

文章编号: 0253-2239(2008)02-0279-06

# 基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量 及影响因素分析

刘恒彪 池景春

(同济大学理学部, 上海 200092)

**摘要** 粗糙表面在多波长激光束照射下形成的多色散斑场显示出散斑延长效应, 利用此效应可以测量表面粗糙度, 并且测量结果在一定条件下不受粗糙表面横向特征的影响。通过模拟计算随机粗糙表面的多色散斑场, 以空间平均的多色散斑场局部自相关函数研究了平均散斑延长率 $\langle\chi\rangle$ 对表面轮廓均方根偏差 $\sigma_h$ 的依赖关系, 分析了测量系统因素, 如入射激光波长组合、成像器件光敏单元尺寸和动态范围对测量结果的影响。结果表明, 以空间平均的局部自相关函数代替集平均的散斑自相关函数描述多色散斑延长效应是有效的; 为达到一定的粗糙度测量精度, 应选择合适的人射激光波长组合和合适的成像器件光敏单元尺寸。

**关键词** 光学测量; 表面粗糙度; 激光散斑; 多色散斑自相关; 散斑延长; 散射场模拟

中图分类号 TH741 文献标识码 A

## Analysis of Affecting Factors on Surface Roughness Measurement Based on Polychromatic Speckle Elongation

Liu Hengbiao Chi Jingchun

(School of Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Speckle elongation phenomenon can be observed when rough surface is illuminated by a polychromatic laser beam. Based on this dependence the surface roughness can be determined, in which the influence of transverse characteristic of rough surface can be neglected when certain conditions are satisfied. Through numerical simulation of polychromatic speckle pattern of random rough surface, by application of the local autocorrelation function of polychromatic speckle pattern using spatial average, the dependence of average speckle elongation ratio  $\langle\chi\rangle$  on root-mean-square  $\sigma_h$  of surface profile amplitude is studied, and the influences of experimental factors are investigated, such as the wavelength combination of laser beams, the cell size and the resolution depth of image acquisition device on measure result. The results show that describing the polychromatic speckle elongation effect by autocorrelation function using spatial average instead of ensemble average is effective, and to obtain enough precision of surface roughness measurement, appropriate wavelength combination of laser beams and appropriate cell size of image acquisition device should be chosen.

**Key words** optical measurement; surface roughness; laser speckle; polychromatic speckle autocorrelation; speckle elongation; simulation of scattering field

## 1 引 言

粗糙度是衡量产品表面加工质量的一个重要技术指标。利用激光束在粗糙表面散射所形成的散斑来检测表面粗糙度是一种有开发潜力的在线测量方法。与机械(或光学)轮廓仪测量方法不同,散斑法

不直接扫描表面的微观轮廓,而是通过散斑场的统计参量反演出表面粗糙度参量。一般来说,粗糙表面轮廓的横向特征和纵向特征都会影响散斑场统计参量<sup>[1]</sup>,这与表面粗糙度标准(GB/T3505-2000)和生产实际不相适应。双波长散斑相关法<sup>[2]</sup>、双角度

收稿日期: 2007-06-11; 收到修改稿日期: 2007-08-13

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2005]383号)资助课题。

作者简介: 刘恒彪(1962-),男,教授,主要从事光学测量技术方面的研究。E-mail: liuhb62@mail.tongji.edu.cn

散斑相关法<sup>[2,3]</sup>和多色散斑自相关法<sup>[4~8]</sup>在一定条件下可忽略表面横向特征对散斑场统计参量的影响,建立散斑场统计参量与粗糙表面纵向特征值的直接关系。多色散斑自相关法与另外两种方法相比,具有测量过程调节简单、容易实现仪器小型化的优点。这种测量方法利用的是多色散斑斑粒延长效应(Speckle elongation effect)<sup>[9]</sup>。当两支或两支以上具有微小波长差的激光束同轴入射粗糙表面,由于不同波长的单色散斑沿径向相互错位,使得合成的多色散斑场在一个环形区域内出现散斑斑粒延长现象;斑粒延长的幅度依赖于表面粗糙度,表面越粗糙,延长幅度越小。通过光电成像器件采集多色散斑场的强度分布信号,计算衡量散斑斑粒延长幅度的统计参量(如散斑延长率),运用理论模型即可反演出表面粗糙度参量。

