

doi:10.3788/gzxb20154406.0629001

小斜率近似在粗糙面激光散射 BRDF 计算中的应用

于海山,任宏光,霍力君,梅浩,张京国

(中国空空导弹研究院,河南 洛阳 471009)

摘 要:基于小斜率近似法建立了粗糙面激光散射双向反射分布函数的数学模型,采用该模型计算了粗糙度参量已知的合金铝样片的双向反射分布函数值,计算结果与实测结果吻合良好,验证了模型的正确性.研究了粗糙度参量和样片光学常量对双向反射分布函数的影响,结果表明,粗糙面激光散射的双向反射分布函数与表面高度起伏均方根、自相关长度及样片光学常量相关.当入射波长一定时,高度起伏均方根越大,或者自相关长度越小,粗糙面粗糙度越大,入射激光的漫反射特性越强,双向反射分布函数峰值越小且分布越分散;当粗糙度一定时,样片光学常量对双向反射分布函数影响较大,粗糙面对入射激光复折射率的虚部越大,样片双向反射分布函数的峰值越小,当粗糙度参量增大时,样片光学参量对双向反射分布函数的影响逐步减弱.

关键词:粗糙面;激光散射;小斜率近似;双向反射分布函数;光学常量

中图分类号:O432.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)06-0629001-6

Application of Small Slope Approximation in BRDF Calculation of Laser Scattering from Rough Surface

YU Hai-shan, REN Hong-guang, HUO Li-jun, MEI Hao, ZHANG Jing-guo

(China Airborne Missile Academy, Luoyang, Henan 471009, China)

Abstract: Mathematical model to calculate the Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF) of laser scattering from rough surface was established based on small slope approximation. The model was used to calculate BRDF of alloy aluminum with given roughness. Theoretical data and experimental data were found in good agreement, which verifies the correctness of the model. Further study of the effects of roughness and sample optical parameters on bidirectional reflectance distribution function was carried out. Results show that the BRDF of laser scattering is related to root mean square height, correlation length of rough surface and optical parameters of the sample. As the incident wavelength is fixed, the diffuse reflectance of incident laser is stronger when the RMS height is greater, or when the correlation length is smaller, and the value of BRDF is more dispersed with smaller peak. As the surface roughness is fixed, the optical parameters of the sample have great influence on the value of BRDF. The peak value of BRDF is smaller while the imaginary part of refractive index is larger. With the increment of roughness, the effects of optical parameters on BRDF decrease gradually.

Key words: Rough surface; Laser scattering; Small-slope approximation; BRDF; Optical parameter

OCIS Codes: 290.5880; 290.1483; 290.5825

0 引言

双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)是反映粗糙表面空间反

射特性的基本物理量,用于描述入射光经粗糙表面反射后反射光在空间各个方向的分布情况,在目标光辐射与散射特性,材料诊断,地物海洋遥感,军事目标探测、跟踪、识别及图像处理等领域都有广泛应用^[1-5].

基金项目:中国空空导弹研究院科技创新基金(No.201308S04)资助

第一作者:于海山(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为激光引信总体、飞行器设计等. Email:yuhs1987@126.com

