

·测试、试验与仿真·

## 一种间接测试地物对激光反射特性的方法

陆 君<sup>1</sup>, 李季波<sup>2</sup>

(1. 第二炮兵装备研究院 第四研究所, 北京 100085; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

**摘 要:**提出了一种基于双向反射比系数理论的自然地物激光反射特性的间接测量方法, 在不同角度处利用激光探测器采集同一位置处所选自然地物和漫反射板对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的响应幅度数据, 计算二者之间的比值即可得到此地物在不同角度上的双向反射比系数, 间接的反应不同地物对激光的反射特性。并利用该方法测试了杂草(丘陵类)、红土和风化岩石的双向反射比系数值, 试验验证了方法的工程应用可行性。

**关键词:**激光反射特性; 双向反射比系数; 外场测试方法

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-04-0058-04

## Indirect Method to Measure Laser Reflection Characteristic of Ground Feature

LU Jun<sup>1</sup>, LI Ji-bo<sup>2</sup>

(1. The Fourth Institute of the Second Artillery Equipment Academy, Beijing 100085, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

**Abstract:** An indirect measurement method for natural ground feature laser reflection characteristics is proposed based on bidirectional reflection ratio coefficient theory. A laser detector at different angles is used to collect the response amplitude data of 1.06  $\mu\text{m}$  laser to the chosen natural ground feature and diffuse reflection board at the same position. The ratio value is calculated to obtain the bidirectional reflection ratio coefficient of the ground feature at different angles and the reflection characteristics of different ground feature to laser is reflected indirectly. And the method can be used to test the bidirectional reflection ratios of weed, red soil and weathering rock. The engineering application feasibility of the method is verified by experiments.

**Key words:** laser reflection characteristic; bidirectional reflection ratio; field measurement method

地物反射作为激光传输过程中的重要环节, 其特性研究对于分析激光传输具有重要意义。而不同质地的地物对激光能量的反射程度有差别。因此, 提出一种准确、实用且方便的外场测试方法, 对研究不同种质地地物的激光反射特性具有实际意义<sup>[1]</sup>。

通常地物对激光反射特性的测试有直接测量和间接测量两种方法。其中, 直接测量法是利用测量地物对激光的反射率、双向反射分布函数(BRDF)等来表征地物对激光的反射特性。

反射率是表征不同地物对入射电磁波反射能力

的物理量。反射率是地物对某一波段电磁波的反射能量与入射的总能量之比, 其数值用百分率表示。直接测量目标反射率, 即利用目标表面漫发射定义进行测量, 该方法较为直接和简单, 但是根据辐射学理论, 用探测器光敏面接收到某一方向的光功率代表激光照射目标表面反射的功率, 这只有在目标表面为理想漫反射表面时才成立。因此, 在实际测量中, 地物对激光的反射率很难准确地获得。

双向反射分布函数是指在半球空间内, 某一方向入射到物体表面的平行光束在另一方向的散射特性, 它描述了物体表面对入射光束的反射能力和在

半球空间的散射分布情况,是表征物体表面本质属性的物理量。对于理想朗伯体,双向反射分布函数为  $1/\pi$ ;对于有一定大小探测立体角的物体,即方向-锥角的情况,双向反射分布函数为

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{P_r}{P_i \cos \theta_i \Omega_r} \quad (1)$$

式中,  $(\theta_i, \phi_i)$  表示光的入射方向;  $(\theta_r, \phi_r)$  表示反射光的探测方向;  $P_i$  为光入射到表面的辐射功率;  $P_r$  为立体角  $\Omega_r$  内探测器探测到的反射功率,这里假设  $f_r$  和  $\cos \theta_r$  在立体角  $\Omega_r$  内不变。因此,尽管在激光波长和入射角一定的条件下,可以测得某地物双向反射分布函数(BRDF)数据,但是在不同测试条件下会得到不同的测量结果。因为BRDF数据测试过程中存在较多变化量,想要建立涵盖各种波长和入射角、极化等各种组合条件下的地物目标完整BRDF数据是不现实的,所以在利用BRDF测试数据时,必须找到能够利用有限测试数据预计样本其他入射条件散射数据的方法。可见,利用双向反射分布函数(BRDF)来测试自然地物对激光反射特性不方便<sup>[2]</sup>。

