

## 微粗糙表面参数对激光散斑场的影响规律分析

鄧魏柯, 杜小平, 王阳\*, 杨步一

航天工程大学, 北京 101416

**摘要** 为分析粗糙表面参数对激光散斑统计特性的影响规律,需研究激光散斑与目标材料间的映射关系。通过计算机模拟了具有不同均方根粗糙度、相关长度、偏度、峰度特性组合的随机粗糙表面,并基于激光散斑场的理论模型对由这些随机表面生成的激光散斑图案进行了分析与处理。结果表明,各项表面特征参数均会对激光散斑场统计特性产生影响,且不同表面参数组合下形成的激光散斑场表现出了极大的特异性。因此,所研究的激光散斑统计特征或可作为区分材料表面的有效信息在未来加以利用。

**关键词** 统计光学; 激光散斑; 粗糙表面; 计算机仿真; 材料识别

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1103001

## Analysis of Influences of Micro-Rough Surface Parameters on Laser Speckle Field

Gao Weike, Du Xiaoping, Wang Yang\*, Yang Buyi

Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** In order to analyze the influences of rough surface parameters on the statistical characteristics of laser speckles, it is necessary to study the mapping relationship between laser speckles and target materials. Random rough surfaces with different combinations of root-mean-square roughness, correlation length, skewness, and kurtosis are simulated by computer, and the laser speckle patterns generated by these random surfaces are analyzed and processed based on the theoretical model of the laser speckle field. The results show that various surface characteristic parameters will affect the statistical characteristics of the laser speckle field, and the laser speckle fields formed under different combinations of surface parameters show great specificity. Therefore, the statistical characteristics of laser speckles studied in this paper may be used as effective information to distinguish the surface of materials in the future.

**Key words** statistical optics; laser speckles; rough surface; computer simulation; material identification

**OCIS codes** 030.6140; 030.5770; 120.6660

## 1 引言

自 20 世纪 60 年代激光器诞生以来,研究人员便发现了一种十分奇怪的现象:即使实验所使用的激光光束相对均匀,在接收从纸或墙壁等粗糙表面上反射的激光回波时,仍能观察到对比度高而尺寸小的颗粒图样,即激光散斑。激光散斑的存在严重影响了光学系统的成像质量,干扰了人们对图像信息的判别和提

取。因此,长期以来激光散斑被视为是影响图像质量的噪声而被抑制<sup>[1]</sup>。随着激光散斑现象研究的不断深入,人们逐渐认识到激光散斑是激光光场与目标表面微观结构相互作用的结果,散斑图案的确切细节与目标表面微观结构密切相关,散斑内部隐藏着与目标表面材料、粗糙度、形状、深度等特性有关的信息<sup>[2-6]</sup>。近年来,随着图像识别技术的不断发展,一种基于散斑的目标特征识别技术逐渐引起了人们的

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-26; 录用日期: 2021-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(61805284)

\* E-mail: 361497549@qq.com

兴趣,并已在目标材料识别<sup>[7-8]</sup>、行为姿态识别<sup>[9]</sup>、物体识别<sup>[10-13]</sup>等方面取得了良好的效果。

尽管人们已经得知深度学习方法在散斑识别领域十分有效,但该类方法往往仅局限于图像分类层面,而忽视了目标材料和散斑之间的内在影响因素。同时,深度学习方法需要对大量的先验数据进行训练,而在实际应用中,真实的训练数据通常较难获取,并且随着待识别目标种类的不断增多,庞大的数据库也导致该方法难以应用于实际。因此,从物理特性层面研究激光散斑图案及其统计特性的变化、探索目标材料参数对散斑的影响规律,有助于更好地提取目标特征、加快基于激光散斑的目标材料识别速度。目前,针对激光散斑统计模型的研究已有很多,其大体上可分为两大类:一类以 Goodman<sup>[14]</sup>提出的“随机行走”理论为代表,该类理论从数理统计的角度出发,详细解释了激光散斑现象的成因与发展特点,对激光散斑种类进行了详细的分类,为激光散斑的研究提供了数学基础。但该类理论仅局限于数理统计角度,并未与实际现象相关联,具有一定的局限性;另一类则多以基尔霍夫标量散射理论为基本出发点,其建立了粗糙散射目标与激光散斑光场间的具体联系,该类理论详细分析了散斑统计特性与目标表面粗糙度<sup>[15-17]</sup>、形状<sup>[18-19]</sup>以及动力学参数<sup>[20]</sup>间的内在联系,具有更大的实际意义和应用价值,但其模型准确性依赖于具体的应用环境,需与偏振等散射理论相结合。

本文以基尔霍夫标量散射理论为基础建立了远场条件下粗糙表面的激光散斑场统计模型,分析了激光散斑统计特性随表面均方根粗糙度、相关长度、峰度、偏度等表面结构特征的变化趋势,这为未来进一步研究基于激光散斑的目标材料识别方法提供了基础。

## 2 微粗糙表面激光散斑场的建立

当目标表面粗糙度小于激光探测波长时,该反射表面可被称为微粗糙表面,由该表面产生的激光散斑为部分散射散斑。此时,该粗糙表面斜率与高度起伏函数均相对较小,粗糙表面对入射光波的遮蔽效应和多重散射效应并不明显,可近似为单次散射情况。如图 1 所示,激光器发出的相干光束照射到粗糙表面,并经粗糙面单次反射后在观察面上形成了激光散斑图像。

假定入射波为幅度  $E = A \exp(ikl)$  的平面波,  $A$  为入射波幅度,入射点为  $Q$ ,观察点为  $P$ ,入射角为

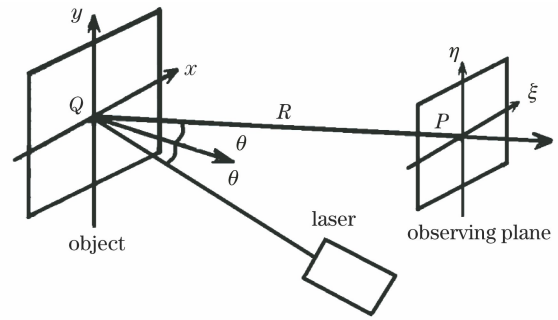


图 1 散斑场形成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of speckle field formation  
 $\theta$ ,以粗糙平面中心为坐标原点建立平面直角坐标系  $o-xyz$ ,则  $Q$  点坐标为  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $P$  点坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ ,  $l$  为激光器到  $Q$  点的位置矢量,  $r$  为  $P$  到  $Q$  点的位置矢量。  $o'-\xi\eta\zeta$  为垂直于散射方向的观察平面坐标系,两坐标原点间的距离为  $R$ ,根据亥姆霍兹-基尔霍夫积分公式,观察平面内任一点处的光场<sup>[21]</sup>可表示为

$$E_s(P) = \frac{A \cos \theta \exp(ikR)}{2i\lambda R |l|} \exp \left[ \frac{ik}{2R} (\xi^2 + \eta^2) \right] \times \iint_{\Sigma} \exp \left[ \frac{ik}{2R} (x_1^2 + y_1^2 - 2\xi x_1 \cos \theta - 2\eta y_1) \right] \times \exp(-i2kz_1 \cos \theta) d\xi d\eta, \quad (1)$$

