

文章编号: 0253-2239(2007)02-0259-6

# 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究<sup>\*</sup>

王 婧 刘恒彪 李同保

(同济大学理学部, 上海 200092)

**摘要:** 角度散斑相关是一种不受表面粗糙度轮廓的间距特性影响的粗糙度幅度参量测量方法, 它的数学模型通常建立在集平均的基础上。通过模拟计算随机粗糙表面的远场散斑场, 以散斑图面上的空间平均代替常规的集平均来计算角度散斑相关系数, 并应用集平均的数学模型反演粗糙度参量。结果证实了这种空间平均角度散斑相关粗糙度测量方法的有效性, 在同一表面只需对少数个区域进行测量并对测得的粗糙度参量取平均, 即可获得足够的测量精度。对于  $R_q$  大于  $2.0 \mu\text{m}$  的表面, 测量相对误差小于 15%。根据最佳测量条件, 该方法适用于大粗糙度表面。

**关键词:** 光学测量; 表面粗糙度; 激光散斑; 角度散斑相关方法; 空间平均; 散射场模拟

中图分类号: TH741 文献标识码: A

## Numerical Simulation of Surface-Roughness Measurement Based on Angular Speckle-Correlation Method Using Spatial Average

Wang Jing Liu Hengbiao Li Tongbao

(School of Sciences, Tongji University, Shanghai 200092)

**Abstract:** Angular speckle correlation is a method of surface-roughness measurement about amplitude parameter independent on spacing characteristic of the surface roughness profile. The mathematic model of this method is usually based on ensemble average. Through simulating the speckle intensity distribution in the far field of a random rough surface, we compute the degree of angular speckle correlation by substituting spatial average in speckle pattern for conventional ensemble average, and determinate the surface roughness by the mathematic model of ensemble average. The study proves the applicability of this angular speckle-correlation method using spatial average to roughness measurement. Enough measuring precision can be got, as long as a few parts of area on the same surface are measured and the results are averaged. For surfaces with a mean root square error  $R_q$  larger than  $2 \mu\text{m}$ , the relative measuring error is less than 15%. According to the best measuring criterion, this method fits the surface with large roughness.

**Key words:** optical measurement; surface roughness; laser speckle; angular speckle-correlation method; spatial average; simulation of scattering field

## 1 引 言

相干光经粗糙表面透射或漫反射所形成的散射光场(散斑场)分布依赖于粗糙表面的微观形貌<sup>[1~4]</sup>。利用粗糙表面对激光束的散射现象——散斑, 来测量表面粗糙度是一种典型的参量测量方法。

根据这种依赖性, 这个方法不需直接探测表面轮廓, 而由散斑场的统计特征运用适当的理论模型反演出粗糙度参量进行粗糙度测量。与常规的触针式轮廓仪测量方法相比, 散斑方法的优点是非接触式测量, 这对于易划伤的软质表面和高精度表面尤为重要。

<sup>\*</sup> 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2005]383号)资助项目。

作者简介: 王 婧(1979—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事光学测量方面的研究。

E-mail: doityoucangetit@gmail.com

导师简介: 刘恒彪(1962—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 主要从事光学测量方面的研究。

E-mail: liuhb62@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2006-06-01; 收到修改稿日期: 2006-08-21

如果用单支激光束进行散斑粗糙度测量,表面粗糙度轮廓的幅度特征和间距特征都会对测量结果产生影响<sup>[5]</sup>,这与表面粗糙度标准(GB/T 3505-2000)和生产实际不相适应。在标准中,分四类表面粗糙度参量:幅度参量、间距参量、混合参量以及曲线和相关参量。在实际工业生产过程中,最常使用的是幅度参量(例如轮廓算术平均偏差  $R_a$ 、轮廓均方根偏差  $R_q$  等)。应用两支激光束的散斑相关粗糙度测量方法<sup>[6,7]</sup>——包括二色散斑相关、角度散斑相关方法等,在一定条件下可以忽略表面粗糙度轮廓的间距参量对幅度参量测量的交叉影响。角度散斑相关方法<sup>[8,9]</sup>是根据对应不同激光入射角的两幅散斑图的强度相关性来衡量表面粗糙度。由于数学推导的复杂性,它所依赖的数学模型通常建立在对不同的表面区域所构成的样本集的集平均基础上。按照集平均的要求,在实际测量过程中必须不断移动被测表面进行两个入射角的散斑场测量,否则就直接在两幅散斑图上以所有散斑场强度抽样值为样本集通过空间平均来计算散斑相关系数,这无疑为该方法的工作现场在线应用创造了条件。如果沿用集平均的数学模型,空间平均的角度散斑相关方法以散斑强度分布的各态历经性为前提,但这个前提并不是必然存在的。本文将通过模拟计算随机粗糙表面的散斑场强度分布,研究空间平均角度散斑相关粗糙度测量方法的有效性。