导 师:任宏光(1963-),男,研究员,博士,主要研究方向为引战系统总体、飞行器设计等. Email:lping_w@126.com

收稿日期:2014-10-29;录用日期:2015-01-05

<http://www.photon.ac.cn>

粗糙表面的 BRDF 受激光波长、材料表面光学常量及表面粗糙度等多种因素的影响,研究方法通常包括理论解析法和工程统计法.目前对 BRDF 的研究主要集中在粗糙表面对单波长入射激光散射的测量和建模,对光谱双向反射函数的研究也主要着眼于地物地表的遥感探测,而对表面粗糙度、材料光学常量及激光波长对 BRDF 影响的建模和研究还比较少^[6-9].贾辉等^[11]实际测量了金属铝漫反射板在 200~300nm 波段的 BRDF,但缺少对光谱 BRDF 的建模.曹运华等^[12]测量了紫红色和白色涂漆板在 400~780nm 内的光谱 BRDF,并建立了 BRDF 的五参量模型,但缺少对目标粗糙度参量影响的研究.陈明等^[13]建立了分形粗糙面 BRDF 的理论解析模型,研究了粗糙面高度起伏均方根和相关长度对 BRDF 的影响,但缺少对所建理论模型的验证.本文针对这一问题,采用小斜率近似(Small-Slope Approximation, SSA)建立了粗糙面激光散射双向反射分布函数的理论解析模型,数值计算了不同粗糙度参量和不同波长激光对应的 BRDF 的理论结果,并将其与实测结果进行对比,计算结果与实测结果吻合,验证了所建模型的正确性和有效性.

1 BRDF 定义

BRDF 是由 Nicodemus 于 1970 年正式提出,最初的理论是从光辐射角度定义并发展的,现已广泛应用于激光、红外和微波段的散射和辐射问题,并进一步拓展到遥感领域. BRDF 表征了粗糙面对入射光束在上半球空间反射能量的分布情况,由粗糙面的粗糙度、介电常量、入射波长和偏振等因素决定.

如图 1, BRDF 定义为沿 (θ_r, φ_r) 方向的辐射亮度

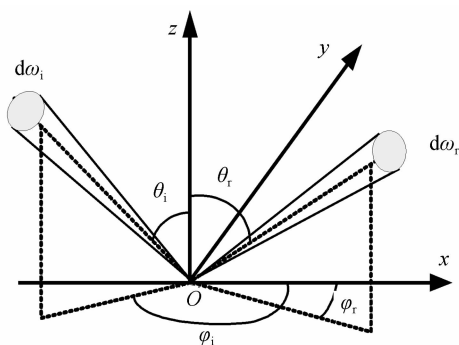


图 1 BRDF 几何关系示意图

Fig. 1 Geometric relationship diagram of BRDF

$dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 与沿 (θ_i, φ_i) 方向入射到粗糙表面的辐照度 $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ 之比,其表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中 θ_i, φ_i 分别为光源入射方向的天顶角和方位角, θ_r, φ_r 分别为散射方向的天顶角和方位角.将 BRDF 的概念用于粗糙面电磁波散射,对于均匀扩展面元,利用照

射到单位面积上的入射功率 p_i 和散射功率 $d p_r$, BRDF 的公式可以重写为^[14-15]

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{d p_r}{p_i \cos \theta_r d\Omega} \quad (2)$$

式中 $d\Omega$ 为探测器对面元所成的立体角度.

在定量描述粗糙表面的激光散射特性时,可借助激光雷达散射截面(Laser Radar Cross Section, LRCS).双站 LRCS 定义为经目标反射或散射到接收机的功率与给定方向上入射到目标的功率之比.通常 LRCS 是相对平面电磁波而言,即定义为远场条件,目标表面单位面积激光雷达散射截面定义为

$$\sigma^0(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{\langle \mathbf{E}_s \cdot \mathbf{E}_s^* \rangle}{A_i |\mathbf{E}_i|^2} \quad (3)$$

式中 A_i 为照射面积, $\mathbf{E}_i, \mathbf{E}_s$ 分别为入射电场与散射电场, $\langle \cdot \rangle$ 为粗糙面散射电场强度的统计平均.当接收口径面积为 A_r 时,接收散射功率 ΔP_s 与入射功率 P_i 之比为

$$\frac{\Delta P_s}{P_i} = \frac{A_r \langle \mathbf{E}_s \cdot \mathbf{E}_s^* \rangle}{A_i \cos \theta_i |\mathbf{E}_i|^2} \quad (4)$$

由式(2)~(4)可得单位面积激光雷达散射截面与 BRDF 的关系式为^[15]

$$\sigma^0(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = 4\pi f_r \cos \theta_i \cos \theta_r \quad (5)$$