多色散斑自相关表面粗糙度测量方法的测量精度和测量范围与所采用的激光波长组合、探测散斑场强度分布的光电成像器件的光敏单元尺寸等因素有关。本文采用数值模拟方法研究这些因素对测量结果的影响,为建立表面粗糙度测量实验系统提供依据。

## 2 多色散斑场的模拟计算

一个典型的多色散斑自相关表面粗糙度测量系统如图 1 所示,由不同波长的高斯激光束共轴构成的多色合成激光束垂直入射粗糙表面;表面的散射光经分光棱镜转向后,在一正透镜的后焦面形成远场多色散斑场;散斑场的强度分布由 CCD 相机采集,经模数转换后存储到计算机中进行后续处理。

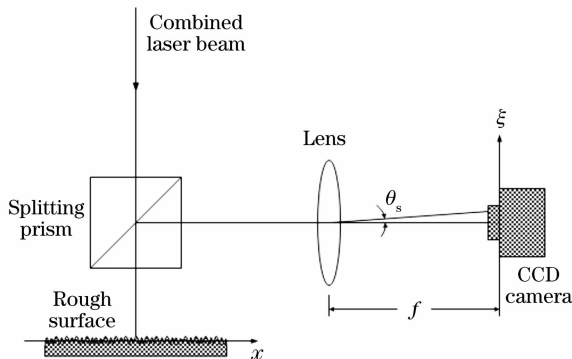


图 1 多色散斑自相关表面粗糙度测量实验装置

Fig. 1 Experimental setup for surface-roughness measurement based on polychromatic speckle autocorrelation function

多色散斑场是由各单色散斑场强度叠加而成的。计算单色散斑场可以应用基尔霍夫理论<sup>[10]</sup>,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再利用基尔霍夫衍射理论积分求出空间各点的散射场。这里只考虑一维粗糙表面的情形。当一束波长为  $\lambda$ ,波数  $k=2\pi/\lambda$ ,光斑半径为  $L$  的高斯光束垂直入射粗糙表面时,在图 1 中透镜后焦面的散射光场复振幅为

$$U(\theta_s) = \int_{-\infty}^{+\infty} w(x) \left[ a(x) \frac{dh(x)}{dx} - c(x) \right] \times \exp\{i[q_x x + q_z h(x)]\} dx, \quad (1)$$

式中

$$\begin{aligned} a(x) &= R_F(x) \sin \theta_s, \\ c(x) &= R_F(x) (1 + \cos \theta_s), \\ q_x &= -k \sin \theta_s, \\ q_z &= -k (1 + \cos \theta_s), \\ w(x) &= \exp[-(x/L)^2], \end{aligned}$$

$\theta_s$  为散射角(如图 1),  $h(x)$  为粗糙表面上横坐标  $x$  处的轮廓高度值,  $R_F(x)$  为表面的光场复振幅反射系数,对于轮廓斜率较小的粗糙表面,表面各点的反射系数可近似视为常量,  $w(x)$  为入射光束窗口函数。在(1)式的积分号前省略了常系数。

多色散斑场的模拟计算可分为三个步骤:1)生成数字粗糙表面;2)计算单色散斑场的强度分布;3)合成各单色散斑场为多色散斑场。本文讨论具有高斯自相关函数的随机粗糙表面,这类表面的数值生成以及根据(1)式模拟计算单色散斑场已在文献[3]中介绍了。图 2 给出了轮廓均方根偏差  $\sigma_h$  为  $0.8 \mu\text{m}$  的粗糙表面的三个单色远场散斑场强度分布及其合成的多色散斑场强度分布的模拟计算结果。从图 1 可以看出,由同轴入射的不同波长激光束产生的单色散斑场强度分布曲线形状相似,随着观测点与散斑