## 2 远场散斑场的数值模拟

为模拟计算散斑场,首先应用数值滤波方法<sup>[10]</sup>生成随机粗糙表面。该方法的原理是:根据表面高度的自相关函数的要求选用相应的滤波权重函数  $W(x)$ 。对于一个标准正态分布的独立随机数序列  $\{H_i\}$  [ $H_i = H(x_i)$ ] 以权重函数对其进行滤波,即得到一个初始表面轮廓:

$$h_0(x_k) = \sum_{j=-M}^M W(x_j) H(x_{j+k}), \quad (1)$$

其中滤波权重函数等于表面高度自相关函数频谱平方根的傅里叶逆变换。本文拟讨论的具有高斯自相关函数  $P(\tau) = \exp[-(\tau/\Lambda)^2]$  的随机粗糙表面,相应的滤波权重函数为  $W(x) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}\Lambda}\right)^{1/2} \exp\left[-2\left(\frac{x}{\Lambda}\right)^2\right]$ , 其中  $\Lambda$  为自相关长度。

标准正态分布的独立随机数序列  $\{H_i\}$  可根据  $H_i = \sqrt{-2\ln\Pi_i} \cos(2\pi\Omega_i)$  由两列在  $(0,1)$  区间均匀

分布的独立随机数  $\{\Pi_i\}, \{\Omega_i\}$  生成<sup>[11]</sup>。为得到这两列随机数,我们可应用 Lehmer 随机数生成算法<sup>[12]</sup>, 首先选取  $m = 2^{31} - 1$  为素数作模数,一个在 2 到  $m-1$  间的整数  $a = 16807$  作乘数,再选择一个在 1 到  $m-1$  间的种子数,从种子数 ( $Z_1$ ) 开始根据公式  $Z_{i+1} = aZ_i \bmod m$  循环计算  $Z_i$ , 通过归一化  $\Pi_i = Z_i/m$  得到在  $(0,1)$  区间均匀分布的随机数  $\{\Pi_i\}$ 。同理得到  $\{\Omega_i\}$ 。

在进行数值滤波时,不可能将滤波权重函数的宽度取为无限大。鉴于所采用的滤波权重函数的高斯函数性质,选取权重函数的半宽度为表面自相关长度的 2 倍,使权重函数被截断处的值不大于其最大值的  $4/10000$ 。以滤波权重  $\{W_j\}$  [ $W_j = W(x_j)$ ] 对标准正态分布的独立随机数系列  $\{H_i\}$  进行滤波运算所得到的粗糙表面轮廓高度值  $\{h_{0k}\}$  [ $h_{0k} = h_0(x_k)$ ] 的样本标准离差不一定等于所需轮廓均方根偏差  $R_q$ , 这时要通过  $\{h_{0k}\}$  进行整体缩放以得到所需数字表面各点的高度值。

按照上述随机粗糙表面的生成过程编制程序,启动计算机运算即可生成数字粗糙表面。图 1 给出了一个数字粗糙表面的高度值分布和表面自相关函数曲线。在生成这个数字表面时,主要输入参量为:  $R_q = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ , 表面宽度为  $3.5 \text{ mm}$ , 表面离散点数 16803。从图中可以看出,数字表面的高度值分布与高斯分布函数吻合得很好;在小的  $x$  偏移范围内,表面自相关函数贴近高斯函数。此外,当  $x$  偏移量较大时(图中未画出),表面自相关函数曲线呈现出随机波动的特征(幅值约在  $-0.03 \sim 0.03$  之间),这归结于对有限宽度的数字表面所进行的自相关运算。