## 1 地物目标漫反射率的间接测试方法

以上两类测量反射率和双向反射分布函数的直接测量方法均存在外场测试不适用、测量误差较大的缺点,为更准确且方便地获得不同地物的反射特性,提出测量地物双向反射比系数的间接测量方法来测量地物目标的漫反射率,进而评估不同地物对激光空间反射特性。

双向反射比系数定义为目标的反射辐射通量与标准板反射辐射通量之比。在同样光源照射条件下,因探测器接收到物体反射辐射通量与探测器的输出电压成比例,因此用探测器的输出电压之比可以代替探测器接收到的物体反射辐射通量之比。地物、标准板对探测器输出电压分别如式(2)、式(3)所示<sup>[3]</sup>。

$$V_s = kP_0 \cos \theta_i \cdot f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cos \theta_r \cdot \Omega \quad (2)$$

$$V_{id} = kP_0 \cos \theta_{i,d} \cdot f_{r,d} \cos \theta_{r,d} \cdot \Omega_r \quad (3)$$

式中,  $V_s$  为物体反射后的输出电压;  $V_{id}$  为标准板反射后的输出电压;  $k$  为响应系数,  $P_0 \cos \theta_i = P_i$ 。将  $V_s$  与  $V_{id}$  相比可得双向反射比系数如式(4)所示。

$$\frac{f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)}{f_{r,d}} = \frac{V_s}{V_{id}} \cdot \frac{\cos \theta_{i,d} \cdot \cos \theta_{r,d}}{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_r} = R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \quad (4)$$

式中,  $R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$  即为物体的双向反射比系数。

因此,只要测量物体与标准板在一定入射接收条件下的探测器输出电压,就可以得到物体的双向反射比系数,并以此来评估地物目标的空间反射特性。

基于以上双向反射比系数理论,外场利用激光探测器测量不同角度处漫反射板和所选自然地物对  $1.06 \mu\text{m}$  激光的响应幅度,进而求得双向反射比系数。图1为地物对波长  $1.06 \mu\text{m}$  激光的反射特性测试示意。在测量某一地物的双向反射比系数时,激光器与被测物体距离约  $110 \text{ m}$ ,漫反射板摆放在被测物体前方正对激光器;激光器照射漫反射板,激光探测器接收激光,通过示波器读取并记录探测器响应幅度;放倒漫反射板,激光器照射被测物体,观察示波器数值并记录。利用激光器分别照射漫反射板和地物,利用同一探测器依次在不同角度下接收激光反射信号,在示波器上观测探测器输出信号响应幅度,二者进行比对,标定被测地物的双向反射比系数<sup>[4-5]</sup>。

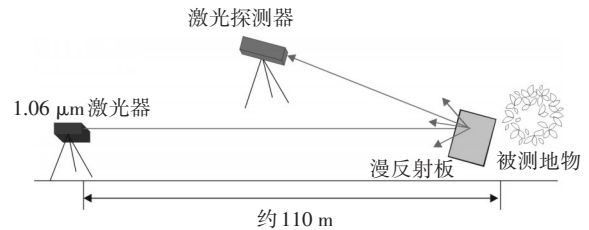


图1 地物对  $1.06 \mu\text{m}$  激光反射特性测试示意

试验数据处理过程中,选取某一角度的探测器响应幅度波形,将其与同一位置处漫反射板的探测器响应幅度比对,得到地物与漫反射板的响应幅度随时间变化的规律。

由于受到外场试验条件复杂性的限制,通过示波器记录的不同角度的响应幅度具有较大的离散性且无固定步长,导致通过描点连线得到的曲线具有较大误差。为此,采用二次插值法对数据进行处理,可以得到尽量多的数据值,从而更加准确地描绘出地物在不同角度下的双向反射比系数<sup>[6-7]</sup>。

理论上,数据处理多采用多项式曲线拟和的方法,计算如式(5)<sup>[8]</sup>。

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx_n \quad (5)$$

要达到更高的拟和精度,拟和多项式的次数也需更高,由于运算速度、复杂度等原因,实现这样的运算较困难。一般情况下,可采用拉格朗日二次插值的方法对数据进行处理,其处理过程与线性插值法相似,二次插值就是利用抛物线近似代替区间里的实际曲线。