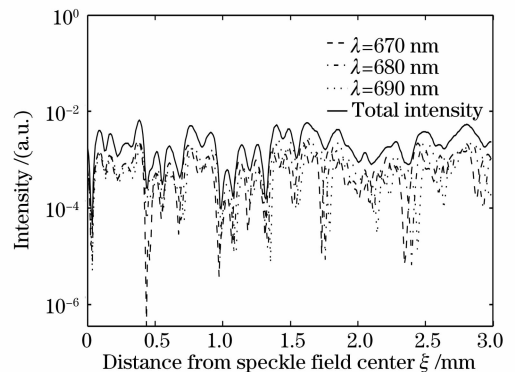


图 2 多色散斑场的强度分布

Fig. 2 Intensity distribution of polychromatic speckle pattern

场中心距离的增大,不同波长的单色散斑场强度分布曲线相互错位;观测点距离散斑场中心越远、波长差越大,相关单色散斑场强度分布曲线的错位幅度越大。在散斑场中心区域,各单色散斑场强度分布的错位很小,合成的多色散斑场强度分布与各单色散斑场强度分布基本相同;在靠近中心区域的一定范围内,各单色散斑场强度分布相互错位使得合成的多色散斑斑粒比单色散斑斑粒有所延长;在离散斑场中心更远的观测区域,各单色散斑场的强度分布曲线完全错开,合成的多色散斑场不再显示出斑粒延长效应。

$$\gamma(\xi_1, \xi_2) = \frac{\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N S_m S_n \exp[-4\sigma_h^2(k_m - k_n)^2] \exp\left[-\frac{L^2}{4f^2}(k_m \xi_1 - k_n \xi_2)^2\right]}{\prod_{j=1}^2 \left\{ \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N S_m S_n \exp[-4\sigma_h^2(k_m - k_n)^2] \exp\left[-\frac{L^2}{4f^2} \xi_j^2 (k_m - k_n)^2\right] \right\}^{1/2}}, \quad (3)$$

式中  $N$  为照射粗糙表面的多色激光束的波长个数,  $k_m$  和  $k_n$  分别为第  $m$  和第  $n$  个波长单色激光的波数,  $S_m = \frac{\langle I(\xi_1, k_m) \rangle}{\langle I(\xi_1) \rangle}$  和  $S_n = \frac{\langle I(\xi_2, k_n) \rangle}{\langle I(\xi_2) \rangle}$  分别为在  $\xi_1$  和  $\xi_2$  位置上相应波长的单色散射光强度占合成多色散射光强度的比重。(3)式成立的前提是:1) 表面的理想几何形状是平面,表面微观轮廓高度  $h(x)$  服从高斯分布,其均方根偏差  $\sigma_h \geq \lambda/4$ ;2) 表面轮廓具有高斯型自相关函数,并满足小斜率近似  $dh(x)/dx \approx 0$ ;3) 构成多色散斑场的各单色散斑场的光场复振幅均是圆形复数高斯分布随机变量;4) 入射粗糙表面的是具有相同光斑直径的同轴高斯光束,光斑直径远大于表面的自相关长度;5) 入射光方向和远场透镜光轴垂直于理想几何表面,在入射面上进行观测

### 3 散斑延长率与表面粗糙度的关系

多色散斑自相关函数<sup>[4,8]</sup>是定量描述散斑延长效应的有效工具

$$\gamma(\xi_1, \xi_2) = \frac{\langle \Delta I(\xi_1) \Delta I(\xi_2) \rangle}{[\langle \Delta I^2(\xi_1) \rangle \langle \Delta I^2(\xi_2) \rangle]^{1/2}}, \quad (2)$$

式中  $\xi_1, \xi_2$  为散斑场位置矢量,  $\langle \cdot \rangle$  为集平均算符,  $\Delta I = I - \langle I \rangle$  为多色散斑场某点的强度  $I$  对该点处散斑强度集平均  $\langle I \rangle$  的偏差。根据莱曼表示的研究结果<sup>[4]</sup>,多色散斑场的自相关函数在一定条件下只取决于表面微观轮廓的幅度参量(纵向特征):