基尔霍夫理论<sup>[13]</sup>是计算粗糙表面电磁波散射场的有效方法。该方法的核心是将电磁波与散射界面相互作用的边值问题简化为界面上每一点的局部切平面对入射电磁波的反射问题,在求得界面各点的反射场后利用基尔霍夫衍射积分求出空间各点的散射场。本文应用基尔霍夫理论计算粗糙表面的远场散射场(散斑场),所考察的粗糙表面限于一维情形。假设一随机粗糙表面  $h(x)$  各点的光场复振幅反射系数为  $R(x)$ , 波长为  $\lambda$  (波数  $k = 2\pi/\lambda$ )、束腰半径为  $L$  的高斯激光束以  $\theta_0$  角入射粗糙表面,并将激光束的波阵面近似看成平面,可在  $\theta_0$  方向上观测远场散斑场( $\theta_e$  和  $\theta_s$  的符号分别由入射光和散射光波矢的  $x$  分量的正负来确定)。

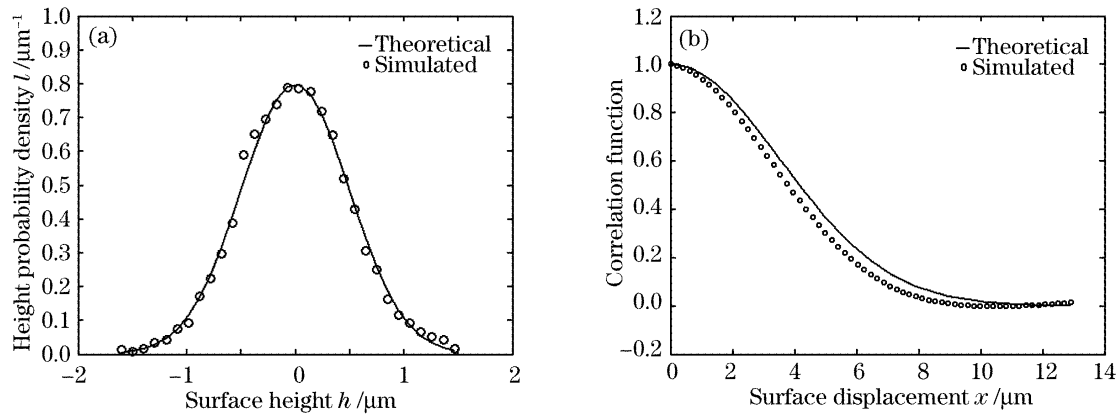


图 1 一个数值生成(a)表面的高度值分布和(b)表面自相关函数

Fig. 1 (a) Height probability-density and (b) auto-correlation function of a computer-generated surface

在忽略表面轮廓的阴影效应和多重散射效应情况下,由基尔霍夫理论导出的远场散射光场复振幅分布为<sup>[13,14]</sup>

$$U_s(\theta_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x) \left[ a(x) \frac{dh(x)}{dx} - c(x) \right] \exp\{i[q_x x + q_z h(x)]\} dx, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} a(x) &= R(x)(\sin \theta_s - \sin \theta_e), \\ c(x) &= R(x)(\cos \theta_s + \cos \theta_e), \\ q_x &= -k(\sin \theta_s - \sin \theta_e), \\ q_z &= -k(\cos \theta_s + \cos \theta_e), \end{aligned}$$

$w(x)$  为表征入射高斯光束径向光场复振幅分布的一维窗口函数:

$$w(x) = \exp[-(x \cos \theta_e / L)^2], \quad (3)$$

鉴于散斑相关系数只取决于散斑场强度的空间相对分布,这里省略了(2)式积分号前的常系数。另外,在实际模拟计算散斑场时,对于小斜率的表面轮廓情形,我们将反射系数  $R(x)$  近似成常数。

从散斑场的表达式(2)中可以看出,各表面点处的散射场对远场散斑场的贡献等于被积函数的系数因子和位相因子之积。对于离散的散斑场数值计算,为了使计算达到一定的精确度,要求数字表面相邻点的间隔足够小。过大的间隔会使被积函数的位相因子在区间内出现振荡,以致严重歪曲积分结果。Peter Lehmann<sup>[14]</sup>在他的散斑场模拟研究中,系统地探讨了积分式(2)的数值求解问题,提出了在两个相邻表面离散点  $x_n$  和  $x_{n+1}$  之间确定插值点数的判据:

$$M_n \geq \max \left\{ 1, \frac{N_0 \Delta x}{2\pi} |q_x|, \frac{N_0}{2\pi} |q_z \Delta h| \right\}, \quad (4)$$