在 $x$ - $y$ 直角坐标系特性曲线中,把输入量 $x$ 分成 $N$ 个均匀的区间,这样每个区间的端点 $x_i$ 都对应一个输出 $y_i$ ,把这些 $(x_i, y_i)$ 编制成表格存储起来。实际的检测值一定会落在某个区间 $(x_i, x_{i+2})$ 内,通过查表 $x$ 的自变量序列中位置为 $x_i \leq x \leq x_{i+1} \leq x_{i+2}$  ( $0 \leq i \leq n-2$ ),则对应的因变量值 $y$ 可用式(6)计算。

$$y = \frac{(x-x_{i+1})(x-x_{i+2})}{(x_i-x_{i+1})(x_i-x_{i+2})}y_i + \frac{(x-x_i)(x-x_{i+2})}{(x_{i+1}-x_i)(x_{i+1}-x_{i+2})}y_{i+1} + \frac{(x-x_i)(x-x_{i+1})}{(x_{i+2}-x_i)(x_{i+2}-x_{i+1})}y_{i+2} \quad (6)$$

由于在 $(x_i, x_{i+2})$ 邻域内,把离散数据拟合成抛物线,使得拟合精度与线性插值法相比大大提高,同时插值点值与插值点前后三个数据有关,与线性插值法相比减少了误差。因此在保证相同的计算精度条件下,可以把变量序列的步长取得相对较大,压缩了表格数据的存储。

将实际曲线用抛物线段近似逼近,通过近似公式计算,如果折线的段数取得合适,可以达到比较高的精确度,并且计算方法也比较简单。基于二次插值理论的数据处理方法,既提高了计算精度,又简化了计算步骤,而且有效节省了数据存储量。

## 2 外场试验测试

基于以上试验方法,外场分别对杂草(丘陵类)、红土和风化岩石的双向反射比系数进行了测试。利用 $1.06 \mu\text{m}$ 激光探测器测得了自然地物反射激光的响应幅度,利用示波器每次可以存储一个激光脉冲幅度数据,每间隔 $0.1 \text{ ns}$ 采集一组数据,持续 $250 \text{ ns}$ 时间共采集 $2500$ 组数据,利用matlab处理得到响应幅度随时间的变化曲线<sup>[9]</sup>。在夹角 $\sigma$ 为 $8.35^\circ$ 时,利用示波器分别记录下的三种地物与漫反射板之间的响应幅度对比曲线,分别如图2、图3、图4所示。

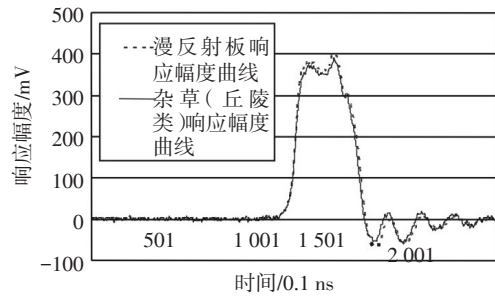


图2 杂草(丘陵类)和漫反射板的响应幅度随时间变化波形

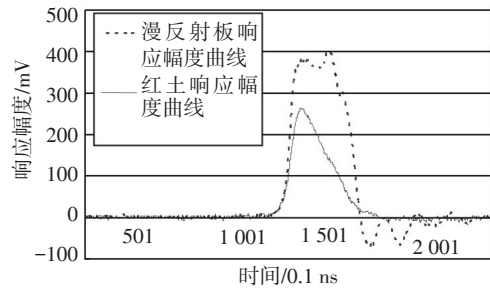


图3 红土和漫反射板的响应幅度随时间变化波形

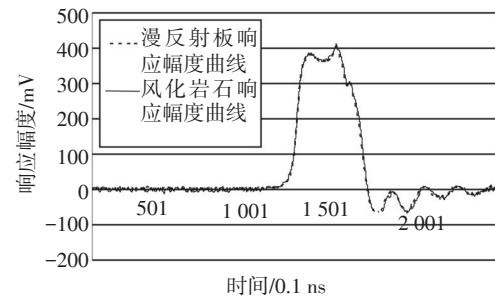


图4 风化岩石和漫反射板的响应幅度随时间变化波形

测试中,通过激光探测器在不同角度下分别采集自然地物和漫反射板对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的响应幅度值,通过计算二者的比值即可求得相应的双向反射比系数。探测器在不同角度下分别采集三种自然地物杂草(丘陵类)、红土和风化岩石与漫反射板的响应幅度值,进而分别计算出各地物在不同角度下的双向反射比系数,测试数据结果如表1~表3所示。

