

一种表面激光散射特性数据三维测量方法

黄成功 吴军辉 赵琳锋 陈洁 李华 张文攀 刘艳芳

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

摘要 激光双向反射分布函数(BRDF)数据测量是一种获得目标表面信息的重要手段。利用几何光学理论建立了目标表面 BRDF 模型,采用激光器、激光能量密度测量设备、转台、漫反射板等光电实验室常用测量设备,在相同的几何和物理条件下,分别测量样品和散射特性已知的漫反射板对激光能量的散射特性数据,推算出样品的 BRDF 数值;保持测量平面静止,通过翻转被照射表面获取样品表面的三维 BRDF 数据,推算了翻转过程中测量点的角度换算关系;利用测量结果,进行了目标表面 BRDF 模型的参数优化,建立了样品表面 BRDF 模型;实验环境容易构建,操作简便,为研究目标表面激光散射特性提供了一种新的研究思路。

关键词 测量;三维测量;激光双向反射分布函数;激光散射

中图分类号 O436.2;TP73 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.0708004

A 3D Measuring Technique of Laser Scattering Characteristic Data for Surface

Huang Chenggong Wu Junhui Zhao Linfeng Chen Jie Li Hua
Zhang Wenpan Liu Yanfang

(Unit 63892 of People's Liberation Army, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract Bidirectional reflectance distribution function (BRDF) data measurement is an important instrument to acquire information of target surface. The geometrical optics is used to establish theoretic model of laser BRDF. A model is designed to measure the scattering data with lasers, measuring equipments for laser energy density, etc. Under the same measurement condition, the sample and a diffuse reflection plate, whose scattering characteristic is known, are measured together to acquire scattering data of laser pulse. The 3D BRDF data is measured by turning the sample surface and keeping the measurement surface immobile. The 3D angles of measuring positions are computed. The model parameters are optimized using measurement data. The BRDF model of the sample is established. The measuring condition is easily constructed and it has a simple and convenient process. A new way is provided to research sample surface BRDF characteristic.

Key words measurement; three-dimensional measuring; bidirectional reflectance distribution function; laser scattering

OCIS codes 240.3695; 290.1483; 290.5820

1 引 言

目标表面激光散射特性直接影响到对目标的捕获与跟踪,因此其激光散射模型理论研究在激光侦察告警、激光制导武器攻击过程、空间目标探测及跟踪等领域具有重要应用价值^[1,2]。激光双向反射分布函数(BRDF)数据测量作为一种获得目标表面信息的手段,对于目标表面 BRDF 模型校核、验证与

确认具有重要意义。在文献[2~5]中,测量目标表面三维的 BRDF 数据需要专用的设备才能进行。本文利用激光器、激光能量密度测量设备、转台、漫反射板等设备,保持激光器、激光能量密度测量设备在水平面内,通过改变样品表面与水平面的夹角实现了样品表面 BRDF 数据的三维测量,并对建立的目标表面 BRDF 模型参数进行优化,建立了样品表

收稿日期: 2011-12-27; **收到修改稿日期:** 2012-02-15

基金项目: 军队重大专项基金资助课题。

作者简介: 黄成功(1984—),男,硕士,工程师,主要从事光电对抗系统及其数学仿真等方面的研究。

E-mail: huang162001@126.com

面的 BRDF 模型。

2 样品表面激光 BRDF 理论模型

在可见光和近红外区中,样品表面微观粗糙度的尺寸比辐射波长大很多时,可以利用几何光学理论来建立目标表面 BRDF 模型。在这种情况下,粗糙表面的光散射通常可以归结为微观表面镜反射的总和,而近表面的辐射散射则可以用加漫反射分量的方法来考虑,此漫反射分量满足朗伯定律。本文称这种方法推导出的模型为几何光学统计模型。这种描述目标表面 BRDF 的统计模型是根据粗糙表面的不同分类,结合各参数因子的物理含义概括、提炼而出的,使用起来简洁、有效,被广泛用于遥感和军事领域^[2,3]。

几何光学统计模型假设表面由小面元组成,小面元的法线方向呈高斯分布,并且小面元反射遵循菲涅耳关系。模型暗含条件为:均方高度远远大于波长。文献[2]给出 BRDF 模型为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = gR_{(2\beta, n)} \times \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_r} \exp(-c^2 \alpha_0^2) + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (1)$$