2 粗糙面 BRDF 计算的小斜率近似模型

2.1 粗糙面光散射的解析理论

粗糙面光散射的理论研究方法包括数值解法和近似解法.数值解法是在一定的边界条件下求解麦克斯韦微分或积分方程(Integral Equation Method, IEM),计算准确度高,但推导公式复杂,实现难度较大;近似法则是根据具体问题采用不同的物理近似来获得散射场或散射截面,大大降低了问题的复杂度.在近似解法中,基尔霍夫近似(Kirchhoff Approximation, KA)和微扰法是两种常用的方法,基尔霍夫近似法要求粗糙表面的曲率半径远大于入射波波长,微扰法适用于表面粗糙度和斜率较小的情况,两种方法在应用时都存在一定的局限性.近年来被广泛使用的小斜率近似法是基于表面斜率级数展开的一种较为精确的近似方法,通过保留级数展开的项数得到各阶近似模型,在一定条件下可退化到基尔霍夫近似法和微扰法,可同时适用于大粗糙度和小粗糙度的粗糙面,是粗糙面光散射的一种统一理论^[16].

2.2 粗糙面 BRDF 计算的小斜率近似建模

如图 2,平面电磁波 Ψ_i 在 $x-z$ 平面内入射到随机粗糙面 $h(r)$ 上,其中 $r=(x, y)$,入射电磁波 Ψ_i 的表达式为

$$\psi_i = \frac{1}{\sqrt{q_0}} \exp(ik_0 \cdot r + iq_0 \cdot z) \quad (6)$$

式中 r, z 为粗糙面上点的水平坐标和垂直坐标, k_0, q_0 为入射波矢量的水平分量和垂直分量, q_0 与 k_0 满足

$$q_0^2 + k_0^2 = K^2 \quad (7)$$

式中 $K = \omega/c$ 为入射波的波数, ω 为入射波的角频率, c 为光速。

散射场可表示为上半空间未知振幅平面波的叠加^[13]

$$\psi_i = \int \frac{1}{\sqrt{q}} \exp(ik \cdot r - iq \cdot z) S(k, k_0) dk \quad (8)$$

式中 k, q 为散射波矢量的水平分量和垂直分量, 且满足式(7), $S(k, k_0)$ 为小斜率近似的散射振幅。

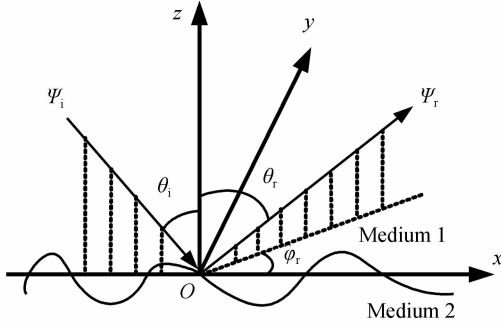


图2 粗糙面光散射几何示意图

Fig. 2 Geometric relationship diagram of rough Surface light scattering

由小斜率近似散射振幅的不变性可知, $S(k, k_0)$ 的表达式为

$$S(k, k_0) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int \exp(-i(k - k_0)r - i(q + q_0)h(r)) \cdot \Phi[k, k_0, r, h] dr \quad (9)$$

式中 Φ 是与粗糙面参量相关的泛函, 将 Φ 做泛函的泰勒级数展开可得其一阶散射振幅, 即

$$S(k, k_0) = \frac{2(qq_0)^{1/2}}{q + q_0} B_1(k, k_0) \frac{1}{(2\pi)^2} \cdot \int \exp(-i(k - k_0)r - i(q + q_0)h(r)) dr \quad (10)$$