通过对比以上三种自然地物在不同角度下的双向反射比系数,得到双向反射比系数随夹角的变化规律并将其描绘成曲线,对比结果如图5所示。杂草对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的反射能力强于风化岩石和红土。

表1 杂草(丘陵类)的双向反射比系数值

序号	激光器、杂草和 激光探测器间 夹角 $\sigma / (^\circ)$	漫反射板 幅度值/mV	杂草 幅度值/mV	双向反射 比系数/%
1	8.35	404	392	97.03
2	16.66	399.03	340	85.21
3	27.13	384.65	332	86.31
4	34.71	375.49	304	80.96
5	44.18	380.03	312	82.10
6	52.82	404	304	75.25

表2 红土的双向反射比系数值

序号	激光器、红土 和激光探测器 间夹角 $\sigma / (^\circ)$	漫反射板幅 度值/mV	红土 幅度值/mV	双向反射 比系数/%
1	8.35	404	264	65.35
2	16.66	399.03	232	58.14
3	27.13	384.65	188	48.88
4	34.71	375.49	160	42.61
5	44.18	380.03	132	34.73
6	52.82	404	120	29.70

表3 风化岩石的双向反射比系数值

序号	激光器、风化岩 石和激光探测器 间夹角 $\sigma / (^\circ)$	漫反射板 幅度值/mV	风化岩石 幅度值/mV	双向反射 比系数/%
1	8.35	404	412	101.98
2	16.66	399.03	292	73.18
3	27.13	384.65	243	63.17
4	34.71	375.49	221	58.86
5	44.18	380.03	219	57.63
6	52.82	404	222	54.95

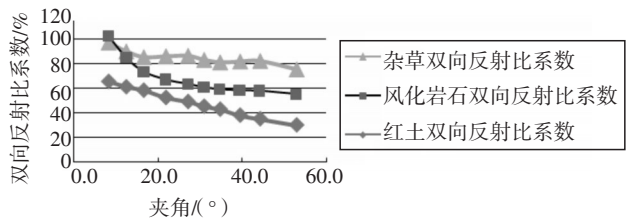


图5 三种地物的双向反射比系数对照曲线图

### 3 结论

利用测量双向反射比系数的方法比较了杂草(丘陵类)、红土和风化岩石三种地物对 1.06  $\mu\text{m}$  激光的反射特性,这种间接测试方法可方便、准确地反映地物目标对激光的反射特性,并利用外场试验验证了此方法工程应用的可行性。

### 参考文献

- [1] 温瑞棠.军事激光技术[M].北京:解放军出版社,1991.
- [2] 张百顺.基于双向反射分布函数实验测量的目标散射特性的分析[J].光学技术,2006(2):180-182.
- [3] 王建,王风贺,包国彬.漫反射板双向反射比系数的测量[J].光电技术应用,2005,20(4):32-34.
- [4] 王永仲.现代军用光学技术[M].北京:科学出版社,2003.
- [5] 周炳坤,高以智,陈嵘.激光原理[M].北京:国防工业出版社,1984.
- [6] 李俊文.基于MATALAB的二次插值法的优化设计[J].广东技术师范学院学报(自然科学),2013(7):37-39.
- [7] 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):46-48.
- [8] 王能超.数值分析简明教程[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [9] 薛定宇,陈阳泉.高等应用数学问题的MATLAB求解

(上接第30页)

图3是利用文中MSPF算法对人工选定地面目标的跟踪情况。图3a中矩形框为选定的跟踪目标区域,矩形框中心为跟踪点位置,图3b~图3d为跟踪过程中抽选的序列图像。由图3可见,文中方法即使在有短暂遮挡的情况下仍然能够对选定目标点进行可靠跟踪。

### 4 结束语

针对均值偏移算法对灰度图像进行目标跟踪时容易产生漂移的情况,提出了一种基于联合特征

加权的改进直方图描述方法,构建了一种粒子滤波和均值偏移算法相融合的目标跟踪方法,该方法有效整合均值偏移算法的快速搜索能力与粒子滤波的多状态采样和保持能力,提高了灰度成像目标的抗干扰能力和跟踪精度,跟踪误差一般不超过两个像素,完全满足实际跟踪要求。

### 参考文献

- [1] Fukunaga K, Hostetler L D. The estimation of the grandient

(下转第69页)