式中,第一项代表粗糙表面的相干(俗称镜反射)分量,第二项表示朗伯分量(漫反射分量)。 θ_i 表示入射天顶角, θ_r 表示能量探头对应的天顶角, φ_i 表示入射方位角, φ_r 表示能量探头对应的方位角, α_0 表示微观小面元法线与样品表面法线夹角, $R_{(2\beta, n)}$ 为菲涅耳反射函数, $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 表示遮蔽函数, $k_d/\cos \theta_i$ 包含了多重散射、体散射以及材料光学特性对漫反射分量的贡献。对于各向同性的表面,可以设 $\varphi_i = 0, \varphi_r = \varphi_r - \varphi_i$, 则双向反射分布函数可以降为关于 $\theta_i, \theta_r, \varphi_r$ 的函数 $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 。

将粗糙表面的高度起伏分布和斜率分布推广到非高斯分布的一般情况,则第一项中菲涅耳反射系数和指数部分改为

$$f_n(\alpha_0)R_0(\alpha_0) = \frac{k_r^2 \cos \alpha_0}{1 + (k_r^2 - 1) \cos^2 \alpha_0} \times \exp[b(1 - \cos \gamma)^a], \quad (2)$$

遮蔽函数 $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 由各相邻面元反射的遮蔽和掩饰概率决定。对于目标表面比较光滑的情况,认为基本不存在遮挡问题,遮蔽函数 $G(\theta_i, \theta_r, \varphi_r)$ 可以取为 1, (1)式建立的 BRDF 模型可以简化为^[2]

$$f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_r) = k_b \frac{k_r^2 \cos \alpha_0}{1 + (k_r^2 - 1) \cos \alpha_0} \times \exp[b(1 - \cos \gamma)^a] \frac{1}{\cos \theta_i \cos \theta_r} + \frac{k_d}{\cos \theta_i}, \quad (3)$$

式中 k_b, k_d, k_r, a, b 为待定参数,需要测量样品表面 BRDF 数据进行优化,其中 k_b, k_d 分别与镜反射和漫反射系数有关, k_r 决定了样品表面散射的镜向峰值, a, b 为与介质的折射率有关的待定参量。

3 BRDF 数据测量

3.1 测量设备及布局

测量设备主要包括激光器、激光能量密度测量设备、转台、靶板、待测样品等。测量中,使用聚四氟乙烯白板作为已知反射特性的靶板,用它与被测目标表面反射特性进行对比测量。为了方便测量,将靶板、待测样品放在水平转台上,并垂直于水平面,在入射平面内选取有代表性的角度摆放激光能量密度探头,并将激光器、各激光能量探头摆放在相同高度的水平面内,各激光能量探头测试点、激光器照射点与转台距离相等。激光器、激光能量探头摆放位置如图 1 所示。O 点为激光光束照射点,即靶板、待测样品的中心位置。图中探头位置和激光器位置相对测量平面法线的角度见表 1。待测样品包括涂层钢板和普通钢板,如图 2 所示。

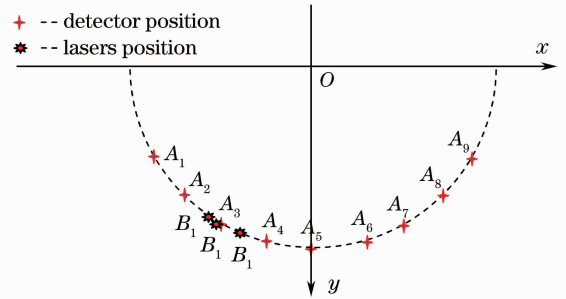


图 1 BRDF 数据测量位置示意图

Fig. 1 Position distribution of BRDF data measurement

表 1 探头摆放位置及测试角度表

Table 1 Detector positions and measurement angles

Detector/Laser number	Position name	Measurement angle / (°)
Detector 1	A ₁	-60
Detector 2	A ₂	-45
Detector 3	A ₃	-30
Detector 4	A ₄	-15
Detector 5	A ₅	0
Detector 6	A ₆	15
Detector 7	A ₇	30
Detector 8	A ₈	45
Detector 9	A ₉	60
Laser position 1	B ₁	-32
Laser position 2	B ₂	-30.56
Laser position 3	B ₃	-25.52