式中 $B_1(k, k_0)$ 是与入射波和散射波极化状态相关的一阶系数矩阵^[16]. 小斜率近似的一阶双站散射系数与散射振幅的关系为

$$\sigma_{pq}(k, k_0) = \frac{\langle S(k, k_0) S^*(k, k_0) \rangle}{|\langle S(k, k_0) \rangle|^2} \quad (11)$$

式中, $S^*(k, k_0)$ 为 $S(k, k_0)$ 的共轭, $\langle \cdot \rangle$ 表示取集平均. 根据式(10)、(11)可得小斜率近似的双站散射系数为^[16-17]

$$\sigma_{pq}(k, k_0) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{2qq_0}{q + q_0} B_{pq}(k, k_0) \right|^2 \int \exp(-i(k - k_0)r) \exp(-(q + q_0)^2(\rho(0) - \rho(r)) - 1) dr \quad (12)$$

式中 $\rho(0)$ 为粗糙面的高度起伏方差, $\rho(r)$ 为粗糙面的自相关函数。

在数值计算过程中, 双站散射系数计算式(12)在直角坐标系下通常难以处理, 当入射波位于 $x-z$ 平面

内时, 入射角和散射角分别为 θ_i 和 θ_r , 入射方位角 φ_i 为 0, 散射方位角为 φ_r , 散射几何示意图如图 2, 此时 $q_0 = K \cos \theta_i, q = K \cos \theta_r, k_0 = K \sin \theta_i, k = K \sin \theta_r$. 将式(12)转化为极坐标系下的二重积分, 即

$$\sigma_{pq}(k, k_0) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{2qq_0}{q + q_0} B_{pq}(k, k_0) \right|^2 \times \iint \cos[kr \cos(\varphi - \varphi_r) - k_0 r \cos(\varphi - \varphi_i)] \exp[-(q + q_0)^2(\rho(0) - \rho(r)) - 1] r dr d\varphi \quad (13)$$

对于非极化接收, 单位面积 LRCS 与散射系数的关系为

$$\sigma_r^0 = (\sigma_{pp} + \sigma_{pq} + \sigma_{qp} + \sigma_{qq}) / 2 \quad (14)$$

结合式(5)、(13)、(14)可得粗糙面的 BRDF 值为

$$f_r = \frac{\sigma_r^0}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r} \quad (15)$$

3 数值计算与验模

基于小斜率近似的 BRDF 解析模型, 对一种粗糙度参量已知的合金铝表面的 BRDF 值进行仿真计算, 并进一步研究粗糙度参量和入射激光波长对粗糙表面 BRDF 参量的影响, 计算时假定粗糙面的高度符合均值为 0 的高斯型分布, 对高斯型粗糙面, 自相关函数 $\rho(r)$ 为^[18]

$$\rho(r) = \delta^2 \exp(-r^2/l^2) \quad (16)$$

式中 δ 为粗糙面的高度起伏均方根, l 为粗糙面的自相关长度。

将已知粗糙度合金铝粗糙样片 BRDF 的理论计算值与文献[12]中对应的实测结果进行对比. 图 3 为合金铝粗糙样片在 10° 入射角时 BRDF 的理论计算值与实测结果, 样片的粗糙度参量为 $\delta = 0.14 \mu\text{m}$, $l = 2.4 \mu\text{m}$, 入射激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 与该波长激光对应的粗糙样片的介电常量为 $-77.98 + 16.05i$. 由图 3 可知, 样片 BRDF 的理论计算值与实测结果基本吻合, 验证了基于小斜率近似的 BRDF 模型的正确性. 图 3 中 BRDF 的理论值与实测结果存在一定的偏差, 这是