式中:  $P$  为观察平面上任意一点;以观察平面中心建立直角坐标系,  $\xi$  为观察坐标系下的横坐标,  $\eta$  为观察坐标系下的纵坐标;以粗糙表面中心建立坐标系,  $z_1(x_1, y_1)$  为粗糙表面的高度分布函数,其中,  $x_1$  为物坐标系下的横坐标,  $y_1$  为物坐标系下的纵坐标;  $\lambda$  为入射激光波长;  $k$  为入射波矢量。  $z_1(x_1, y_1)$  通常通过排序插值法<sup>[22]</sup>、残差转换法<sup>[23]</sup>以及直接转换法<sup>[24]</sup>等方法模拟获得。本文采用直接转换法模拟  $z_1(x, y)$ ,该方法相较于其他方法具有过程简单、模拟精度高、生成速度快等特点,可有效节省计算时间、提高模拟精度。排序插值法基于随机过程和时间序列模型,通过 AR 型数字滤波器模拟出具有任意形状的自相关函数,并结合 Johnson 转换系统来获得具有指定参数的高斯或非高斯分布的粗糙表面。由于绝大多数工程表面的  $z_1(x, y)$  符合指数函数,因此,本文以具有指数自相关函数的三维粗糙表面为例,研究粗糙表面参数对激光散斑场的影响,粗糙表面模拟仿真流程如图 2 所示。

## 3 特征参数的选取

### 3.1 粗糙表面特征参数选择

目标表面高度分布函数通常表现为高斯分布。

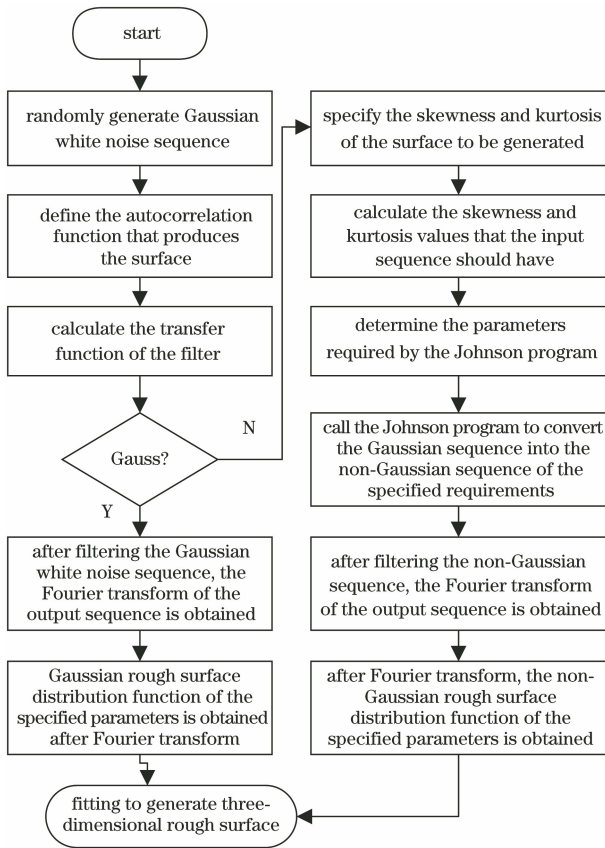


图 2 粗糙表面模拟仿真流程图

Fig. 2 Flowchart of rough surface simulation

但在实际工程应用中,抛光、研磨等工艺加工过程会使得粗糙表面的高峰总是相对于低谷而言更容易去除,所以绝大多数的工程表面往往呈现出一定的负偏度。而针对喷漆、电镀等表面处理工艺过程中存在的低波谷易被填充的情况,粗糙表面高度分布函数往往又表现出一定的正偏度。因此,将高斯及非高斯表面共同纳入仿真过程将对后续的材料识别研究更具有实际意义。

高斯及非高斯随机粗糙表面特征通常可用以下 4 个统计参数进行表征:均方根粗糙度  $R_{ms}$ , 相关长度  $\beta$ , 偏度  $S_k$ , 峰度  $K$ 。

1) 均方根粗糙度

$R_{ms}$  表示图 3 所示的所选表面区域中表面高度的标准差,  $R_{ms}$  的表达式为

$$R_{ms} = \sqrt{\frac{\iint_S z^2(x, y) dx dy}{S}}, \quad (2)$$

式中:  $z(x, y)$  为表面高度分布函数;  $S$  为所选区域面积。

2) 相关长度

$\beta$  表征所选区域内各点相关性大小的统计参

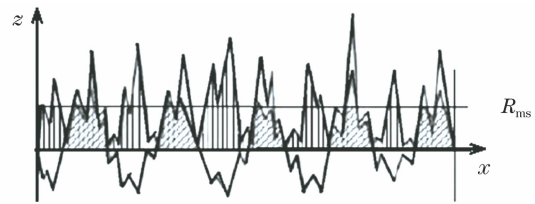


图 3 均方根粗糙度示意图

数,其具体值为粗糙表面相关函数下降到  $1/e$  所偏离的距离。

3) 偏度

$S_k$  表征粗糙表面高度分布函数分布倾向的统计参数,如图 4 所示,其表达式为

$$S_k = \frac{\iiint_S z^3(x, y) dx dy}{R_{ms}^3 S}. \quad (3)$$

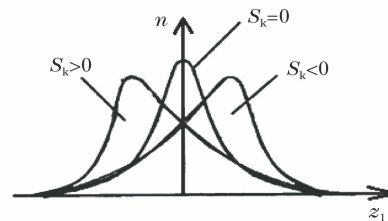


图 4 偏度示意图

Fig. 4 Schematic diagram of skewness

高斯粗糙表面的偏度为 0;对于去除了峰值的高斯随机粗糙表面而言,其偏度常为负数;而对于去除了峰谷的高斯随机粗糙表面而言,其偏度则为正数。

4) 峰度

$K$  表征表面高度分布函数的尖锐程度,其表达式为

$$K = \frac{\iint_S z^4(x, y) dx dy}{R_{ms}^4 S}. \quad (4)$$

峰度越大,目标表面越尖锐,如图 5 所示。

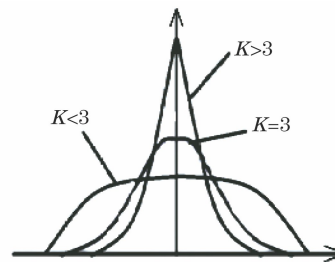


图 5 峰度示意图

Fig. 5 Schematic diagram of kurtosis

3.2 激光散斑统计特征参数选取

常见的激光散斑统计特性参数有对比度  $C$ 、自

相关函数  $\Gamma_I$  以及光强概率密度函数  $P_I(I)$  三种,三者分别从图像质量、空间特性、强度分布三个方面描述了激光散斑场的部分特征,三个参数的定义如下。

