \}^2 \quad (6)$$

通常透镜的孔径函数取以下形式

$$\bar{p}(x, y) = p(x, y) \exp[jkW(x, y)]$$

若透镜 L_1, L_2 的波像差 $W(x, y)$ 满足 Rayleigh 四分之一波长规则, 以及不计对光波的吸收, 则在满足 Fresnel 条件时忽略透镜孔径效应, 并将漫射发光面改为相干点光源时, (6) 式将取最简洁形式

$$I(x_4, y_4) \sim J_0^2\left(\frac{kbx_4}{\mu_1 z_3}\right) \left| A\left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3}\right) \right|^2 \quad (7)$$

(7) 式表明, 观察平面 W 上构成用强度为 $J_0^2(kbx_4/\lambda z_3)$ 的全息干涉图调制的平面物辐射率 Fourier 频谱强度分布。

上述结果提供了一种微振幅检测的时间平均像面全息方法。设全息干涉图中央最大照度的线宽为 δ , 依据函数 J_0 的性态, (6) 式给出微振幅 b 与 δ 的关系

$$b = 2.4048 \frac{\lambda \mu_1 z_3}{\pi \delta} \quad (8)$$

上式可用于微振幅时间平均像面全息检测。

(6) 式给出的观察平面 W 上的照度分布明显地包含两个部分: 一是由二维卷积确认的对各函数的光滑作用, 即衍射效应; 二是由函数 $J_0^2(kbx_4/\mu_1 z_3)$ 表征的干涉效应。在平面 (x_3, y_3) 上用参考光束 B_2 与波场 $u^-(x_3, y_3, t)$ 叠加, 在时间 T 内制作全息图, 实质上包含的操作用数学运算表示为

$$\mathcal{F} \mathcal{F} \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T a(-\mu_1 x_3 + b \sin \omega t, -\mu_1 y_3) dt \right\} \sim A\left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3}\right) J_0\left(\frac{kbx_4}{\mu_1 z_3}\right)$$

上述操作表明, 函数 $J_0(kbx_4/\mu_1 z_3)$ 紧密地依赖于对时间取平均, 即干涉因子 $J_0^2(kbx_4/\mu_1 z_3)$ 起因于全息干板的时域压缩效应。而这些经时域压缩的干涉子波场是微振动平面物处在各个瞬时位置辐射的一系列经透镜 L_1 传输的波场。因微振动平面物在二个最大位移的近邻域里有相对长的滞留时间, 故可近似地认为上述的这些瞬时子波场亦可用二个空域差为 $2b$, 时域差为 $\tau/2$ (τ 为微振动周期) 的波场来模拟, 这种模拟同样给出与 (8) 式相当数量级的干涉条纹宽度。

3 微振幅全息检测的灵敏度分析

全息干涉图衬比度直接关系到图样条纹的判读, 它也是关联微振幅全息检测的第一个重要因素。依据上述的光场分析, (6) 式给出的照度分布是不计背景光场后与微振幅检测信息相关的部分。若用 $u_0 u_0^*$ 及 $u_1 u_1^* J_0^2(kbx_4/\mu_1 z_3)$ 分别表示背景光场部分和信息光场部分, 则全息干涉图衬比度可简略地表示为

$$V = \frac{u_1 u_1^*}{u_1 u_1^* + 2u_0 u_0^* / J_{0\max}^2(kbx_4/\mu_1 z_3)}$$

式中 $J_{0\max}^2(kbx_4/\mu_1 z_3)$ 是信息光场照度调制函数在观察位置近邻域内的极大值。显然, 当微振幅 b 增大时, 相应的全息干涉图样衬比度将随着下降。

设用相干点光源取代图 1 中的相干漫射发光面, (6) 式中的 S 平面安装距离 z_0 应改用照射漫射平面物发射球面波波面曲率半径 R ($R > 0$)。依检测灵敏度定义 $\gamma \equiv \delta/b$, 考虑到 (4)、(8)