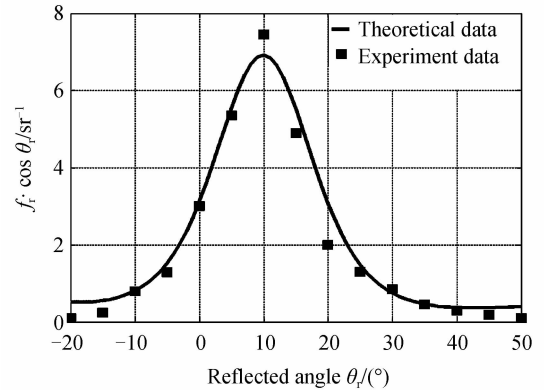


图3 合金铝粗糙样片 BRDF 的理论及实验结果
Fig. 3 Theoretical and experimental BRDF results of alloy aluminum

因为在计算时假定样片的高度服从高斯型分布,与实际样片的表面特性存在一定差异.

图4给出了粗糙度参量变化时合金铝样片 BRDF 的理论计算结果,其中图4(a)为样片高度起伏均方根参量变化时 BRDF 的计算结果,计算时入射激光波长取 $1.06 \mu\text{m}$,样片的自相关长度 l 取 $10 \mu\text{m}$;图4(b)为自相关长度变化时 BRDF 的计算结果,计算时入射激光波长取 $1.06 \mu\text{m}$,样片的高度起伏均方根取 $0.5 \mu\text{m}$.由图4可知,当入射激光波长和样片的自相关长度一定时,样片的 BRDF 值受高度起伏均方根影响显著,高度起伏均方根越小,样片越光滑,入射激光的镜面反射特性越强,BRDF 峰值越大且分布越集中;当入射激光波长和样片的高度起伏均方根一定时,自相关长度越大,样片越光滑,镜面反射特性越强,BRDF 峰值越大且分布越集中.

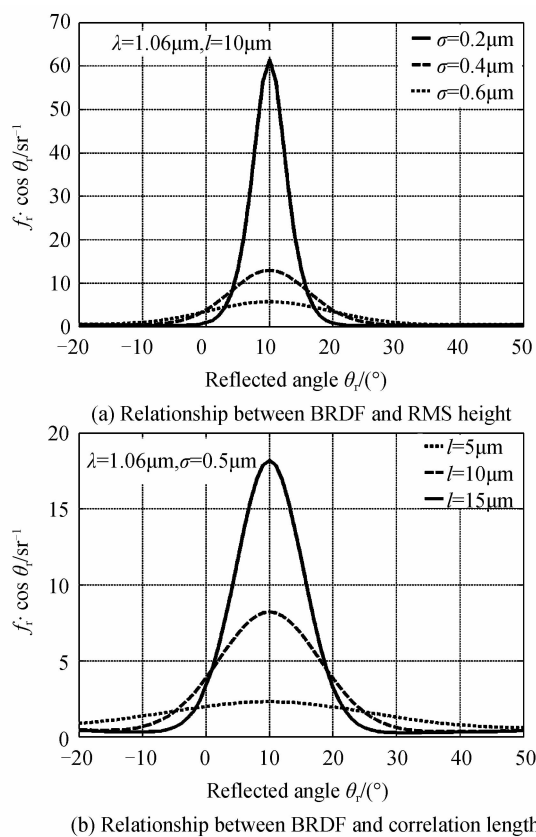


图4 不同粗糙度合金铝样片 BRDF 的理论计算值
Fig.4 Theoretical results of BRDF of alloy aluminum with different roughness

同一粗糙表面对不同波长激光的复折射率等光学常量通常具有一定差异,因此当粗糙度一定时,不同波长激光的 BRDF 值也不同.以金属铝粗糙面为例,计算了不同波长激光的 BRDF 值,当入射激光的波长改变时,金属铝粗糙面对不同波长激光的复折射率不同,表1为金属铝对三种不同波长入射光的复折射率,由介电常量与复折射率之间换算公式可得金属铝表面对不同波长激光的介电常量^[19].