(散斑场位置  $\xi_1$  和  $\xi_2$  可用标量  $\xi_1$  和  $\xi_2$  来表示)。

在数字散斑相关测量技术中,对物面变形前后的散斑场进行相关运算,以测量物面变形量<sup>[11,12]</sup>。这里参与相关运算的数据是两幅散斑图的灰度值,相关运算是一种空间平均。空间平均的相关运算能发挥阵列式光电成像器件的并行、快速采样优势,这对本文所讨论的问题是富有吸引力的。因此,尝试首先对散斑自相关函数表达式(2)作一个实质性改造,以散斑场统计的空间平均代替集平均。另外,限定在入射面上观测散斑场,(2)式中的位置矢量  $\xi_1$  和  $\xi_2$  以相应的标量  $\xi_1 = i_a \delta \xi$  和  $\xi_2 = (i_a + \Delta i) \delta \xi$  代替,其中  $\delta \xi$  为散斑场采样间距,  $i_a$  为第一采样点的序数,  $\Delta i$  为第二采样点与第一采样点的序数差。最后得到离散形式的空间平均散斑自相关函数

$$\gamma_s(i_a, \Delta i) = \left[ \sum_{i=i_a}^{i_a+l-\Delta i} I_{ac}(i) I_{ac}(i + \Delta i) \right] / \left[ \sum_{i=i_a}^{i_a+l-\Delta i} I_{ac}(i) I_{ac}(i) \sum_{i=i_a}^{i_a+l-\Delta i} I_{ac}(i + \Delta i) I_{ac}(i + \Delta i) \right]^{1/2}, \quad (4)$$

$l$  为计算自相关函数的局域长度,  $I_{ac}(i) = I(i) - \bar{I}$  为多色散斑场强度分布的交流分量,  $\bar{I}$  为散斑场强度的全场平均值。由于多色散斑延长率与散斑场位置有关,  $l$  只能取较小的值,因此  $\gamma_s(i_a, \Delta i)$  可称为局部自相关函数。必须指出,以空间平均代替集平均来计算散斑场自相关函数依赖于散斑场的各态历经性。

对于给定的观测点  $\xi_1 = i_a \delta \xi$ , 当  $\Delta i = 0$  时,多色散斑场的局部自相关函数  $\gamma_s(i_a, \Delta i)$  达到最大值;随着  $\Delta i$  的增大,  $\gamma_s(i_a, \Delta i)$  先是逐渐减小,继而出现波

动状态。为了定量描述散斑延长的幅度,可以在一个较小的范围内应用高斯函数拟合  $\gamma_s(i_a, \Delta i)$  曲线,这时高斯拟合函数的宽度(当高斯函数的纵坐标由最大值降低到它的  $1/e$  时,相应横坐标的改变量即为此宽度)反映了散斑斑粒的大小。定义散斑延长率  $\chi$  为高斯拟合函数的宽度对最小波长单色散斑的平均半径的比值,用于描述多色散斑延长幅度。

为考察利用多色散斑局部自相关函数反演表面粗糙度参量的有效性,计算了  $\sigma_h$  分别为  $0.2 \mu\text{m}$ ,

0.4  $\mu\text{m}$ , 0.8  $\mu\text{m}$ , 1.6  $\mu\text{m}$ , 3.2  $\mu\text{m}$  的 5 组随机粗糙表面对波长为 670 nm 和 680 nm 激光束的单色以及合成多色散斑场; 计算了在散斑场不同位置的散斑延长率。在模拟计算过程中, 各粗糙表面的自相关长度取为各自  $\sigma_h$  的 12 倍, 表面离散间距为表面自相关长度的 1/24, 所生成数字表面的宽度为 3 mm; 激光束光斑半径为 0.5 mm; 透镜焦距为 100 mm; 散斑场采样点数为 2001, 采样间距为 670 nm 波长单色散斑平均直径  $d_{\text{SP}}$  的 1/10。为减小因粗糙表面微观特征不均匀性带来的误差, 对每种粗糙度都生成了 100 个表面轮廓, 模拟计算了相应的单色和多色散斑场, 最后计算了这 100 个轮廓的多色散斑场的平均散斑延长率  $\langle\chi\rangle$ 。在统计分析多色散斑场时, 局域长度为 14.4 $d_{\text{SP}}$ , 对局部自相关函数进行高斯函数拟合的拟合长度  $R_L = d_{\text{SP}}$ ; 拟合前, 将各对与散斑场中心对称的局域的局部自相关函数曲线进行了合并, 构成一条具有正、负位置偏移量的完整曲线。