1) 对比度

对比度是表征激光散斑场能量涨落情况的特征参数,散斑对比度越大,散斑现象越严重。对比度可表示为

$$C = \frac{\sigma_I}{\bar{I}}, \quad (5)$$

式中:  $\sigma_I$  为光强的均方根值;  $I$  为光强值;  $\bar{I}$  为光强的平均值。

2) 自相关函数

自相关函数是表征激光散斑图案各点间关联程度的特征函数,自相关函数值衰减越慢,散斑图案中各点联系越紧密。自相关函数可表示为

$$\Gamma_I(\Delta m, \Delta n) = \iint I(m, n) I(m + \Delta x, n + \Delta y) dm dn, \quad (6)$$

式中:  $(m, n)$  为散斑图案中任一点的坐标;  $(\Delta m, \Delta n)$  为偏移的距离。

3) 光强概率密度函数

光强概率密度函数是表征激光散斑取值在某个确定的光强值附近的可能性的函数。某光强处的函数值越大,则实际光强值落在此处的可能性越大。光强概率密度函数可表示为

$$P_I(I) = \frac{dF_I(I)}{dI}, \quad (7)$$

式中:  $F_I(I)$  为光强分布函数。

## 4 散斑模型验证

### 4.1 实验装置及参数设置

为证明上述微粗糙表面激光散斑模型的有效性,开展相关实验对其进行验证。实验所选微粗糙表面样块为哈量集团生产的两个平磨粗糙度对比样块,其标定表面粗糙度分别为  $0.2 \mu\text{m}$  和  $0.4 \mu\text{m}$ 。同时,为获得其各自的均方根粗糙度及相关长度值,利用 E-RM-S232A 轮廓测量仪获得了各样块的轮廓特征曲线并记录各个特征参数值,如表 1 所示,其中  $R_a$  为表面粗糙度。

实验采用波长为  $660 \text{ nm}$  的 He-Ne 激光器作为激光光源,其出射的激光经衰减片的衰减后首先通过小孔光阑 1 以滤除杂散光,再依次经过由透镜 1、小孔光阑 2、透镜 2 组成的扩束准直系统照射在粗糙样块表面,经反射后的激光散斑图案由 MV-EM510M 系

表 1 微粗糙表面样块特征参数

Table 1 Characteristic parameters of micro rough surface blocks

Sample size / $\mu\text{m}$	$R_a$ / $\mu\text{m}$	$R_{ms}$ / $\mu\text{m}$	$\beta$ / mm
0.2	0.14	0.16	0.02
0.4	0.36	0.46	0.02

列 CCD 相机接收。实验时,根据实验室环境,设定激光器和 CCD 相机与目标的间距均为  $0.5 \text{ m}$ ,入射角及反射角均为  $45^\circ$ ,激光光斑大小约为  $6 \text{ mm}$ ,同时合理调节激光器出射光强大小,以使得获得的激光散斑图案能够充满整个灰度空间,实验光路与获得的激光散斑图案如图 6、7 所示。

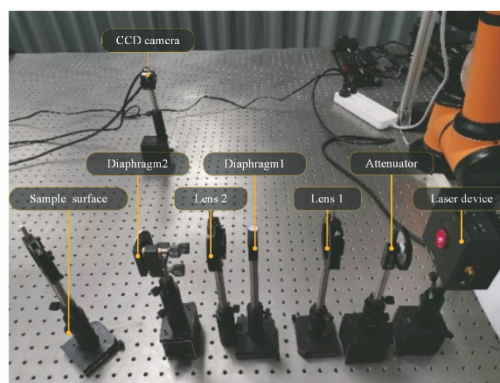


图 6 激光散斑实验装置

Fig. 6 Setup of laser speckle experiment



图 7  $0.2 \mu\text{m}$  样块激光散斑图案

Fig. 7 Laser speckle pattern of  $0.2 \mu\text{m}$  sample

### 4.2 结果对比与误差分析

根据实验与仿真结果得到的散斑各特征参数如表 2、图 8、图 9 和图 10 所示。

表 2 激光散斑对比度

Table 2 Laser speckle contrast

Sample size / $\mu\text{m}$	Simulation result	Experimental result	Error / %
0.2	0.4492	0.4926	9.66
0.4	0.8657	0.8867	2.10

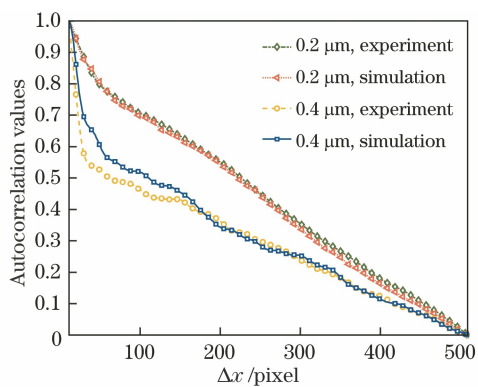


图 8 散斑自相关函数

Fig. 8 Speckle autocorrelation function

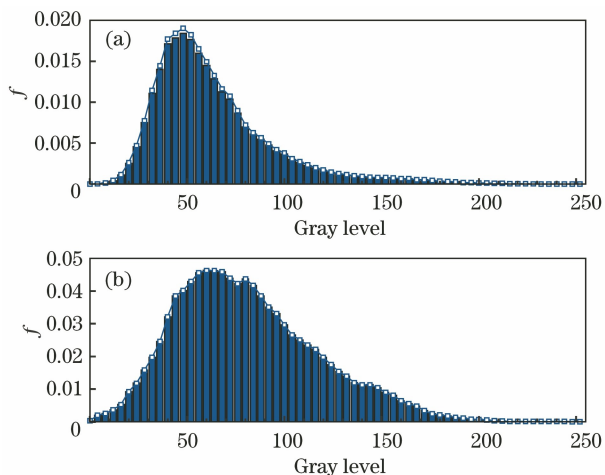


图 9 0.2 μm 样块散斑光强概率密度分布函数。

(a) 实验; (b) 仿真

Fig. 9 Probability density distribution function of speckle light intensity of 0.2 μm sample. (a) Experiment; (b) simulation