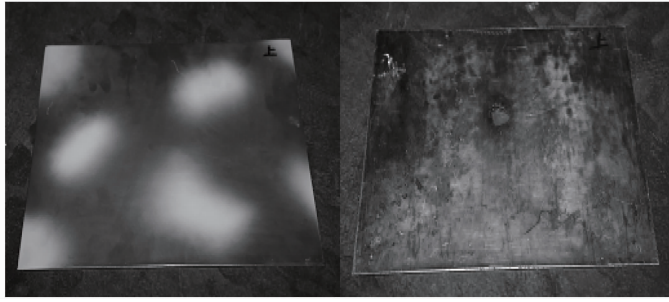


图2 BRDF数据实测的样品材料

Fig. 2 Sample for BRDF data measurement

3.2 测量方法

采用间接测量技术测量样品 BRDF 数据,使用已知反射特性的聚四氟乙烯白板为靶板,在相同的几何和物理条件下,分别测量靶板和样品对照射激光脉冲后的散射激光分布,由于靶板的 BRDF 是已知的,通过比较待测样品散射的激光能量密度与靶板散射的激光能量密度,推算出样品的 BRDF 数值,测量数据比直接测量结果更加直接、准确^[3,6,7]。测量中,应保持激光器出光口、照射点及激光能量探头在同一水平面内。

首先,按照图 1 将激光器置于位置 B_1 ,分别将靶板及待测样品先后置于转台的 O 点位置上,靶板及待测样品表面法线与 y 轴重合,靶板及待测样品中心与照射点重合。激光器发射激光脉冲,激光能量密度测量设备记录各个角度的激光能量密度。

然后,将转台绕 x 轴向上翻转角度 α ,改变激光器照射位置,保持固定的入射天顶角。激光器发射激光脉冲,激光能量密度测量设备记录各个角度的激光能量密度。表 1 中的激光器照射位置 B_2, B_3 ,对应的翻转角度 α 分别为 10° 和 20° 。

最后,将转台绕 x 轴向上翻转角度 32° ,改变激光器照射位置到点 A_5 。激光器发射激光脉冲,激光能量密度测量设备记录各个角度的激光能量密度。

3.3 测量点三维角度换算

在三维 BRDF 数据测量过程中,根据转台翻转角度、激光器及测量点坐标,可以推算出测量点的三维角度。如图 3 所示,设转台翻转角度 $\angle O'OP = \alpha$,激光器点 A 坐标为 (x_0, y_0) ,激光能量密度测量点 B 坐标为 (x, y) ,点 A 和点 B 到站台的距离为 r ,即 $AO = BO = r$ 。平面 L_1 为水平面,也是激光器和测量点摆放平面;平面 L_2 垂直于平面 L_1 ,为翻转前待测样品表面;平面 L_3 为翻转角度 α 后的待测样品表面。 OP 为翻转前样品表面法线, OO' 为翻转角度 α 后样品表面法线。设翻转前激光器的入射天顶角 $\angle AOP =$

θ_{i0} ,探头对应的出射天顶角 $\angle BOP = \theta_{r0}$ 。

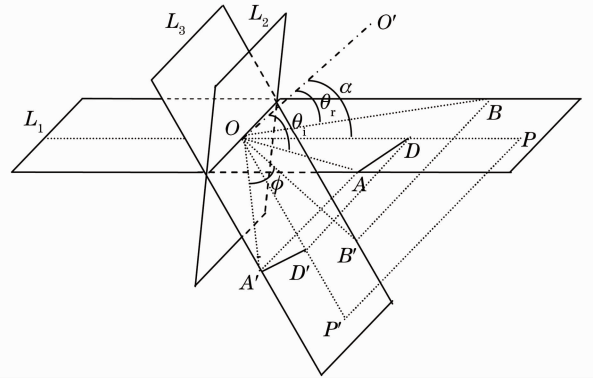


图3 靶板和样品翻转示意图

Fig. 3 Overturn process of the target plane and the sample

图 3 中,点 A', P', B' 分别为点 A, P, B 在翻转后的样品表面所在平面 L_3 上的投影, $\angle O'OA$ 为翻转后激光信号的入射天顶角 θ_i , $\angle O'OB$ 为翻转后能量探头 B 对应的天顶角 θ_r , $\angle A'OB'$ 为能量探头 B 对应的方位角 ϕ 。

