

·激光技术·

## 激光雷达散射截面测量误差分析

周亚凡, 刘颖, 叶宗民

(91404部队, 河北 秦皇岛 066001)

**摘要:** 论述了激光雷达散射截面(LRCS)信息的重要性,从基本定义出发,分析LRCS表达式及其物理意义。依据辐射传输原理和光电探测原理,推导LRCS测量数学模型。依据目标与照射光斑截面大小关系,引入了目标系数 $\delta$ 概念。从目标系数、辐射标定标准选择、激光照射系统性能、激光探测系统性能以及大气环境参数等诸多方面,较全面地分析了测量误差来源,以及减少或修正误差的方法,并以误差树的方式直观地表示了误差来源及影响作用。从测量数据可信性、可交换性和可用性原则出发,提出了测量数据记录要求,并编制了测量数据记录表。对开展激光雷达目标散射特性研究具有重要参考价值。

**关键词:** LRCS; 测量数学模型; 测量误差分析; 测量记录要求

中图分类号: TN249

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-03-0014-05

## Measurement Error Analysis for Scattering Cross Section of Laser Radar

ZHOU Ya-fan, LIU Ying, YE Zong-min

(91404 Army Unit, Qinhuangdao 066001, China)

**Abstract:** The importance of information about laser radar cross section (LRCS) is introduced. According to basic conceptions, LRCS expressions and the physical meanings are analyzed. Measurement mathematic models of LRCS are deduced according to the principles of radiation transmission and electro-optical detection. The concept of target coefficient such as  $\delta$  is imported according to the relationships between targets and the sizes of irradiation faculae section. From some aspects such as target coefficient, criterion choices of radiation calibration, performances of laser irradiation system and laser detection system as well as atmospheric environment parameters, sources of measurement error and methods for error reducing and correcting are analyzed. And error source and influence are expressed intuitively by error tree. According to the principles of creditability, interchangeability and usability of measurement data, register requirements of measurement data are proposed and register tables of measurement data are programmed. It is an important reference to characteristics research on laser radar target scattering.

**Key words:** laser radar cross section (LRCS); measurement mathematic model; measurement error analysis; measurement annal requirement

激光雷达目标散射特性信息对激光探测系统设计、鉴定及应用具有重要作用。激光探测系统基于激光雷达目标散射特性获得区别于背景的目标强度、距离和速度等信息<sup>[1]</sup>。激光雷达散射截面(LRCS)是激光雷达目标散射特性的量度。LRCS的测量结果与激光波长、目标材质与结构、辐射测量

与标定原理、激光照射与探测系统、背景与大气环境等因素相关。对激光雷达散射截面测量误差进行理论分析与研究,是提高测量精度与测量结果可信性、可用性和可交换性的前提。文中依据辐射传输和光电探测原理,推导LRCS测量数学模型,对测量误差进行多角度分析,绘制误差树和编制数据记录表,提

出误差修正与提高方法。

### 1 LRCS 测量数学模型

当以无损耗各向同性球作标定标准时, LRCS 的定义与雷达散射截面的定义相同。雷达散射截面 (RCS) 定义为  $4\pi$  乘以单位立体角内目标朝接收方向远区散射功率和从给定方向入射到该目标单位面积平面波功率密度之比, 常用符号  $\sigma$ , 以平方米为度量单位。可见, LRCS 是一个对比测量结果, 对比的标准是无损耗各向同性球; 是一个主动测量结果, 激光照射系统和激光探测系统配套工作; 是一个远场测量结果, 要求入射到目标上的波为平面波; 是一个与入射与散射方向相关的量, 定义为  $4\pi$  乘以目标朝接收方向远区散射的激光辐射强度  $J_r$  和给定方向入射到该目标的激光辐射照度  $E_i$  之比, 即

$$\sigma = 4\pi \frac{J_r}{E_i} \quad (1)$$

由于被测目标截面积与照射激光光斑相比有大目标、小目标、线目标的不同情况, 对激光光斑的拦

截与散射作用有不同的影响, 采用目标系数  $\delta$  表示。设激光光束中心瞄准目标几何中心, 瞄准误差  $\phi$ 。当目标截面积大于等于  $\pi R^2 \sin^2(\omega + \phi)$  时, 为大目标,  $\delta = 1$ ; 当目标截面积小于  $\pi R^2 \sin^2(\omega - \phi)$  时, 为小目标,  $\delta$  为目标面积与光斑面积之比; 当目标某一方向尺度大于等于  $R \sin(\omega + \phi)$ , 另一方向尺度小于  $R \sin(\omega - \phi)$ , 为线目标,  $\delta \leq 1$ , 为实际被照射到的目标面积与光斑面积之比。