根据上述实验与仿真分析结果,可知本文提出的激光散斑模拟方法具有一定的准确性,能够较为准确地模拟出各特征参数的变化趋势,实验表明,该散斑模型有效,能够用于进一步的激光散斑特性研究。同时,分析得到其误差来源主要有如下几点:

1) 微粗糙表面模拟过程中的量化精度不足。受限于计算机性能,本文在仿真过程中仅将微粗糙表面用  $128 \times 128$  的微元点云进行表述,模拟表面量化不足,产生了一定误差。

2) 实验时,光束能量不够均匀。实验使用的激光器模式为双模激光器,光束均匀性虽有一定保证,但仍有一定误差。

3) 实验误差随表面均方根粗糙度的减小而增大。因此应根据情况尽可能选取波长较小的激光器进行测量,以减小误差。

4) 其余误差,即样块参数测量不精确、其余光

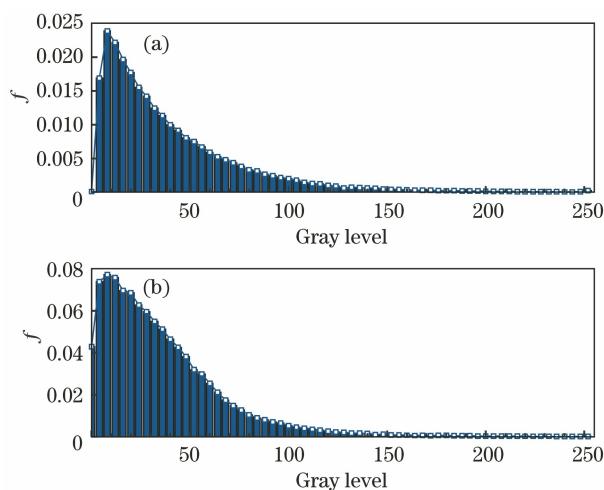


图 10 0.4 μm 样块散斑光强概率密度分布函数。

(a) 实验; (b) 仿真

Fig. 10 Probability density distribution function of speckle light intensity of 0.4 μm sample. (a) Experiment; (b) simulation

场参数设置不够准确等导致的误差。

## 5 仿真与规律分析

为进一步探究微粗糙表面参数对激光散斑场的影响,本文首先通过计算机模拟出具有指定参数的高斯或非高斯粗糙表面,再根据(1)式计算出任意表面微元在观察点上产生的散斑场并对其进行叠加,得到了菲涅耳近似下的激光散斑图案,如图 11 所示。通过改变表面均方根粗糙度、相关长度以及非高斯粗糙表面条件下的偏度和峰度值来观察粗糙表面微观结构对远场激光散斑场的影响。

结合实际应用环境需要,本文首先应用如图 2 所示的基于随机过程的表面模拟方法在 Matlab 中产生的  $12.8 \text{ mm} \times 12.8 \text{ mm}$  大小的表面,表面特征参数组合如表 3、表 4 所示的共计 15 组、75 种粗糙表面。其中针对每种表面进行三次重复模拟,以消除随机误差带来的影响。其余光场参数设置如下:观察距离  $R = 10 \text{ m}$ ,照明角度  $\theta = 45^\circ$ ,激光波长  $\lambda = 532 \text{ nm}$ ,观察平面大小为  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ ,单元长度为  $27 \text{ μm}$ ,并结合(1)式进一步模拟出观察平面上的散斑强度。

需要注意的是,由于基于随机过程的表面模拟方法在相关长度较大时生成参数的误差较大,因此应对生成的粗糙表面各参数进行误差评估,舍去偏差明显较大的随机表面,将误差控制在  $\pm 3\%$  以内,每组数据进行三次重复模拟,以尽可能消除随机误差带来的影响。图 12 为高斯表面参数对散斑对比度的影响。

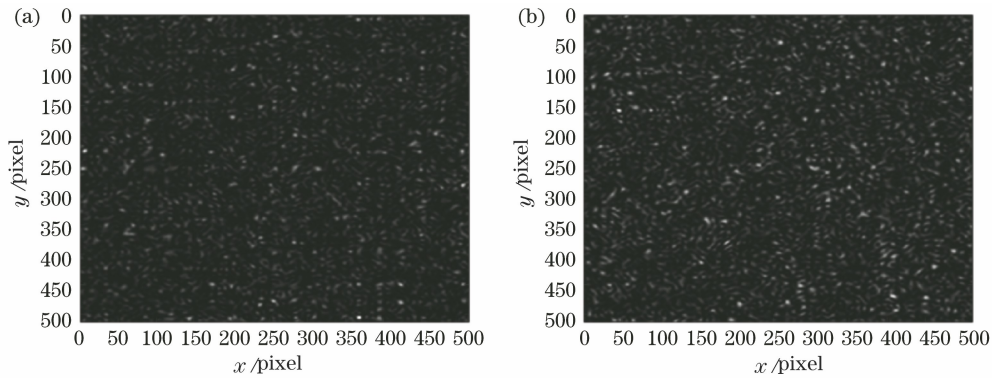


图 11 不同均方根粗糙度下的激光散斑图案。(a) 0.05  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.5  $\mu\text{m}$

Fig. 11 Laser speckle patterns under different root mean square roughness. (a) 0.05  $\mu\text{m}$ ; (b) 0.5  $\mu\text{m}$

表 3 高斯粗糙表面参数组合

Table 3 Parameter combinations of Gaussian rough surface

Group	1			2			3			4-9			10		
Root mean square roughness $R_{ms} / \mu\text{m}$	0.05			0.10			0.15			—			0.50		
Correlation length $\beta / \text{mm}$	0.3	1.0	3.0	0.3	1.0	3.0	0.3	1.0	3.0	0.3	1.0	3.0	0.3	1.0	3.0
Skewness	0			0			0			0			0		
Kurtosis	3			3			3			3			3		

表 4 非高斯粗糙表面参数组合

Table 4 Parameter combinations of non-Gaussian rough surface

Group	1			2			3			4			5		
Root mean square roughness $R_{ms} / \mu\text{m}$	0.1			0.2			0.3			0.4			0.5		
Correlation length $\beta / \text{mm}$	0.3			0.3			0.3			0.3			0.3		
Skewness	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5	0.5	0	0.5
Kurtosis	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4