作辅助线 AD 垂直于 OP 于点 D , $A'D'$ 垂直于 OP' 于点 D' ,按图中虚线连接其他辅助线。

设 A 点坐标为 (x_0, y_0) , $OA = r$, $\angle O'OD = \alpha$, $\angle AOP = \theta_{i0}$, $\angle O'OA = \theta_i$,所以 $x_0 = AD = A'D'$, $y_0 = OD = r \cos \theta_{i0}$ 。因为 $\cos \theta_i = \cos \theta_{i0} \cos \alpha$,可得:

$$r \cos \theta_i = y_0 \cos \alpha, \quad (4)$$

所以

$$y_0 = \frac{r \cos \theta_i}{\cos \alpha}, \quad (5)$$

又因为: $x_0^2 + y_0^2 = r^2$,入射天顶角 θ_i 为负角度入射,所以

$$x_0 = -\frac{r}{\cos \alpha} \sqrt{\cos^2 \alpha - \cos^2 \theta_i}. \quad (6)$$

实验中,取激光器照射及激光能量密度探头测量距离 $r = 7$ m,保持入射天顶角 $\theta_i = 32^\circ$ 。当翻转角 α 已知时,通过(5)式及(6)式,可以求出对应的 A 点

坐标。当分别取 $\alpha=10^\circ$ 及 $\alpha=20^\circ$ 时,对应的 A 点坐标分别为 $(-3.559, 6.028)$ 及 $(-3.016, 6.317)$,求得在探测平面 L_1 内的激光器照射角 $\angle POA$ 分别为 -30.56° 及 25.52° ,对应图 1、表 1 中的 B_2 点及 B_3 点。令 $x_0=0, y_0=r$,则有 $\theta_i=\alpha$,此时即入射天顶角为 32° 条件下,转台翻转的最大角度为 32° 。

已知激光能量密度探头的坐标 (x, y) 以及转台的翻转角 α ,则可以根据公式

$$\phi = \arccos \left\{ \frac{y_0^2 \sin^2 \alpha + x_0^2 + y^2 \sin^2 \alpha + x^2 - [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \sin^2 \alpha]}{2 \sqrt{(y_0^2 \sin^2 \alpha + x_0^2)(y^2 \sin^2 \alpha + x^2)}} \right\} = \arccos \left[\frac{xx_0 + yy_0 \sin^2 \alpha}{\sqrt{(r^2 - y^2 \cos^2 \alpha)(r^2 - y_0^2 \cos^2 \alpha)}} \right]. \quad (8)$$

通过上述计算,保持激光器和激光能量密度测量设备在水平面内,通过翻转靶板和样品表面,实现了对待测样品的 BRDF 数据的三维测量。这种方法不需要移动激光能量密度测量设备,只通过移动激光器位置以及控制转台翻转角度就可以获取三维空间内不同出射天顶角和方位角的 BRDF 数据,实验环境容易构建,操作简便。该方法的缺点是转台翻转角度不能大于入射天顶角,而每一组数据测量

$\theta_r = \arccos \frac{y \cos \alpha}{r} \quad (7)$
 求出翻转过程中激光能量密度探头位置对应的出射天顶角 $\angle O'OB$ 。

若已知激光器坐标 (x_0, y_0) 和激光能量密度测量设备坐标 (x, y) ,图 3 中激光能量密度测量设备坐标对应的出射方位角为

都是在设定入射天顶角的情况下实施的。因此,测量过程中样品表面的翻转角度受到限制,所以测量点的 BRDF 实测数据对应的出射天顶角和出射方位角受到一定限制。

根据(5)~(8)式,可以计算出测量中所设置的测量点对应的出射天顶角和出射方位角,计算结果及测量结果如表 2 所示。

表 2 测量点的三维角度计算结果及测量结果

Table 2 3D angle compute results and measurement results of detector positions

Position name	Measurement object	Before turning	Turn 10°	Turn 20°	Turn 32°
A_1	Azimuth and pitching angle	$(0^\circ, 60^\circ)$	$(-10.67^\circ, 60.50^\circ)$	$(-24.45^\circ, 61.98^\circ)$	$(-72.99^\circ, 64.91^\circ)$
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm^2)	24.27	23.95	22.97	21.24
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm^2)	2.98	3.11	4.87	3.30
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm^2)	1.59	1.68	1.59	2.12
A_2	Azimuth and pitching angle	$(0^\circ, 45^\circ)$	$(-6.48^\circ, 45.86^\circ)$	$(-16.72^\circ, 48.36^\circ)$	$(-62.08^\circ, 53.15^\circ)$
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm^2)	35.24	34.47	32.36	29.31
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm^2)	4.18	4.30	6.33	4.25
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm^2)	2.57	2.58	2.35	2.91
A_3	Azimuth and pitching angle	$(0^\circ, 30^\circ)$	$(0.75^\circ, 31.48^\circ)$	$(-5.03^\circ, 35.53^\circ)$	$(-47.46^\circ, 42.74^\circ)$
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm^2)	46.30	—	40.20	34.71
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm^2)	6.92	—	8.30	5.39
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm^2)	6.00	—	4.18	4.55