其中  $\Delta x$  为两相邻表面点的横向间距,  $\Delta h$  为两点的高度差。在该判据中  $N_0$  决定了散斑场的计算精度,在一般情况下取  $N_0 = 100$  能够满足要求。本文按照

Peter Lehmann 的散斑场数值算法<sup>[14]</sup>,在 MATLAB 环境下编写了包含数字表面生成模块的散斑场计算程序。程序中,散斑场计算模块的主要步骤是:1)运用判据(4)式确定在一对相邻表面离散点间的插值点数;2)在插值区间,对称选择表面离散点作为插值节点,并利用牛顿向前插值公式进行奇数阶的表面插值;3)用向前和向后差分的平均近似计算各插值点处的斜率;4)利用梯形积分公式计算插值区间内的积分;5)循环计算由各对相邻表面离散点构成的区间积分。在实际计算中,我们对表面进行三阶插值,控制计算精度的参量  $N_0$  取为 200。程序输出包括远场散斑场各点的光场复振幅实部、虚部以及光场强度值。

### 3 角度散斑相关粗糙度测量方法

角度散斑相关方法的原理是根据散斑记录手段和图像/数据处理方法的不同具有不同的具体形式<sup>[8,9]</sup>。本文讨论的原理基于用 CCD 相机测量散斑场的空间强度分布并直接进行数字图像处理的情况。图 2 是其方法的原理示意图。对于一个被测粗糙表面,首先以  $\theta_{e1}$  角入射一波长为  $\lambda$  的激光束 1。再用一焦距为  $f$  的透镜实现对粗糙表面散射光的远场观测。在透镜的后焦面上设置 CCD 相机测量近轴区域内的散斑场强度分布,并将散斑场强度分布的数字图像信号传递到计算机以备后续处理。然后将入射激光束改变一个微小角度,以  $\theta_{e2}$  角入射粗糙表面,依上述方式得到第二幅散斑场数字图像信

号。对所得到的两幅散斑数字图像计算相关系数,运用理论模型即可从散斑相关系数反演出被测表面的粗糙度参量。

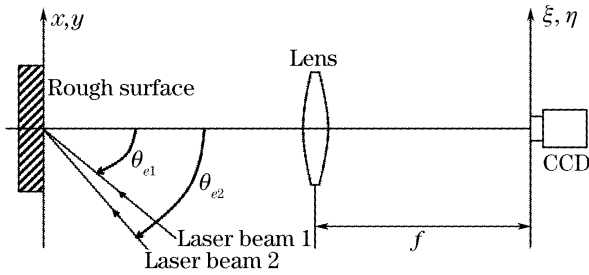


图 2 角度散斑相关粗糙度测量原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the roughness measurement principle based on angular speckle correlation

需要指出的是:在建立散斑相关的数学模型时,通常是通过集平均处理来建立散斑相关参量与表面粗糙度参量的关系<sup>[6~8]</sup>。如果严格按集平均的要求,在计算散斑相关参量时,需要不断移动粗糙表面,以使入射激光束照射到不同的表面区域。对于每个表面区域所获得的两幅散斑图只需在对应位置分别取出一个光强值构成光强值对。集平均是对由不同表面区域所对应的散斑光强值对的统计结果。对于理想表面为平面并且只沿该平面做横向运动的粗糙表面,集平均的角度散斑相关粗糙度测量由于可用两支单通道的光电探测器取代图 2 中的 CCD 相机,能够降低仪器成本。与集平均相对应的是空间平均,即在两幅散斑图面上按照一定的空间对应关系取出很多对散斑强度值来计算散斑相关系数,这时不需或只需少次数(为取平均以提高测量精度)横向移动被测表面。由于在取空间平均时,散斑场的强度分布是通过阵列式光电器件同时获得的,这有利于对高速运动的粗糙表面的瞬时测量,并适用于强振动干扰的工作现场的在线测量。

一般来说,空间平均的角度散斑相关系数与表面粗糙度参量的关系是很难导出的。为建立这种关系,一种可行的途径是在集平均模型的基础上通过数值模拟方法来验证散斑二阶统计的各态历经性,在此基础上确定空间平均角度散斑相关粗糙度测量方法的适用性,以及选择合适测量参量。下面的讨论从集平均模型出发。