数据处理结果表明, 通过模拟计算得到的平均散斑延长率  $\langle\chi\rangle$  与(3)式的理论值基本吻合(见图 3); 在散斑场一个固定区域内的给定位置  $\xi_1$ , 平均散斑延长率随表面粗糙度的增大而减小, 对于不同粗糙度, 平均散斑延长率的峰值位置相距很近(见图 4); 鉴于图 4 中小粗糙度的平均散斑延长率曲线包容大粗糙度的平均散斑延长率曲线的特性, 可以用平均散斑延长率  $\langle\chi\rangle$  在固定区间的平均值表征表面粗糙度。图 5 给出了在固定区间  $\xi_1 = 30 \sim 85d_{\text{SP}}$  内不同粗糙度的  $\langle\chi\rangle$  空间平均值。从图 5 可以看出, 对多色散斑局部自相关函数进行高斯函数拟合的拟合长度  $R_L$  的取值对粗糙度的测量精度有影响; 当  $R_L = 1.0d_{\text{SP}}$  时, 对于大粗糙度表面, 模拟的  $\langle\chi\rangle$  空间平均值与理论结果吻合得很好, 对于小粗糙度表

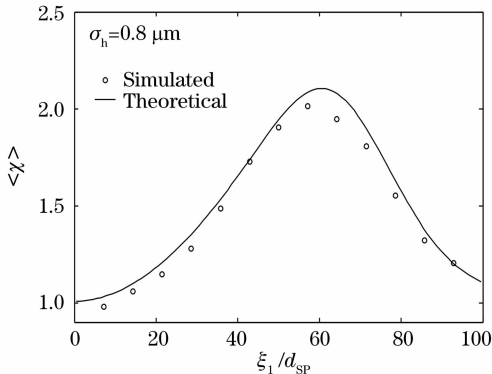


图 3 平均散斑延长率随观测位置的变化

Fig. 3 Dependence of average speckle elongation ratio on observing position

面,  $\langle\chi\rangle$  空间平均值小于理论值; 当  $R_L = 1.1d_{\text{SP}}$  时, 各粗糙度表面的  $\langle\chi\rangle$  空间平均值都上移, 都大于理论值。除图 5 外, 本文均取拟合长度  $R_L = 1.0d_{\text{SP}}$ 。

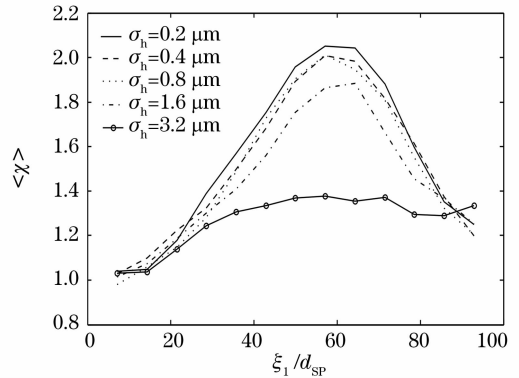


图 4 对不同粗糙度表面的多色散斑延长效应的模拟结果  
Fig. 4 Simulated results of polychromatic speckle elongation effect for surfaces with different roughness parameter

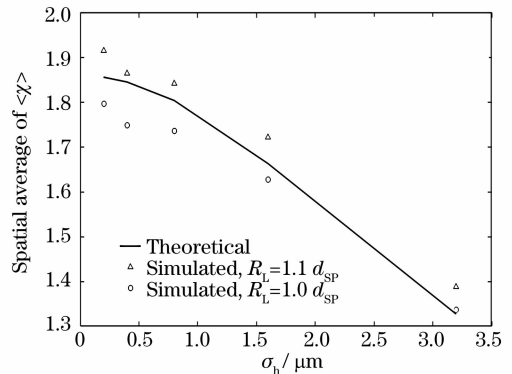


图 5  $\langle\chi\rangle$  的空间平均值与表面粗糙度的关系  
Fig. 5 Dependence of spatial average of  $\langle\chi\rangle$  on surface roughness