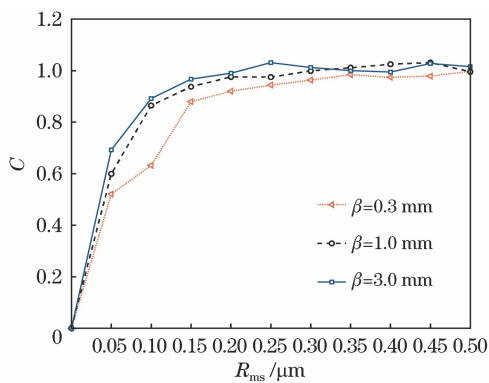


图 12 高斯表面参数对散斑对比度的影响

Fig. 12 Influences of Gaussian surface parameters on speckle contrast

### 5.1 表面参数对散斑对比度的影响

高斯表面参数对散斑对比度的影响如图 12 所示,随着目标表面均方根粗糙度的不断增加,散斑对比度也呈现不断增加的趋势并最终趋近于 1。其趋

近的快慢与目标表面相关长度的大小有关,目标表面的相关长度越大,趋近速度越快,即达到同一对比度时所需的均方根粗糙度越小。仿真过程中,部分结果的对比度略大于 1 是由于计算机保留位数不精确造成的。

非高斯表面参数对散斑对比度的影响如图 13 所示,由仿真结果可知,峰度参数对散斑对比度的影响与目标表面均方根粗糙度大小有关。当目标表面均方根粗糙度较小时,散斑对比度随峰度值的增加而降低;而当目标表面均方根粗糙度较大时,散斑对比度则随粗糙表面峰度值的增大而增大,偏度参数则与均方根粗糙度大小无关,这均使得散斑对比度呈现先增大后减小的趋势。

### 5.2 高斯表面参数对散斑自相关函数的影响

高斯表面参数对散斑自相关函数的影响如图 14、图 15 所示。随着目标表面均方根粗糙度的

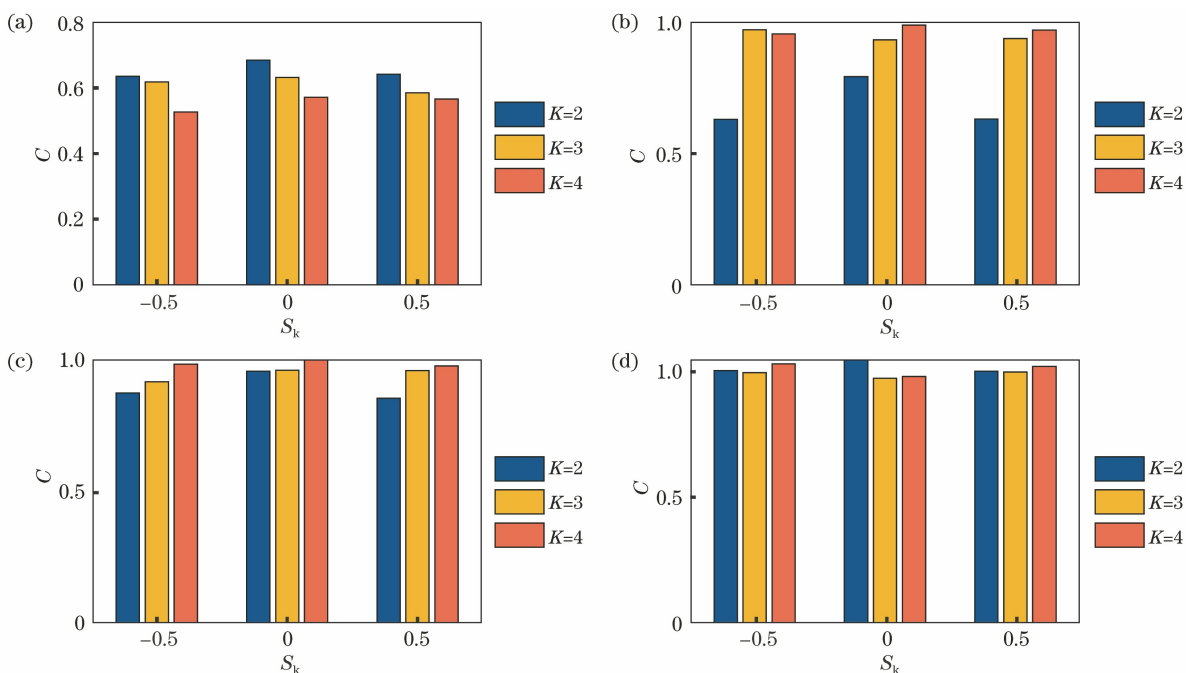


图 13 非高斯表面参数对散斑对比度的影响。(a)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ; (b)  $R_{ms}=0.2 \mu\text{m}$ ; (c)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ; (d)  $R_{ms}=0.4 \mu\text{m}$   
 Fig. 13 Influences of Non-Gaussian surface parameters on speckle contrast. (a)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ; (b)  $R_{ms}=0.2 \mu\text{m}$ ;  
 (c)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ; (d)  $R_{ms}=0.4 \mu\text{m}$

不断增加,散斑图样的自相关函数值衰减得愈加剧烈,散斑图样的相关性减弱加快,激光散斑图案显得更加混杂。这是由于随着目标表面粗糙度的不断增加,激光反射回波的镜反射方向的分量不断减小,散射分量不断增加,激光散射现象逐渐增强,相关性减弱。

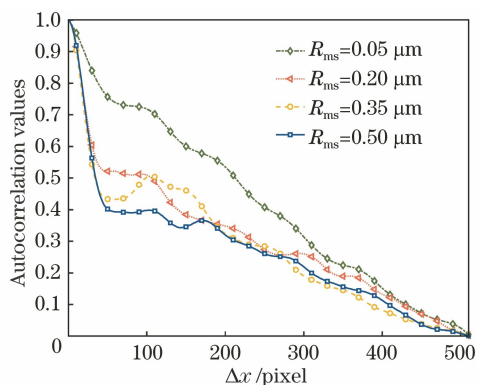


图 14 均方根粗糙度对散斑自相关函数的影响  
 Fig. 14 Influence of root mean square roughness on autocorrelation function of speckle

当目标表面均方根粗糙度相同而相关长度发生变化时,散斑自相关函数整体轮廓基本不变,但其波动性发生变化。如图 15 所示,目标表面的相关长度越大,散斑自相关函数波动周期越长,自相关函数图像显得愈加平滑。这是由于目标表面的相关长度较小时目标表面各部分重复性增强造成的(仅间隔很短