本文所讨论的角度散斑相关原理与 Bernd Ruffing<sup>[7]</sup>研究的情形基本相同,不同的是我们并不要求粗糙表面的位置处在透镜的前焦面上。考察散斑场表达式(2),若粗糙表面的高度值远小于表面自相关长度,可对(2)式进行小斜率近似 $[dh(x)/dx \approx 0]$ 。

另外,为了与 CCD 相机的安放位置和成像范围相对应,令  $\theta_s = \bar{\theta}_s + \theta$ , 其中  $\bar{\theta}_s$  为 CCD 相机的成像中心所对应的散射方向,  $\theta$  为相机光敏面上探测点  $\xi$  与成像中心分别对应的散射方向的差角。在图 2 所示的情形中,  $\bar{\theta}_s = 0$ 。当  $\theta$  很小时,  $\sin \theta \approx \xi/f$ ,  $\cos \theta \approx 1$ , (2)式变为与文献[7]的散斑场公式等价的形式。这种等价不是偶然的。根据傅里叶光学理论,粗糙表面在透镜前的位置变动只影响透镜后焦面上光场复振幅分布的相位因子,而不影响光场强度值(假设透镜孔径足够大)<sup>[15]</sup>。因此,我们可以直接利用文献[7]的散斑相关研究结果。

角度散斑相关系数定义为

$$\gamma_{12}^A = \frac{\langle I_1 I_2 \rangle - \langle I_1 \rangle \langle I_2 \rangle}{[\langle I_1^2 \rangle - \langle I_1 \rangle^2 \langle I_2^2 \rangle - \langle I_2 \rangle^2]^{1/2}}, \quad (5)$$

其中  $I_1, I_2$  分别为在第一幅散斑图的  $\xi_1$  位置和第二幅散斑图的  $\xi_2$  位置上的散斑场强度值。 $\langle \rangle$  为集平均。对于表面高度值服从均值为 0 的正态分布、表面自相关函数为高斯函数、轮廓均方根偏差  $\sigma_h$  远大于激光波长的粗糙表面,当激光束束腰半径  $L$  足够大(以形成散射场光场复振幅的圆复高斯分布<sup>[16]</sup>),激光入射角改变量  $\delta\theta_e = \theta_{e2} - \theta_{e1}$  很小,并且  $\delta\theta_e \ll \theta_{e1}$  时,散斑相关系数<sup>[7]</sup>

$$\gamma_{12}^A(\xi_1, \xi_2) = \exp[-(\sigma_h k \delta\theta_e \sin \theta_{e1})^2] \times \exp\left[-\left(\frac{Lk}{2\cos \theta_{e1}}\right)^2 \left(\sin \theta_{e2} - \sin \theta_{e1} + \frac{\xi_1 - \xi_2}{f}\right)^2\right], \quad (6)$$

其中  $\sigma_h$  与  $R_q$  有相同的物理意义,都为粗糙表面的轮廓均方根偏差;不同的是,  $\sigma_h$  通过散斑相关方法测得的,  $R_q$  通过常规方法测得的。因此,  $\sigma_h$  又称为光学轮廓均方根偏差。在(6)式中不难看出角度散斑相关系数与表面自相关长度无关。就测量方法与表面粗糙度标准的适应性来说,这无疑是一个优点。当

$$\xi_2 - \xi_1 = f \cos\left(\frac{\theta_{e1} + \theta_{e2}}{2}\right) \delta\theta_e, \quad (7)$$

时,相关系数

$$\gamma_{12}^A(\xi_1, \xi_2) = \exp[-(\sigma_h k \delta\theta_e \sin \theta_{e1})^2], \quad (8)$$

由(8)式可知,角度散斑相关系数与表面粗糙度参量之间呈简单关系。

用空间平均角度散斑相关方法计算表面粗糙度参量,需要对同一表面轮廓分别在两个激光入射角情况下分别测量计算散斑场的强度分布  $\{I_{1n}\}$  和  $\{I_{2n}\}$ 。强度值  $I_{1n}$  和  $I_{2n}$  在两幅散斑图上所处的位置  $\xi_{1n}$  和  $\xi_{2n}$  由(7)式确定。将两组光强值  $\{I_{1n}\}$  和  $\{I_{2n}\}$