表1 金属铝对不同波长入射光的复折射率
Table 1 Aluminum's refractive index to laser with different wavelength

Incident wavelength $\lambda/\mu\text{m}$	Refractive index of aluminum m
1.0	$1.26 + 10.01i$
3.0	$4.4 + 31.485i$
5.0	$8.58 + 48i$

图5和图6为金属铝粗糙面对 $1.0 \mu\text{m}$ 、 $3.0 \mu\text{m}$ 、 $5.0 \mu\text{m}$ 三种波长激光 BRDF 的计算值,其中图5为粗糙度参量为 $\delta=0.2 \mu\text{m}$, $l=10 \mu\text{m}$ 时金属铝样片对三种波长激光 BRDF 的计算结果,实线为小斜率近似(SSA)的计算结果,虚线为积分方程法(IEM)的计算结果,SSA与IEM的计算值基本吻合,进一步验证了

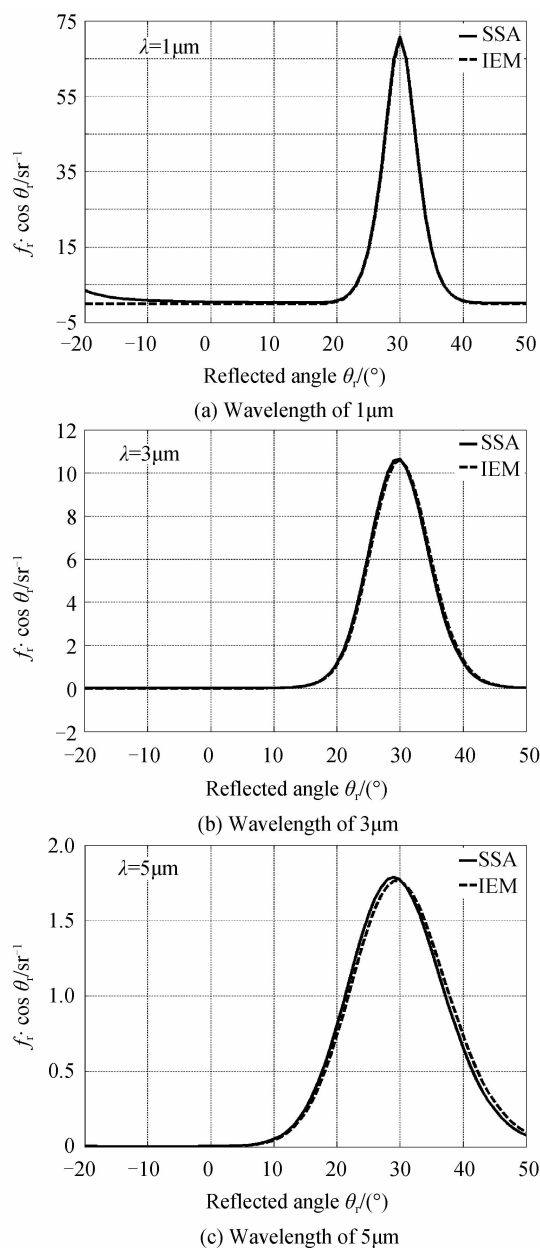


图5 SSA与IEM法的金属铝样片 BRDF 理论计算值
Fig.5 Theoretical results of aluminum's BRDF by SSA and IEM