设测量系统双站位工作, 满足远场照射与测量条件。试验参数设定与记录如表1。根据辐射及传输原理<sup>[2-3]</sup>、光电探测原理及 LRCS 定义可得

$$E_i = \frac{p_i \delta T_i \eta_i}{\pi R_i^2 \omega^2 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

$$J_r = \frac{E_r R_r^2}{T_r \eta_r} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)得

$$\sigma = 4\pi^2 \frac{E_r R_r^2 R_i^2 \omega^2 \cos^2 \theta}{p_i \delta T_i T_r \eta_i \eta_r} \quad (4)$$

根据辐射探测原理, 探测器响应的是辐射照度

表1 测量参数设定/记录表

测量数据说明	何时、何地, 采用**照射系统、**探测系统和探测方式、**起偏系统、采用**标准目标, 对**目标在静止/运动状态下进行对比测量。获得数据文件名, 图像文件名等。							
名称	目标	标准	名称	目标	标准	名称	目标	标准
照射距离	$R_i$	$R_{oi}$	测量距离	$R_r$	$R_{or}$	激光入射角	$\theta$	$\theta_o$
远场发散角	$\omega$	$\omega_o$	光束瞄准误差	$\phi$	$\phi_o$	入射激光功率	$p_i$	$p_{oi}$
目标截面积	$S$	$S_o$	目标系数	$\delta$	$\delta_o$	反射率		$\rho_o$
入射辐照度	$E_i$	$E_{oi}$	散射辐射强度	$J_r$	$J_{or}$	接收辐射照度	$E_r$	$E_{or}$
探测角	$\beta$	$\beta_o$	接收系统面积	$A_r$	$A_r$	探测器响应率		$R_{ov}$
发射系统增益	$\eta_i$	$\eta_{oi}$	接收系统增益	$\eta_r$	$\eta_{or}$	LRCS	$\sigma$	$\sigma_o$
系统响应噪声	$\overline{\Delta v}_{\text{系统}}$	$\overline{\Delta v}_{\text{系统}}$	回波脉冲宽度	$\tau_r$	$\tau_o$	输出电压	$v$	$v_o$
大气能见度			大气温度湿度			风速		
照射激光波长	$\lambda$		照射光斑模式			光斑均匀性		
照射激光脉宽	$\tau$		激光偏振状态			束宽及定义	$w(z)$	$w_o(z)$
探测系统 检偏特性			入射路程 激光透过率	$T_i$	$T_{oi}$	测量路程 激光透过率	$T_r$	$T_{or}$
探测系统孔径	$D$		探测系统视场			探测瞬时视场		
波长响应特性			探测器类型			滤波特性		
目标尺寸结构			标准尺寸结构			背景材料特性		
目标材料特性			标准材料特性					
测量人员			记录人员			质量保障人员		

值,输出响应电压值。当采用标准球标定测量时,在假定标准球为点目标时有

$$E_r = \frac{v}{R_{ov}}, R_{ov} = \frac{v_o}{E_{or}}, E_{or} = \frac{J_{or} T_{or} \eta_{or}}{R_{or}^2},$$

$$J_{or} = \frac{E_{oi} S_o \rho_o \delta_o}{4\pi}, E_{oi} = \frac{p_{oi} T_{oi} \eta_{oi}}{\pi R_{oi}^2 \omega_o^2 \cos^2 \theta_o},$$

$$E_r = \frac{v}{v_o} \frac{p_{oi} \rho_o S_o \delta_o T_{oi} T_{or} \eta_{oi} \eta_{or}}{4\pi^2 R_{oi}^2 R_{or}^2 \omega_o^2 \cos^2 \theta_o} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得 LRCS 测量数学模型为

$$\sigma = \rho_o S_o \frac{v}{v_o} \frac{p_{oi} \cos^2 \theta \omega^2 R_i^2 R_r^2 T_{oi} T_{or} \eta_{oi} \eta_{or} \delta_o}{p_i \cos^2 \theta_o \omega_o^2 R_{oi}^2 R_{or}^2 T_i T_r \eta_i \eta_r \delta} \quad (6)$$