Position name	Measurement object	Before turning	Turn 10°	Turn 20°	Turn 32°
A ₄	Azimuth and pitching angle	(0°, 15°)	(16.66°, 17.98°)	(16.37°, 24.82°)	(-26.85°, 35.01°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	50.36	48.87	46.35	40.41
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	7.49	7.30	7.67	6.35
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	7.93	6.94	6.16	7.46
A ₅	Azimuth and pitching angle	(0°, 0°)	(73.61°, 10.00°)	(54.38°, 20.00°)	(0°, 32°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	51.76	50.03	48.19	—
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	8.90	7.81	7.99	—
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	12.67	9.75	8.29	—
A ₆	Azimuth and pitching angle	(180°, 15°)	(130.64°, 17.98°)	(92.46°, 24.82°)	(26.85°, 35.01°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	48.41	45.43	42.92	39.18
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	12.04	7.68	7.86	6.53
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	41.09	23.41	12.72	6.47
A ₇	Azimuth and pitching angle	(180°, 30°)	(146.87°, 31.48°)	(113.73°, 35.53°)	(47.46°, 42.74°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	44.98	43.82	40.22	35.29
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	110.96	17.99	7.08	5.53
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	206.36	48.50	12.18	4.11
A ₈	Azimuth and pitching angle	(180°, 45°)	(153.77°, 45.86°)	(125.50°, 48.36°)	(62.08°, 53.15°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	37.69	36.65	32.39	28.81
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	12.48	9.10	7.31	4.38
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	63.46	29.01	9.36	2.82
A ₉	Azimuth and pitching angle	(180°, 60°)	(157.88°, 60.50°)	(133.21°, 61.98°)	(72.99°, 64.91°)
	Scattering of diffuse reflection plate / (pJ/cm ²)	26.71	26.12	23.82	20.86
	Scattering of coloring armor plate / (pJ/cm ²)	6.37	5.35	5.21	3.11
	Scattering of common armor plate / (pJ/cm ²)	16.15	12.56	5.80	1.97

4 参数优化及建模

实验中的靶板为中国科学院安徽光学精密机械研究所生产的聚四氟乙烯白板,具有高朗伯特特性,半球反射率为 99.7%,相应光谱范围 350~1800 nm,激光损伤阈值高于 1 W/cm²,实验中作用在白板上

的激光平均功率不高于 2×10^{-4} W/cm²,所以可以不用考虑激光与靶板表面相互作用对其表面反射特性的影响。靶板在各个方向的 BRDF 数值相等,其表达式为

$$f_{r0} = \rho/\pi, \quad (9)$$

式中 ρ 为半球反射率。假设在某一测量点上,靶板反射的激光能量密度为 E_0 ,样品的 BRDF 反射的激光能量密度为 E_1 ,则样品在测量点对应角度的 BRDF 数值 f_{r1} 为^[3,7]

$$f_{r1} = f_{r0} E_1 / E_0. \quad (10)$$

根据表 2 的测量数据及(9)式、(10)式,可以得到迷彩钢板、普通钢板在测量点对应典型角度上的 BRDF 实测数据。通过这些实测数据对(3)式建立

表 3 样品 BRDF 模型参数优化结果

Table 3 Optimization results of BRDF model parameters for sample

	k_b	k_d	k_r	a	b
Coloring armor plate	0.49314344	0.12759873	-0.015013367	-0.073700484	1.4086633
Common armor plate	3.6898963	-0.042134543	-0.051867184	1.8066383	1.9663618