### 4 粗糙度测量的影响因素分析

多色散斑自相关表面粗糙度测量系统的参量, 如入射激光波长组合、成像器件的光敏单元尺寸和动态范围等, 原则上都会影响测量精度和测量范围。

#### 4.1 波长组合的影响

多色散斑延长效应与入射激光束的波长组合密切相关。当入射激光束由两种波长的单色激光合成时, 它们的波长差决定了散斑延长区域的位置。从散斑自相关函数的理论表达式(3)出发, 根据介绍的散斑延长率  $\chi$  计算方法, 计算了  $\lambda_1 = 670 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2$  分别为 680 nm, 684 nm 和 690 nm 三种波长情况下不同粗糙度的散斑延长率  $\chi_E$  (下标 E 表示集平均) 曲线, 如图 6 所示。从图中可以看出, 对于确定的波长组合, 在相同的散斑场观测位置, 散斑延长率随粗糙度的增大而减少; 对于同一粗糙度, 波长差越小, 散

斑延长率峰值位置偏离散斑场中心越远,出现散斑延长效应的区域越宽,波长差越大,散斑延长率反映粗糙度变化的灵敏度越高,但同时粗糙度响应的范围亦降低。

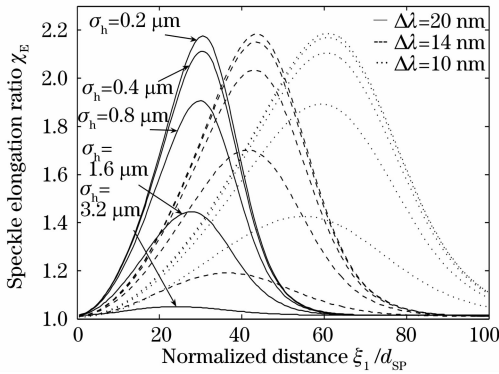


图 6 散斑延长率随入射光波长差和表面粗糙度变化的理论关系 ( $\lambda_1 = 670 \text{ nm}$ )

Fig. 6 Theoretical dependence of speckle elongation ratio on wavelength difference and surface roughness ( $\lambda_1 = 670 \text{ nm}$ )

#### 4.2 成像器件光敏单元尺寸的影响

在进行散斑场理论研究时,散斑场分布反映的是各个理想点的强度,而对于实际的测量系统,成像器件的光敏单元尺寸总有一定大小。光敏单元的尺寸导致对散斑场强度分布进行数据采集时的局部积分效应,这无疑会影响通过理论模型反演粗糙度的精度。为考察这种影响,重新模拟计算了  $\sigma_h = 0.8 \mu\text{m}$  表面的多色散斑场。模拟时,数字表面和散斑场的模拟参量除散斑场采样密度以外均与图 3 的情形相同,采样密度比图 3 情形提高了 20 倍。在得到散斑场强度分布数据后,将相邻多个采样点的强度相加来模拟光敏单元对散斑场强度的积分效应。图 7 给出了对应不同光敏单元尺寸  $e$  的平均散斑延长率  $\langle \chi \rangle$  曲线。从图 7 中可以看出,随着  $e$  的增大,  $\langle \chi \rangle$  值相应增大,

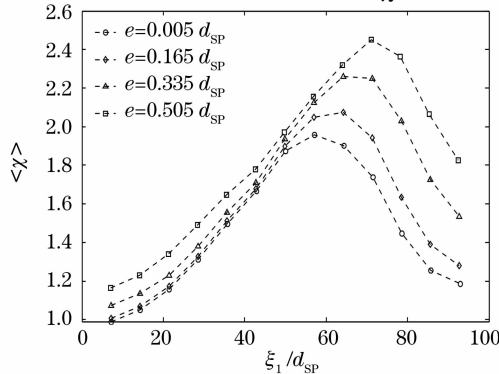


图 7 成像器件光敏单元尺寸对表面粗糙度测量结果的影响  
Fig. 7 Influence of cell size of image acquisition device on measure result of surface roughness