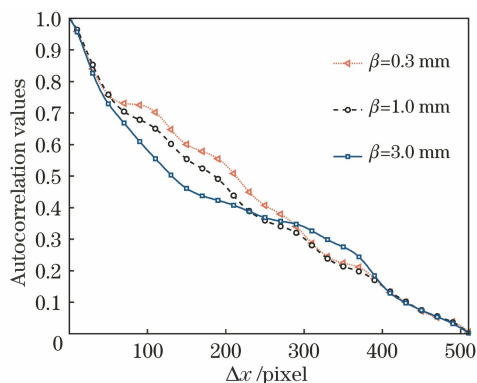


图 15 相关长度对散斑自相关函数的影响  
 Fig. 15 Influence of correlation length on speckle autocorrelation function

的距离便有下一个波峰或波谷),如图 16 所示。当激光从相似的目标表面结构反射时,散斑图样的相关性便呈现波动变化,目标表面相关长度越小,自相关函数波动越剧烈。

仿真得到的表面峰度对散斑自相关函数的影响结果如图 17 所示。与对散斑对比度的影响效果相似,表面峰度对散斑自相关函数的影响同样呈现出与均方根粗糙度大小相关联的变化趋势:当均方根粗糙度较小时,散斑图样的自相关函数值随表面峰度的增加而增加;当均方根粗糙度较大时,散斑图样的自相关函数值则随表面峰度的增加而降低。偏度参数对散斑图样的自相关函数影响较小,可忽略。

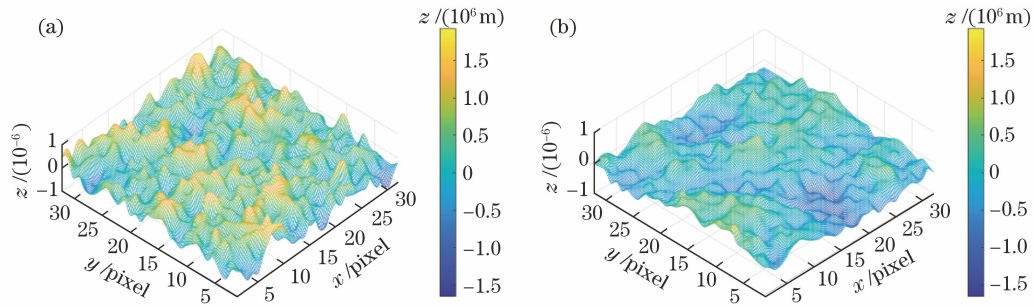


图 16 相关长度不同的两随机粗糙表面。(a) 0.3 mm; (b) 3.0 mm

Fig. 16 Two random rough surfaces with different correlation lengths. (a) 0.3 mm; (b) 3.0 mm

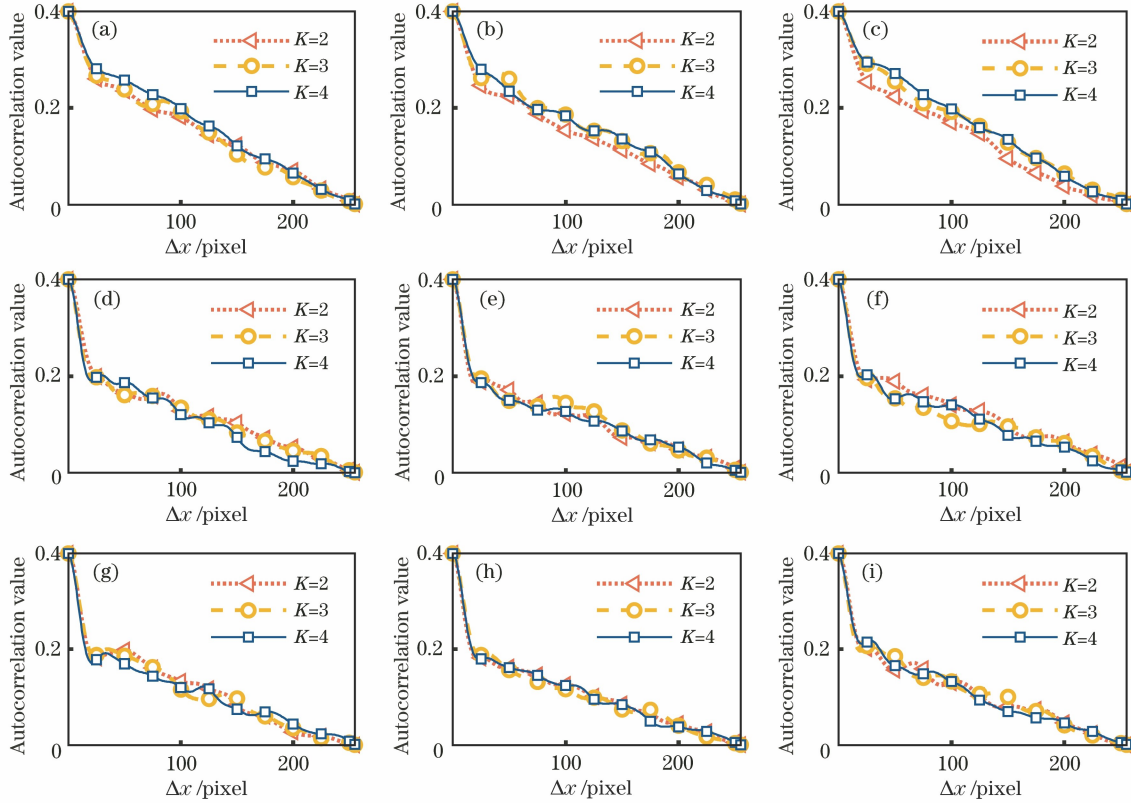


图 17 非高斯表面参数对散斑自相关函数的影响。(a)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (b)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (c)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$ ; (d)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (e)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (f)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$ ; (g)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (h)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (i)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$

Fig. 17 Influences of non-Gaussian surface parameters on autocorrelation function of speckle. (a)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (b)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (c)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$ ; (d)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (e)  $R_{ms}=0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (f)  $R_{ms}=0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$ ; (g)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=-0.5$ ; (h)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0$ ; (i)  $R_{ms}=0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k=0.5$

### 5.3 高斯表面参数对散斑光强概率密度函数的影响

高斯表面参数对光强概率密度函数的影响如图 18、图 19 所示。当目标表面粗糙度较小时，激光散斑光强分布较为集中，这是由于当目标表面粗糙度较小时，激光回波的镜反射方向的分量占主导地位，光强波动现象不明显。随着目标表面粗糙度的不断增大，激光回波散射分量增强，镜反射方向的分量减弱，激光散斑光强分布区间变大，光强概率密度