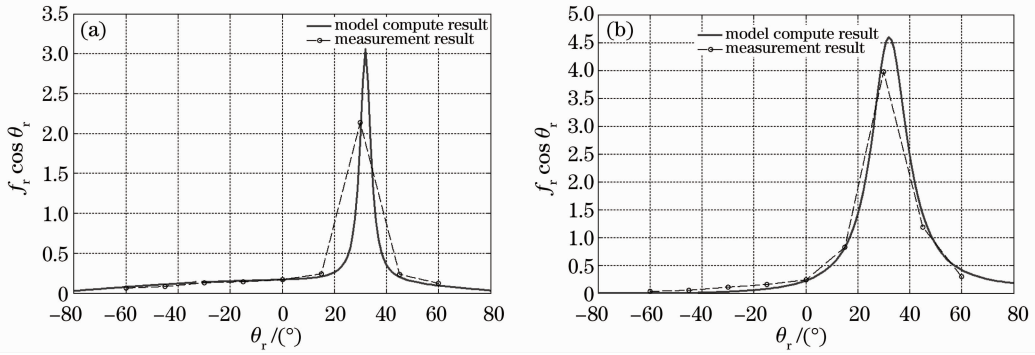


图 4 迷彩钢板(a)和普通钢板(b)的 BRDF 模型曲线及实测数值

Fig. 4 BRDF model compute results and measurement results for (a) coloring armor plate and (b) armor plate

5 结 论

采用翻转被照射平面的方法,实现了样品表面 BRDF 数据三维测量,建立了样品表面的 BRDF 模型。这种方法不需使用双向反射分布函数专用测量仪器,在测量空间内布置多个静止的激光能量密度测量设备,通过控制被照射平面翻转角度获取了三维空间内样品表面的 BRDF 数据,实验环境容易构建,操作简便,为研究目标表面激光散射特性提供了一种新的研究思路。

参 考 文 献

- 1 Yao Lianxing, Qiu Weili, Wang Fufeng. Optics Characteristic of Target and Environment [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995
- 2 Liu Jianfeng. The BRDF Modeling Technology of Light Scattering Characteristic of Targets and Earth Surface [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. 1~40
- 3 Sun Limin, Zhao Jianlin, Ren Ju *et al.*. 3-D Measurements of bidirectional reflectance distribution functions of target surfaces with different coats[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12):

的模型进行优化,确定 k_b 、 k_d 、 k_r 、 a 及 b 5 个参数,即得到了所选取迷彩钢板、普通钢板等样品的 BRDF 模型。文献[8~10]中提出多种算法完成实测数据对模型优化过程,这里不再论述。

对迷彩钢板、普通钢板 BRDF 模型参数的优化结果见表 3。图 4 中实线为所建立入射天顶角为 32° 的迷彩钢板、普通钢板的 BRDF 模型在入射平面内数值分布,图中虚线为实测的 BRDF 数据。

2529~2533

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

4 Wu Zhensen, Han Xiang, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study on bidirectional reflectance distribution function of laser scattering from various rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 262~268

吴振森,韩香娥,张向东 等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(3): 262~268

5 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *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. 粗糙目标样品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

6 Liu Zongxin, Li Xiangjun, Fan Xiaojie. Measurement technology study of laser reflection characteristic [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(4): 46~49

刘宗新,李相军,凡小杰. 激光目标反射特性测量技术研究[J]. *光电技术应用*, 2007, **22**(4): 46~49

7 Zhang Leihong, Yang Yan, Zang Huaguo *et al.*. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1001~1004

张雷洪,杨 艳,臧华国 等. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1001~1004

8 Zhang Baishun, Liu Wenqing, Wei Qingnong *et al.*. Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF[J]. *Chinese J. 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

9 Yu Haitao. Study of Modeling and Measuring of Optical Polarized Scattering from Surfaces[D]. Xi'an: Xidian University, 2005. 49~57

于海涛. 表面光极化散射特性的测量和模化技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005. 49~57

10 Wang Dangshe. Inversio and Measurement of Optical Parameter of DLC Film[D]. Xi'an: Xidian University, 2006. 37~49

王党社. 类金刚石薄膜光学特性测量与参数反演[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. 37~49

栏目编辑: 胡冰

340 mJ 全固态钠信标激光器

人造激光信标自适应光学系统,是提高大型天文望远镜成像分辨率的一项关键技术。高度约90 km的钠信标是人造激光信标的一种理想选择。当前,基于连续工作体制的全固态钠信标激光器已发展至50 W平均功率,并已获得实际应用。但在“第二代”百微秒脉冲体制全固态钠信标激光器领