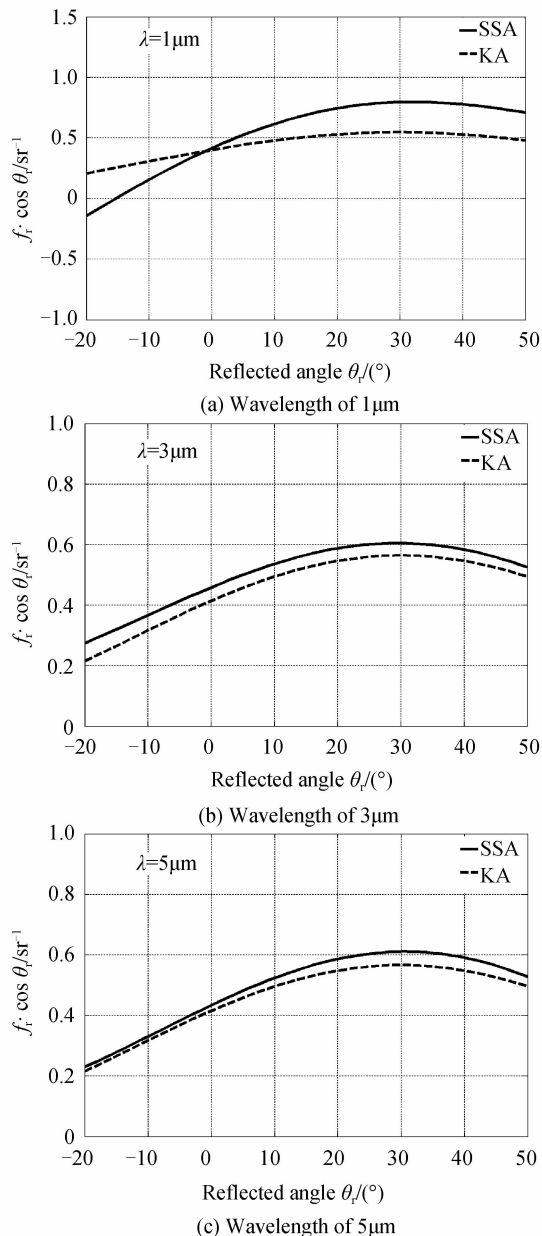


图6 SSA法与KA法金属铝样片BRDF的理论计算值
Fig.6 Theoretical results of aluminum's BRDF by SSA and KA

小斜率近似模型的正确性.由图5可知,当样片粗糙度较小时,入射光的镜面反射特性较强,不同波长激光的BRDF值受折射率等光学常量的影响较大,复折射率的虚部越大,表明对入射光的吸收越多,BRDF峰值越小.图6为粗糙度参量为 $\delta=2 \mu\text{m}$, $l=10 \mu\text{m}$ 时金属铝样片对三种波长激光BRDF的计算值.实线为小斜率近似(SSA)的计算结果,虚线为基尔霍夫近似法(KA)的计算结果.由图6可知,当样片粗糙度较大时,光学参量对BRDF的影响减弱,不同波长激光BRDF之间的差异相对小粗糙表面大大减小.

4 结论

本文采用小斜率近似法建立了粗糙表面激光散射

BRDF的数学模型,可同时适用于微粗糙度和大粗糙度表面BRDF的数值计算.采用该模型计算了合金铝粗糙面的BRDF值,将理论计算值与实测结果进行对比,两者吻合良好,验证了模型的正确性.同时计算了粗糙度参量改变时合金铝表面和入射激光波长改变时金属铝表面的BRDF值.研究表明,激光散射的BRDF值与粗糙表面高度起伏均方根、自相关长度及样片光学参量相关,当入射波长一定时,高度起伏均方根越大,或者自相关长度越小,粗糙面的粗糙度越大,入射激光的漫反射特性越强,BRDF峰值越小且分布越分散.当表面粗糙度一定时,样片光学参量对BRDF值具有较大影响,粗糙面对入射激光复折射率的虚部越大,样片BRDF的峰值越小,当粗糙度参量增大时,样片光学参量对BRDF的影响逐步减弱.