式,得微振幅检测灵敏度

$$\gamma_c = \gamma_a \left\{ 1 - \frac{\mu_1 f_2 z_1}{[z_2 - f_2(1 + \mu_1)]R} \right\}^{-1} \quad (9)$$

式中 γ_a 为采用平行光束照射漫射平面物时的检测灵敏度。这时全息干涉图定域平面位于全息图左侧且相距为 $s_1 = z_2 / [(1 + \mu_1) + \mu_1(z_1/R)]$ 处。选用平行光束时,全息干涉图定域在透镜 L_1 的后焦面上。随着 R 值减小{受限条件为 $R > R_{\min} = \mu_1 f_2 z_1 / [z_2 - f_2(1 + \mu_1)]$ },全息干涉图定域愈接近透镜 L_2 的前焦面。因图 1 所示装置通常总满足条件 $z_2 > f_2(1 + \mu_1)$, (9) 式给出的检测灵敏度随着 R 值减小,也将相应提高。

不难证明,在相干会聚光束照明时, (9) 式中应以 $-R$ 取代 R ,全息干涉图定域离全息图相距应表为 $s_2 = z_2 / [(1 + \mu_1) - \mu_1(z_1/R)]$ 。若 $R > \mu_1 z_1 / (1 + \mu_1)$,且随着 R 值减小, s_2 逐渐增大;若 $R = \mu_1 z_1 / (1 + \mu_1)$ 时,全息干涉图定域在衍射区域里。对于上述讨论的 R 值变化间隔,相应的检测灵敏度较平行光束照明时要小;当 $R < \mu_1 z_1 / (1 + \mu_1)$ 时,干涉定域在全息图的衍射 -1 级,这时取消 L_2 亦可观察到预期的照度分析。这时,相应的检测灵敏度可近似地依规律 $\gamma_c \approx \gamma_a \{ [z_2 - f_2(1 + \mu_1)] / f_2 \mu_1 z_1 \} R$ 继续下降。

显见,对于相干漫射发光面的安装距离 z_0 亦可作类似讨论。这时,在不计透镜的吸收、波像差及孔径效应时, (7) 式应改为

$$I(x_4, y_4) \sim J_0^2 \left(\frac{kbx_4}{\mu_1 z_3} \right) \left| A \left(-\frac{x_4}{\lambda \mu_1 z_3}, -\frac{y_4}{\lambda \mu_1 z_3} \right) * * t(\mu_2 x_4, \mu_2 y_4) \exp \left[jk \frac{(x_4^2 + y_4^2) z_0}{2 \mu_1^2 z_3^2} \right] \right|^2 \quad (10)$$

上式表明,全息干涉图强度与漫射平面物辐射率的 Fourier 频谱强度的关联,除了调制函数 J_0^2 以外,还依赖于函数 $t(x_0, y_0)$ 的卷积性态,即傅氏频谱面上的每一点现将扩大到由紧束底座函数 $t(\mu_2 x_4, \mu_2 y_4)$ 的非零域确定的范围。且 Fourier 频谱强度的增大,对降低微振幅检测灵敏度的基准水平是有益的。与此同时,相干漫射发光面的选用对均匀背景光场以及消除全息图衍射场的噪声也是显而易见的。

参 考 文 献

- 1 Powell, R. L., Stelson, K. A.. Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, (55):1593
- 2 Stelson, K. A., Powell, R. L.. Interferometric hologram evaluation and real-time vibration analysis of diffus objects. *J. Opt. Soc. Am.*, 1965, (55):1694~1700
- 3 Tiziani, M. J.. *Optical Acta*, 1971, (18):891
- 4 Tiziani, M. J.. Analysis of mechanical oscillations by speckling. *Appl. Opt.*, 1972, (11):2911
- 5 Гусев, В. Г.. Голографическая регистрация амплитуды колебаний диффузно рассеивающей свет поверхности. *Изв. вузов, физика*, 1992; 35(1):74~79
- 6 Гусев, В. Г.. Голографическая Регистрация амплитуды колебаний диффузно рассеивающей свет поверхности. *Изв. вузов, физика*, 1992, 35(11):30~34
- 7 Aleksoff, C. C.. Temporally modulated holography. *Appl. Opt.*, 1971, 10:1329~1341
- 8 Goodman, J. W.. Introduction to Fourier Optics. New York: McGraw Hill, 1968. 169