域,其单脉冲能量最高仅为数十毫焦,不及90年代美国林肯实验室发明的灯泵钠信标激光器。本课题组利用两台大能量、窄线宽、高光束质量1064 nm与1319 nm全固态激光器腔外和频,实现了 340 ± 40 mJ、中心波长589.1592 nm、线宽约0.6 GHz、脉宽140 μ s的钠信标激光输出,装置结构如图1所示。

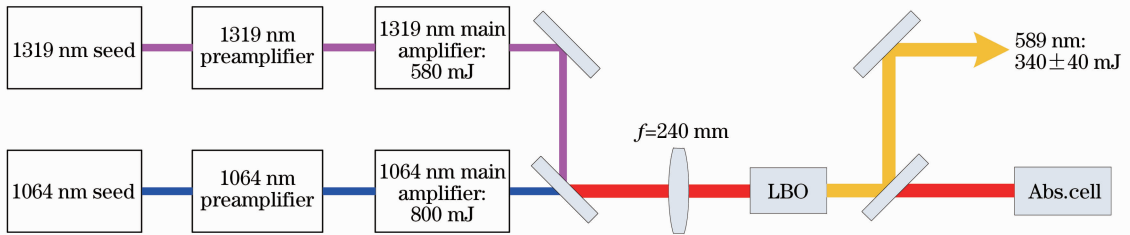


图1 钠信标激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sodium laser

如图1所示,1319 nm种子光经两级放大器后输出能量580 mJ,光束质量因子 $M^2 \approx 1.5$ 。1064 nm种子光经预放大器、主放大器后输出能量为800 mJ,光束质量因子 $M^2 \approx 1.8$ 。将1064 nm与1319 nm激光整形、合束、聚焦后通过LBO晶体进行非线性倍频,输出589 nm激光,和频效率约25%。

钠信标激光器中心波长、光束质量、脉宽分别如图2,3,4所示。

据我们所知,该钠信标激光器在国内外首次实现了300 mJ以上单脉冲能量输出,且光束质量高、波长稳定、线宽窄,在未来我国的天文自适应光学领域具有十分重要的应用前景。

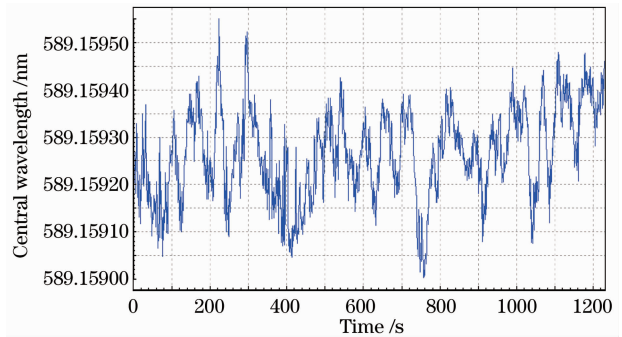


图2 中心波长变化曲线(20分钟内)果

Fig. 2 Curve of central wavelength (in 20 min)

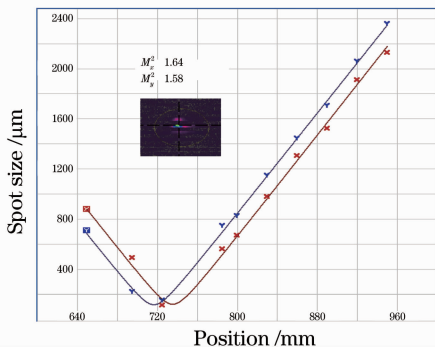


图3 光束质量测量结果

Fig. 3 Measured result of beam quality

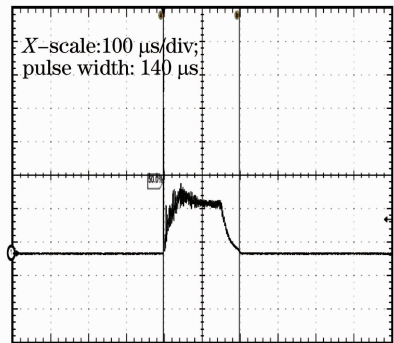


图4 激光脉宽测量结果

Fig. 4 Measured result of pulse width

鲁燕华 谢刚 庞毓 张雷 苏毅 张卫 唐淳 王卫民 高清松 万敏
高松信 李楠 许晓小 黄园芳 魏彬 田英华 石勇 杨开华

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

* E-mail: happyeleo@yahoo.com.cn

收稿日期: 2012-05-25; 收到修改稿日期: 2012-06-05