按照相同的下标  $n$  进行配对,应用公式(5) 计算空间平均的散斑相关系数(注意:公式中的“ $\langle \rangle$ ”在这里应理解为空间平均)。由此散斑相关系数通过公式(8) 计算  $\sigma_h$ 。由于随机粗糙表面在不同区域微观特征的不均匀性,通过单个表面区域的角度散斑相关粗糙度测量会带来一定的误差。为减小误差,可由几个不同表面区域的粗糙度测量结果的平均值作为整个表面的测量结果。在角度散斑相关粗糙度模拟测量过程中,对于具有相同表面统计特征但表面轮廓不同的区域模拟可以通过改变数字表面生成过程中产生随机数的种子数来实现<sup>[12]</sup>。

#### 4 结果与讨论

按照介绍的数字表面生成、散斑场计算和空间平均角度散斑相关粗糙度测量方法,我们对  $R_q$  在  $0.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$  范围内的 8 组表面和  $R_q = 15 \mu\text{m}$  的 1 组表面分别进行了模拟粗糙度测量。每组表面具有相同的统计特征。对  $R_q$  在  $0.5 \sim 4.0 \mu\text{m}$  范围内的表面,所使用的散斑模拟输入参量是:表面自相关长度

取为  $R_q$  的 10 倍,表面面积为  $3.5 \text{ mm}^2$ ,表面离散间隔为表面自相关长度的  $1/24$ ,激光波长为  $632.8 \text{ nm}$ ,激光束腰半径为  $0.5 \text{ mm}$ ,入射角  $\theta_{e1}$  和  $\theta_{e2}$  分别为  $15^\circ$  和  $16^\circ$ ,透镜焦距为  $100 \text{ mm}$ ,散斑观测取样间隔为  $5 \mu\text{m}$ ,散斑观测取样点数为 1001。对  $R_q = 15 \mu\text{m}$  的表面,除激光束腰半径为  $2 \text{ mm}$ 、表面面积为  $14 \text{ mm}^2$ 、表面离散间隔为表面自相关长度的  $1/240$  外,其他参量与上述相同。图 3 是  $R_q$  分别为  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $3.5 \mu\text{m}$ ,  $15.0 \mu\text{m}$  时表面的三对模拟散斑场强度分布。可明显看出,随着  $R_q$  的增大,散斑对的强度分布差异变大;随着入射激光束腰半径的增大,散斑平均直径相应减小。

通过考察所模拟计算的每幅散斑场强度分布图,我们发现在  $5 \text{ mm}$ (1001 个采样点)范围内,不同区域的散斑分布离散特征并无明显不同。因此,我们取散斑图的全部 1001 个采样点来计算空间平均的散斑相关系数及相应的光学轮廓均方根偏差  $\sigma_h$ ,并对每组具有相同  $R_q$  值的 10 个表面轮廓计算了  $\sigma_h$  的平均值和均方根偏差,结果见表 1 和图 4。从图、表中可以看出: $\sigma_h$  的平均值  $\bar{\sigma}_h$  与预先给定的粗糙度参量  $R_q$  吻合得较好,对于  $R_q$  大于  $2 \mu\text{m}$  的表面,粗糙度测量相对误差  $M_e = (\bar{\sigma}_h - R_q)/R_q$  小于 15%。对于  $R_q$  较小的表面,相对误差较大。这一点部分与测量条件有关。