曲线的峰值点向右偏移。光敏单元尺寸增大的效果等价于减小了粗糙度的测量值(对比图 6)。

#### 4.3 成像器件动态范围的影响

光电成像器件采集的多色散斑场强度信号是以数字形式存储到计算机的。原则上,成像器件的动态范围会影响测量精度。为考察这种影响,对不同粗糙度表面的模拟散斑场数据进行了不同动态范围的量化处理,重新计算了平均散斑延长率  $\langle \chi \rangle$ 。结果表明,动态范围对散斑延长率的影响不大,如图 8 所示。这个结果是可以理解的,因为散斑延长率是对散斑横向特征的量度,主要对成像器件的光敏单元尺寸敏感,而对散斑场强度的量化误差不太敏感。

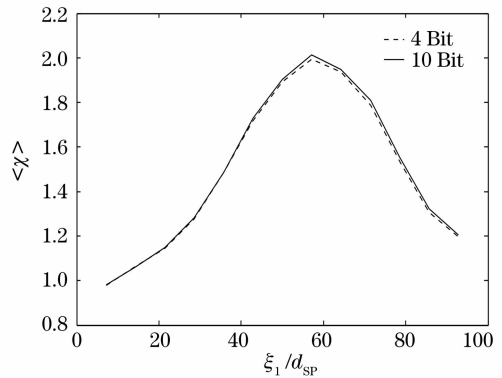


图 8 成像器件动态范围对表面粗糙度测量结果的影响  
Fig. 8 Influence of resolution depth of image acquisition device on measure result of surface roughness

### 5 结 论

以数值模拟方法研究了基于多色散斑延长效应的表面粗糙度测量问题,通过模拟计算轮廓均方偏差分别为  $0.2 \mu\text{m}$ 、 $0.4 \mu\text{m}$ 、 $0.8 \mu\text{m}$ 、 $1.6 \mu\text{m}$ 、 $3.2 \mu\text{m}$  时一维随机粗糙表面的多色散斑场,应用空间平均的局部散斑自相关函数定义的散斑延长率表征表面粗糙度的大小;分析了入射激光波长组合、成像器件光敏单元尺寸和动态范围对测量结果的影响。研究表明,以空间平均的局部自相关函数代替集平均的散斑自相关函数描述多色散斑延长效应是有效的,为达到一定的粗糙度测量精度,应该选择合适的入射激光波长组合和合适的成像器件光敏单元尺寸。

#### 参 考 文 献

1 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  
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

- 2 Bernd Ruffing. Application of speckle-correlation methods to surface-roughness measurement; a theoretical study[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1986, **3**(8): 1297~1304
- 3 Wang Jing, Liu Hengbiao, Li Tongbao. Numerical simulation of surface-roughness measurement based on angular speckle-correlation method using spatial average [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 259~264  
王 婧,刘恒彪,李同保. 空间平均的角度散斑相关粗糙度测量模拟研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 259~264
- 4 Peter Lehmann, Stefan Patzelt, Armin Schöne. Surface roughness measurement by means of polychromatic speckle elongation[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(10): 2188~2197
- 5 Peter Lehmann. Aspect ratio of elongated polychromatic far-field speckles of continuous and discrete spectral distribution with respect to surface roughness characterization[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(10): 2008~2014
- 6 C. T. Stansberg. Surface roughness measurements by means of polychromatic speckle patterns[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 4051~4060
- 7 N. Nagamatsu, K. Nakagawa, T. Asakura. The autocorrelation function of polychromatic laser speckle patterns near the image plane[J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 1983, **15**(6): 507~512
- 8 Y. Tomita, K. Nakagawa, T. Asakura. Fibrous radial structure of speckle patterns in polychromatic light[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(18): 3211~3218
- 9 T. Iwai, N. Takai, T. Asakura. Statistical properties of the dynamic dichromatic laser speckle [J]. *Opt. Commun.*, 1982, **44**(1): 13~18
- 10 J. A. Ogilvy. *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces* [M]. Bristol: Adam Hilger, 1991
- 11 Qiu Tian, Guo Li, Li Donghui *et al.*. Digital speckle marginal correlation measuring method [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1092~1096  
邱 天,郭 立,李东晖 等. 数字散斑的边缘相关测量法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1092~1096
- 12 Chen Fanxiu, He Xiaoyuan, Lin Baoping. Application of micro-digital speckle correlation technique to study mechanical property of advanced thin film material [J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1104~1108  
陈凡秀,何小元,林保平. 显微数字散斑相关测量新型薄膜的力学性能[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1104~1108