参考文献

- [1] LI Tie, WANG Hang-yu, WANG Hong-jun. Application of genetic simulated annealing algorithm in BRDF statistical modeling[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, **25**(4): 489-492.
李铁,王航宇,王宏军.目标表面BRDF统计建模中的遗传模拟退火算法[J].量子电子学报,2008,25(4):489-492.
- [2] ZHANG Wei, WANG Hong-yuan, WANG Zhi-le, et al. Modeling method for visible scattering properties of space target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **31**(4): 518-522.
张伟,汪洪源,王治乐,等.空间目标可见光散射特性建模方法研究[J].光子学报,2008,**37**(12):2462-2467.
- [3] PAN Yong-qiang, WU Zhen-sen. Bidirectional reflectance distribution function and surface roughness characterization of transparent substrates [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **31**(4): 518-522.
潘永强,吴振森.透明基底表面双向反射分布函数及粗糙度特性研究[J].光子学报,2008,**37**(6):1246-1249.
- [4] SUN Li-min, ZHAO Jian-lin, REN Ju, et al. 3-D measurements of bidirectional reflectance distribution functions of target surfaces with different coats [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **31**(4): 518-522.
孙礼民,赵建林,任驹,等.具有不同涂层的样品表面双向反射分布函数的三维测量[J].光子学报,2008,**37**(12):2529-2533.
- [5] LI Tie, WU Zhen-sen, ZENG Zhen-chao. 3-D BRDF statistic modeling and optimizing of surfaces of various materials and roughness[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2007, **31**(4): 518-522.
李铁,吴振森,曾震超.多类目标样片BRDF三维统计建模及优化[J].南京理工大学学报,2007,**31**(4):518-522.
- [6] WANG An-xiang, ZHANG Xiao-jun, ZHANG Han-lu, et al. Laser rader cross-section obtained by the measurement of bidirectional reflectance distribution function [J]. *Infrared Technolog*, 2008, **30**(2): 63-67.
王安祥,张晓军,张涵璐,等.利用BRDF实验测量获取目标表面单位面积激光雷达截面[J].红外技术,2008,**30**(2):63-67.
- [7] CLAUSTRES L, YANNICK B, MATHIAS P. Spectral BRDF modeling using wavelets[C]. SPIE, 2002, **4738**: 33-43.
- [8] WEI Qing-nong, LIU Jian-guo, JIANG Rong-xi. The absolute measuring method of bidirectional reflectance distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1425-1430.

- 魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. 光学学报, 1996, **16**(10): 1425-1430.
- [9] WU Zhen-sen, XIE Dong-hui, XIE Pin-hua, *et al.* Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 897-901.
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模及其算法[J]. 光学学报, 2002, **22**(8): 897-901.
- [10] ZHANG Bai-shun, LIU Wen-qing, WEI Qing-nong, *et al.* Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(4): 533-536.
张百顺, 刘文清, 魏庆农, 等. 典型目标的 BRDF 实验室测量与模型验证[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(4): 533-536.
- [11] JIA Hui, LI Fu-tian. Bidirectional reflectance distribution function of aluminium diffuser at UV spectral band[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 230-234.
贾辉, 李福田. 铝漫反射板 200~300nm 相对双向反射分布函数的实验研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(2): 230-234.
- [12] CAO Yun-hua, WU Zhen-sen, ZHANG Han-lu, *et al.* Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792-798.
曹运华, 吴振森, 张涵璐, 等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 792-798.
- [13] CHEN Ming, TIAN Yan, WU Ying-chun. BRDF evaluation from a two-dimensional fractal rough surface [C]. *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2009: 55-58.
- [14] YANG Yu-Qi. Study on electromagnetic scattering from rough surface based on BRDF[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
杨钰琦. 粗糙面散射的 BRDF 方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [15] CHEN Hui. Research on the property of near-field light scattering from object and coating [D]. Xi'an: Xidian University, 2001.
陈辉. 目标与涂层近场光散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001.
- [16] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [17] YANG C, GUO L X. Application of the small slope approximation for EM scattering from the rough sea surface [C]. *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, 2008: 999-1002.
- [18] CHEVALIER B, BERGINC G. Small slope approximation method: Scattering of a vector wave from 2-D dielectric and metallic surfaces with Gaussian and non-Gaussian statistics [C]. *SPIE*, 2011, **4100**: 22-32.
- [19] DAVID R. Handbook of chemistry and physics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2002.