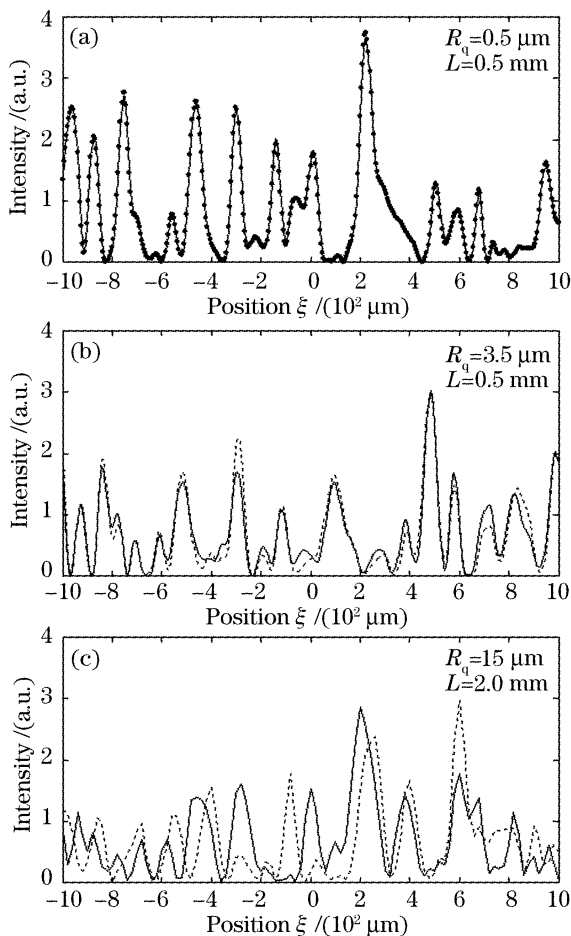


图 3 不同  $R_q$  时的模拟散斑场强度分布。(a)  $0.5 \mu\text{m}$ , (b)  $3.5 \mu\text{m}$ , (c)  $15.0 \mu\text{m}$

Fig. 3 Simulated speckle intensity distribution for different surfaces. (a)  $R_q = 0.5 \mu\text{m}$ , (b)  $3.5 \mu\text{m}$ , (c)  $15.0 \mu\text{m}$

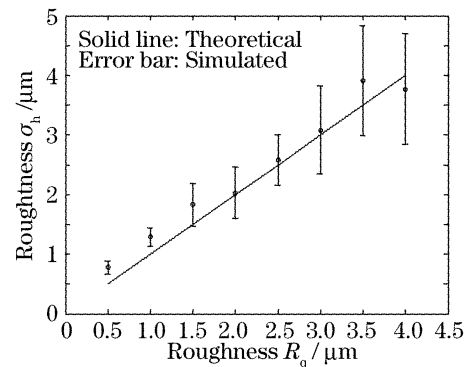


图 4 对几组表面的模拟粗糙度测量结果

Fig. 4 Simulated results of roughness measurement

在实际测量过程中应该合理选取入射角、角度变化量和波长等参量,尽量满足最佳测量条件。这个条件可以通过分析公式(8)得出。令

$$\zeta = \sigma_h k \delta \theta_e \sin \theta_{e1} = 2\pi \delta \sin \theta_{e1} (\sigma_h / \lambda),$$

(8)式化为  $\gamma_{12}^A = \exp(-\zeta^2)$ 。当  $|\zeta| = 1/\sqrt{2} \approx 0.7$  时,散斑相关系数对  $\zeta$  的一阶导数的绝对值具有最大值,表明此处的粗糙度测量灵敏度最高,由相同的散斑相关系数的测量误差所引起的粗糙度测量误差最小。在实际测量过程中应该合理选取入射角、角

度变化量和波长等参量,尽量满足最佳测量条件。从这个最佳测量条件表达式可以看出,波长 $\lambda$ 和角度改变量 $\delta\theta_e = \theta_{e2} - \theta_{e1}$ 对测量灵敏度和精度的影响较为显著,而入射角 $\theta_{e1}$ 在一个较宽的范围内(由于正弦函数的性质)对这两者的影响不大。当然,入射角 $\theta_{e1}$ 不能过大,否则散斑场的中心将远离 CCD 的探测范围,带来散斑强度分布的测量误差。根据这个最佳测量条件,当激光波长 $\lambda$ 为 632.8 nm,入射角 $\theta_{e1}$ 和 $\theta_{e2}$ 分别为 $15^\circ$ 和 $16^\circ$ 时,对 $R_q = 15.6 \mu\text{m}$ 时表面的角度散斑相关粗糙度测量具有最高的测量精度。在表 1 中,我们给出了对 $R_q = 15.0 \mu\text{m}$ 表面的模拟测量结果,它符合这个最佳测量条件的理论预言。

表 1 对几组表面的模拟粗糙度测量结果

Table 1 Simulated results of roughness measurement

Roughness parameter $R_q/\mu\text{m}$	$\sigma_h/\mu\text{m}$	$\sigma_h$ (RMS) / $\mu\text{m}$	Relative error $M_o/\%$
0.5	0.78	0.11	55
1.0	1.29	0.15	29
1.5	1.83	0.36	22
2.0	2.03	0.43	1
2.5	2.58	0.42	3
3.0	3.08	0.74	3
3.5	3.92	0.92	12
4.0	3.77	0.93	6
15.0	15.61	2.40	4