函数逐渐趋近于负指数分布函数。当目标表面粗糙度一定时，随着自相关长度的增大，中心区域光强概率密度函数的峰值降低，但两侧轮廓变化并不明显。

非高斯表面参数对散斑光强概率密度函数的影响结果如图 20 所示，与前文情况所不同的是，峰度参数对光强概率密度函数的影响结果不再与均方根粗糙度大小相关联，光强概率密度函数的峰值大小随峰度值的增加而增加，随偏度参数的增加而呈现



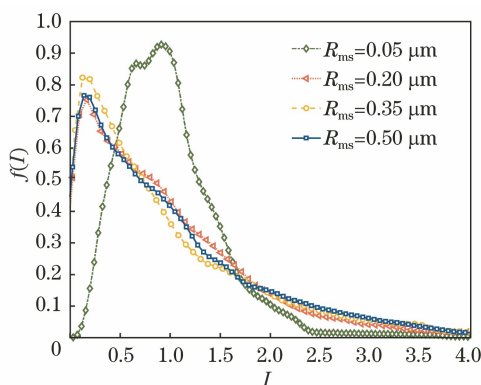


图 18 均方根粗糙度对光强概率密度函数的影响  
Fig. 18 Influence of root mean square roughness on probability distribution function of light intensity

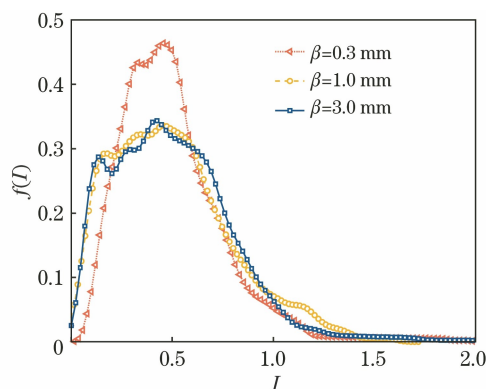


图 19 相关长度对光强概率密度函数的影响  
Fig. 19 Influence of correlation length on probability distribution function of light intensity

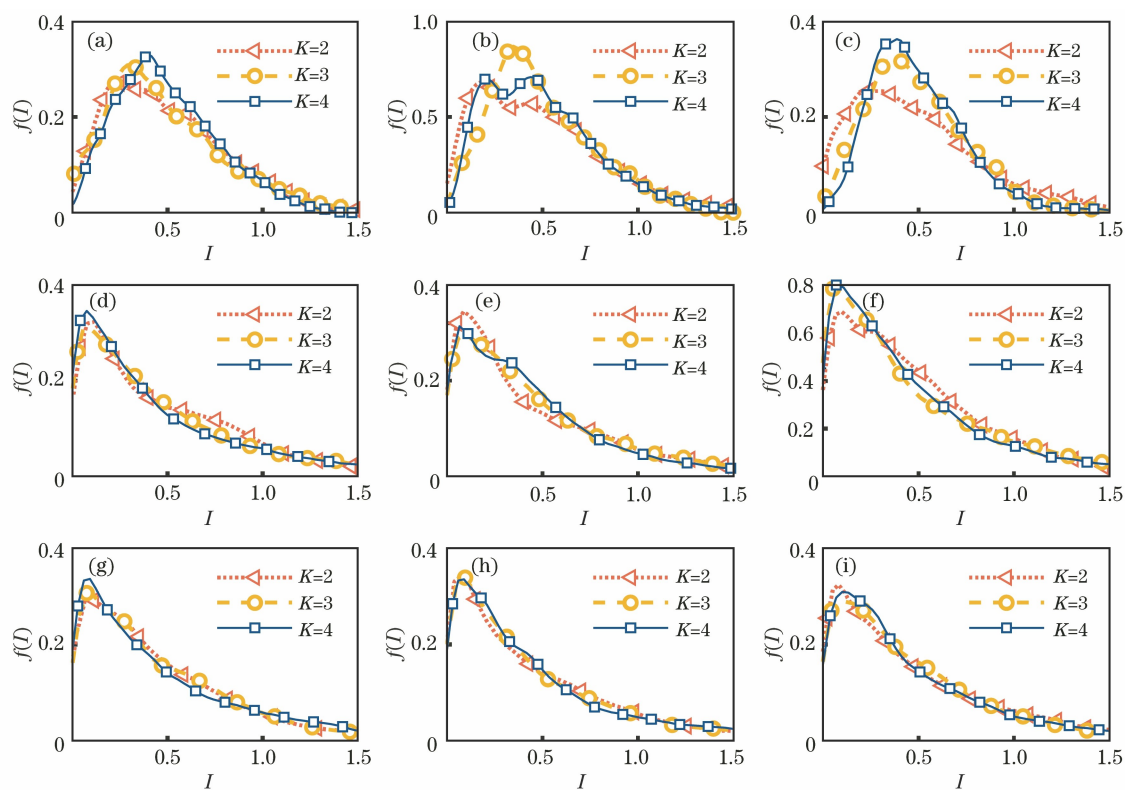


图 20 非高斯表面参数对散斑光强概率密度函数的影响。(a)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (b)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (c)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$ ; (d)  $R_{ms} = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (e)  $R_{ms} = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (f)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$ ; (g)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (h)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (i)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$   
Fig. 20 Influences of non-Gaussian surface parameters on probability distribution function of speckle intensity. (a)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (b)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (c)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$ ; (d)  $R_{ms} = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (e)  $R_{ms} = 0.3 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (f)  $R_{ms} = 0.1 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$ ; (g)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = -0.5$ ; (h)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0$ ; (i)  $R_{ms} = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $S_k = 0.5$

先减小后增大的趋势。

综上所述,对于微粗糙目标表面而言,表面均方

根粗糙度、相关长度、峰度、偏度参数均会对激光散斑统计特性产生影响,其具体影响效果如表 5 所示。

表 5 粗糙表面参数对散斑统计特性的影响

Table 5 Influences of rough surface parameters on statistical characteristics of speckles

Speckle statistics	Contrast	Autocorrelation function	Light intensity probability distribution function
Root mean square roughness	Increase	Decrease	Approaching negative exponential distribution
Correlation length	Increase	Longer fluctuation period	Central peak is reduced, and changes on both sides are not obvious
Kurtosis	When $R_{ms}$ is small	Increase	Peak increases
	When $R_{ms}$ is large	Decrease	
Skewness	Increase first and then decrease	No effect	Decrease first and then increase