### 5 实测数据

某次实测利用膛压发生器产生模拟膛压的,测试曲线如图7。

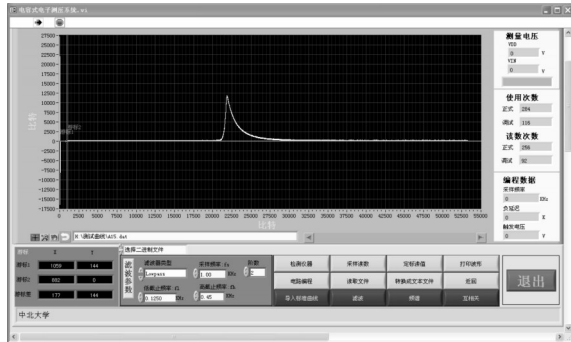


图7 上位机软件实测数据界面

### 6 结论

光触发的电容测压器有效解决了由于装配过程导致电容变化造成的工作异常,同时光窗结构的

设计兼顾了光触发与电磁屏蔽需求。设计的红外通信方式以非接触方式,避免了插线通信由于频繁插拔造成的损伤。拥有光触发与红外通信的壳体电容测压器将能更好服务于国防建设。

### 参考文献

[1] 李新娥,祖静,马铁华,等.用于火炮膛内压力测试的电容式传感器的设计[J]. 仪器仪表学报,2011,32(3):640-645.

[2] 李新娥,祖静,马铁华,等.一种新型电容式压力传感器的研究[J]. 兵工学报,2011,32(4):476-481.

[3] 刘飞.基于壳体电容的高压传感器仿真和实验技术研究[D]. 太原:中北大学,2012.

[4] 韩慧,曹帮琴,倪荣军.基于MSP430单片机的红外光通信装置的设计与实现[J]. 科技通报,2014,30(11):72-74.

[5] 陈明华,阎建平.发射药燃烧光谱测试技术[J]. 光电技术应用,2011,26(4):86-88.

[6] 沈建华,杨艳琴.MSP430系列16位超低功耗单片机原理与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008:2-50,265-266.

(上接第61页)

of a density function with applications in pattern recognition [J]. IEEE Trans. Information Theory,1975,21(5):32-40.

[2] 高文,陈熙霖.计算机视觉-算法与系统原理[M].北京:清华大学出版社,2000:5-11.

[3] 侯晴宇,张伟,武春风,等.改进的均值移位红外目标跟踪[J]. 光学精密工程,2010,18(3):764-770.

[4] Dorin Comaniciu, Visvanathan Ramesh, Peter Meer. Kernel-based object tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2003,25(5):564-577.

[5] Dickmanns E D. The development of machine vision for road vehicles in the last decade[J]. IEEE Intelligent Vehicle Symposium,2002,6(1):268-281.

[6] KAILATH T. The divergence, Bhattacharyya distance measures in signal selection[J]. IEEE Trans. Comm. Technology, 1999,15(2):253-259.

[7] 崔文超,金钢,柳建.一种灰度成像扩展目标跟踪方法[J]. 光电工程,2005,32(7):18-22.

[8] 江增伟.融合区域颜色和纹理特征的Mean Shift目标跟踪

方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012,38-44.

[9] 苏先文,王庆贤.融合纹理信息的均值偏移跟踪算法[J]. 信息技术,2011(2):57-59.

[10] 韩兆福,曾令伟,黄晨,等.结合运动目标轮廓提取的均值漂移算法[J]. 激光与红外,2010,40(11):1258-1262.

[11] 张恒,李立春,于起峰.尺度方向自适应Mean Shift跟踪算法[J]. 光学精密工程,2008,16(6):1133-1139.

[12] 张伟平,赵楠楠,李培华.一种改进的EMD目标跟踪方法[J]. 计算机工程与应用,2010,46(33):151-154.

[13] 刘晴,唐林波,赵保军,等.改进的mean shift目标跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术,2013,35(6):1318-1323.

[14] Lei Y, Ding X, Wang S. AdaBoost Tracker Embedded in Adaptive Particle Filtering[C]. In Proc. of ICPR, New York: IEEE Press,2006,4:939-943.

[15] 虞旦,韦巍,张远辉.基于单目视觉的移动机器人跟随[J]. 仪器仪表学报,2010,31(3):659-664.

[16] 王国良,刘金国.基于粒子滤波的多自由度运动目标跟踪[J]. 光学精密工程,2011,19(4):864-869.