Research of the Time-averaged Image Plane Holographic Interferometry and Its Application

Xu Shouquan

(Huaihua Teacher's College, Huaihua 418008)

Abstract Based on the micro- amplitude, time- averaged image plane holographic interferometric measurement the purpose of this paper is to illustrate with examples of simple harmonic vibrational two- dimensional diffusion from an object the applied value of the method.

Key words time- averaged image plane holographic interferometry, micro- amplitude, Fourier spectrum, measuring sensitivity

《中国光学学会科技奖》条例

第一条：为促进我国光学科技事业的发展，激励我国从事光学、应用光学、光学工程等科技工作的中青年科技人员奋发向上、创新进取，中国科学院院士、中国工程院院士王大珩教授出资在中国科学技术发展基金会设立基金，以其一部分用于《中国光学学会科技奖》的颁发和评选。

第二条：中国光学学会负责《中国光学学会科技奖》的管理和颁发工作。

第三条：《中国光学学会科技奖》设奖范围有两种：

1. 全国范围：每两年评选一次，每次 2 名，奖金 10000 元；
2. 高校学生：在第七条所列 10 所高等院校（以后视具体情况可作调整）中，每年评选一次，原则上每校每年 1 名，奖金 1500 元。

第四条：评选条件：

1. 全国范围奖金：年龄 50 岁以下的中国科技人员，热爱祖国，学风正派，在光学、应用光学有关学科的研究有创新与发展，在国内外刊物发表过高水平学术论文或在光学工程技术上有突破性创造，取得明显的经济效益和社会效益。

2. 高校奖学金：热爱祖国，品德端正，身心健康，学习成绩优异，有创新、进取、合群精神，有志为中国光学事业做出贡献，年龄 35 岁以下。

第五条：申报办法：

1. 全国范围：申报评选工作从 1996 年开始。由两位不同单位的教授级专家推荐，连同申请书及单位审查推荐材料一式七份于每年 10 月 1 日前寄交《中国光学学会科技奖》全国评选小组办事机构，由全国评选小组进行评选，于年底前公布评选结果并颁发证书和奖金。

2. 高校学生：申报评选工作从 1996 年开始，学校推荐，每年 10 月 1 日前由所在院校的评选小组进行评选申报，并将评选结果及评选材料一式七份报《中国光学学会科技奖》全国评选小组，汇总后由全国评选小组评定（如认为不合格，可不颁发），在年底前公布评选结果，并颁发证书和奖金。

第六条：全国评选小组的组成（包括其办事机构）及各院校的评选小组组长，由中国光学学会常务理事会确定。

第一届全国评选小组由下列人员组成：组长：母国光。成员：干福熹、王之江、邓锡铭、刘颂豪、陈星旦。

全国评选小组受中国光学学会领导，并对中国光学学会常务理事会报告工作，其评选过程中所需的必要经费从基金中支付。

第七条：各校的评选小组分别由下列人员任组长，由他们确定各校的评选小组的组成。

北京大学 王国文；清华大学 金国藩；南开大学 母国光；天津大学 张以谟；浙江大学 唐晋发；北京理工大学 王 越；长春光机学院 沈 柯；重庆大学 黄尚廉；华中理工大学 李再光；南京理工大学 张保民。

第八条：本条例根据具体情况可进行修订，解释及修改权属中国光学学会常务理事会。

第九条：第一届《中国光学学会科技奖》全国评选小组办事机构设在天津南开大学现代光学研究所。

联系人：战元龄；邮编：300071；电话：(022) 3502275；传真：(022)3502974