## 6 结 论

高斯表面参数中的均方根粗糙度与相关长度对散斑统计特性的影响具有明显的单调性,而非高斯表面参数中的偏度与峰度的影响则较为复杂,表现出与均方根粗糙度相耦合的变化趋势,其原因是:非高斯表面参数系统性地改变了粗糙表面高度分布函数结构,从而改变了远场散斑的相位差统计性质<sup>[25-26]</sup>;与之相对应的是,高斯表面参数对高度分布函数的影响较为有限,通常表现为等比放大、缩小等变化,从而使得高斯表面参数对激光散斑场的影响表现出了足够的单调性。

此外,非高斯表面参数对激光散斑统计特性的影响相对较小,但其影响效果仍不可忽略,其依然可作为区分目标的影响因素<sup>[7]</sup>。研究了通过激光散斑将目标表面微观细节转化为易于人们接收的宏观特性用于探测的可行性,下一步将对大于激光波长的一般粗糙表面情况进行研究并着力完成材料激光散斑统计特性特征值的选择与提取,建立可作为材料指纹的激光散斑特征向量,实现基于激光散斑的目标材料识别。

## 参 考 文 献

- [1] Zhou W J, Zou S, He D K, et al. Speckle noise reduction of holograms based on spectral convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(5): 0509001.  
周文静, 邹帅, 何登科, 等. 频谱卷积神经网络实现全息图散斑降噪[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0509001.
- [2] Goodman J W. Dependence of image speckle contrast on surface roughness[J]. Optics Communications, 1975, 14(3): 324-327.
- [3] George N, Livanos A, Roth J, et al. Remote sensing of large roughened spheres[J]. Optica Acta: International Journal of Optics, 1976, 23(5): 367-387.
- [4] Mao W Y, Bao X C, Chen Y Z, et al. Theoretical analysis of the relationship between contrast of laser speckle pattern and surface roughness [J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(8): 724-729.  
毛文懿, 包学诚, 陈雅贞, 等. 激光散斑反差与表面粗糙度关系的理论分析[J]. 光学学报, 1985, 5(8): 724-729.
- [5] Zheng Y M, Wang C, Ling D H. Determination of surface roughness by correlation of laser speckle in real time[J]. Acta Optica Sinica, 1985, 5(3): 248-251.  
郑月明, 王策, 凌德洪. 用激光散斑相关方法实时测量表面粗糙度[J]. 光学学报, 1985, 5(3): 248-251.
- [6] Gu J W, Xie X P, Cao Y B, et al. A semi-dense depth map acquisition algorithm based on laser speckle[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0304004.  
古家威, 谢小鹏, 曹一波, 等. 基于激光散斑的半稠密深度图获取算法[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0304004.
- [7] Valent E, Silberberg Y. Scatterer recognition via analysis of speckle patterns[J]. Optica, 2018, 5(2): 204-207.
- [8] Feng W W, Liu M J, Wang X Q, et al. Feature extraction and recognition of laser speckle for special material surface[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(2): 186-188, 232.  
冯巍巍, 刘美娟, 王学勤, 等. 特种材料表面激光散斑特征提取和识别研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 186-188, 232.
- [9] Lei X, He L Y, Tan Y X, et al. Direct object recognition without line-of-sight using optical coherence[C]//2019 IEEE/CVF Conference on

- Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2019: 11729-11738.
- [10] Lyu M, Wang H, Li G W, et al. Learning-based lensless imaging through optically thick scattering media[J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(3): 036002.
- [11] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Learning-based imaging through scattering media[J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 13738-13743.
- [12] Takagi R, Horisaki R, Tanida J. Object recognition through a multi-mode fiber [J]. *Optical Review*, 2017, 24(2): 117-120.
- [13] Lu S, Tan Z W, Liu Y, et al. Realization of recognition for multi-mode optical fiber transmission speckle using neural network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1306001.  
卢顺, 谭中伟, 刘艳, 等. 利用神经网络实现多模光纤传输散斑的识别[J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1306001.
- [14] Goodman J W. Speckle phenomena in optics: theory and applications[M]. Cao Q Z, Chen J B, Transl. Beijing: Science Press, 2009: 21-49.  
Goodman J W. 光学中的散斑现象:理论与应用[M]. 曹其智, 陈家璧, 译. 北京: 科学出版社, 2009: 21-49.
- [15] Gao Z, Zhao X Z. On-line surface roughness measurement based on specular intensity component of speckle patterns[C]//2008 International Conference on Information and Automation, June 20-23, 2008, Changsha, China. New York: IEEE Press, 2008: 1050-1055.
- [16] Dev K, Guru Prasad A S, Aswin H, et al. Surface roughness measurement of additive manufactured samples using angular speckle correlation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10449: 104492W.
- [17] Jing W, Jiang G, Cheng B B, et al. Partially developed speckle model for millimeter-wave holographic imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0509001.  
经文, 江舸, 成彬彬, 等. 毫米波全息成像中的部分发育散斑模型[J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0509001.
- [18] Wu Y L, Wu Z S, Zhang G. Study of anisotropic speckle patterns by rough cylindrical surfaces[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(1): 35-39.  
武颖丽, 吴振森, 张耿. 微粗糙圆柱的各向异性散斑特性研究[J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 35-39.
- [19] Gong Y J, Wang M J, Gong L. Laser one-dimensional range profile and the laser two-dimensional range profile of cylinders[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9675: 96751U.
- [20] Warren W J, Moro E A, Briggs M E, et al. Simulating translation-induced laser speckle dynamics in photon Doppler velocimetry[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(21): 4661-4668.
- [21] Zhang G. Statistical properties of laser speckle from rough objects and analysis on micro-motion characteristic[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.  
张耿. 粗糙目标激光散斑统计特性及微运动特征分析[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [22] Polge R J, Holliday E M, Bhagavan B K. Generation of a pseudo-random set with desired correlation and probability distribution[J]. *Simulation*, 1973, 20(5): 153-158.
- [23] Davies N, Spedding T, Watson W. Autoregressive moving average processes with non-normal residuals [J]. *Journal of Time Series Analysis*, 1980, 1(2): 103-109.
- [24] Chen H, Hu Y Z, Wang H, et al. Computer simulation of rough surfaces[J]. *Lubrication Engineering*, 2006, 31(10): 52-55, 59.  
陈辉, 胡元中, 王慧, 等. 粗糙表面计算机模拟[J]. *润滑与密封*, 2006, 31(10): 52-55, 59.
- [25] Wang Q K. 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.  
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.
- [26] Zhang Y X, Chi Z Y. Statistical distribution of the integrated intensity of noncircular Gaussian laser speckle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1991, 18(3): 230-235.  
张逸新, 迟泽英. 非圆对称高斯分布激光散斑积分光强统计分布[J]. *中国激光*, 1991, 18(3): 230-235.