## 5 结 论

运用数值模拟方法研究了空间平均角度散斑相关粗糙度测量问题,证实了集平均的角度散斑相关数学模型应用在散斑图面上取空间平均的有效性。在同一表面只需对少数个区域进行测量并对测得的粗糙度参量取平均,即可获得足够的测量精度。对于 $R_q$ 大于 $2.0 \mu\text{m}$ 的表面,测量相对误差小于 15%。对于 $R_q$ 较小的表面,相对误差较大。此外,以 $R_q$ 为 $15.0 \mu\text{m}$ 表面的模拟测量结果为例,验证了最佳测量条件。通过对最佳测量条件的分析,可知激光波长和入射角改变量对测量灵敏度和精度的影响较为显著,而入射角 $\theta_{e1}$ 在一个较宽的范围内对这两者的影响不大。本方法适用于大粗糙度表面。

## 参 考 文 献

1 Liu Chunxiang, Cheng Chuanfu, Ren Xiaorong *et al.*. Green's

- function method of light scattering from random surface compares with Kirchhoff's approximation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(2): 427~435 (in Chinese)
- 刘春香,程传福,任晓荣等. 随机表面散射光场的格林函数法与基尔霍夫近似的比较[J]. *物理学报*, 2004, **53**(2): 427~435
- 2 Zhang Ningyu, Liu Deli, Teng Shuyun *et al.*. Experimental study on the properties of autocorrelation function of image speckles produced by weak random screens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(6): 696~701 (in Chinese)
- 张宁玉,刘德利,滕树云等. 弱散射屏的像面散斑自相关函数特性的实验研究[J]. *光学学报*, 2001, **21**(6): 696~701
- 3 Wang Qiankai. Effects of correlative structure of rough surface on the conditional statistical distributions of phase difference for Gaussian speckle in far field[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(7): 963~966 (in Chinese)
- 汪千凯. 粗糙表面相关结构对远场散斑相位差统计性质的影响[J]. *光学学报*, 1996, **16**(7): 963~966
- 4 Zhou Lili, Zhao Xuezheng, Zheng Junli. A surface roughness measuring method based on intensity correlation function of speckles[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(7): 50~53 (in Chinese)
- 周莉莉,赵学增,郑俊丽. 基于散斑强度相关函数的表面粗糙度测量方法[J]. *光电工程*, 2004, **31**(7): 50~53
- 5 Lili Zhou, Xuezheng Zhao. Real-time measurement of surface roughness based on dynamic speckles[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5638**: 395~403
- 6 H. M. Pedersen. Second-order statistics of light diffracted from gaussian, rough surfaces with applications to the roughness dependence of speckles[J]. *Optica Acta*, 1975, **22**(6): 523~535
- 7 Bernd Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement; a theoretical study[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1297~1304
- 8 D. Léger, E. Mathieu, J. C. Perrin. Optical surface roughness determination using speckle correlation technique[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(4): 872~877
- 9 S. L. Toh, C. Quan, K. C. Woo *et al.*. Whole field surface roughness measurement by laser speckle correlation technique[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**: 427~434
- 10 A. K. Fung, M. F. Chen. Numerical simulation of scattering from simple and composite random surfaces[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(12): 2274~2284
- 11 B. Roy Frieden. *Probability, Statistical Optics, and Data Testing* [M]. Second edition, Berlin: Springer-Verlag, 1991
- 12 Stephen K. Park, Keith W. Miller. Random number generators; good ones are hard to find[J]. *Commun. of the ACM*, 1988, **31**(10): 1192~1201
- 13 J. A. Ogilvy. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces* [M]. Bristol: Adam Hilger, 1991
- 14 Peter Lehmann. Untersuchungen zur Lichtstreuung an technischen Oberflächen im Hinblick auf eine prozessgekoppelte laseroptische Rauheitsmessung[D]. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995
- 15 Joseph W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics* [M]. 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1996
- 16 Li Jitao, Xian Tao, Su Xianyu. Computer simulation for premises of forming normalization speckle [J]. *J. Sichuan University (Natural Science Edition)*, 1997, **34**(1): 56~61 (in Chinese)
- 李继陶,姜涛,苏显渝. 形成正态散斑条件的计算机模拟研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 1997, **34**(1): 56~61