## 2 LRCS 测量误差分析

由式(6)可见,比对测量在保证相同的入射与探测条件时, LRCS 仅与目标表面材料及其粗糙度、目标几何结构及大小、标定标准及光电探测系统影响等因素相关。然而,实际测量中很难保证相同条件,必然引入多种测量误差,且采用标准球标定时散射辐射强度的计算也引入测量误差。由测量数学模型推导过程绘制测量误差树,如图1所示。图1中大气环境参数与标定和测量过程中的大气透过率直接相关,为了图的清晰没有给出全部连线。

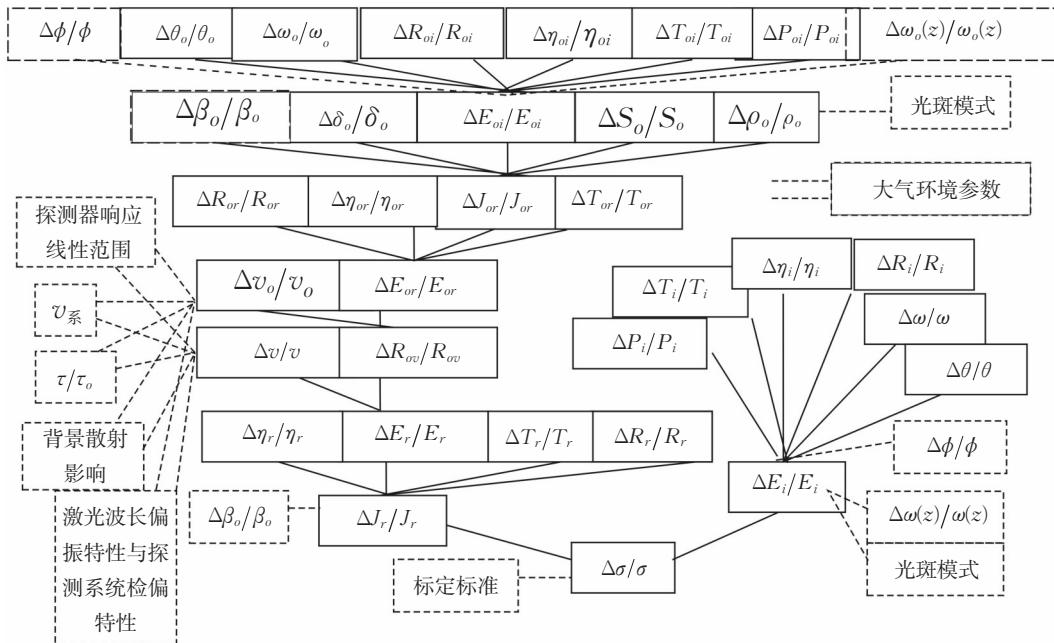


图1 激光雷达散射截面(LRCS)测量误差树

### 2.1 标定标准引入的误差

LRCS 测量结构是通过激光功率/能量信息的间接测量获得的。激光功率/能量的定量/比对测量需要有传递标准。采用标准球进行标定测量时,是假定标准球将接收到的入射激光均匀散射在全部空间中计算得出的标准球散射的辐射强度。而标准球往往不可能将接收到的入射激光均匀散射到全部空间中,从而引入误差。实际工作中通常采用朗伯体制作的标准板(聚四氟乙烯板)进行标定测量。标准板将接收到的入射激光按照余弦定律散射在半球空间中<sup>[4]</sup>,其

$$J_{or} = \frac{E_{oi} S_o \rho_o \delta_o \cos^2 \beta_o}{2\pi},$$

LRCS 测量数学模型为式(6)再乘上  $2 \cos^2 \beta_o$  项。

### 2.2 激光照射系统参数变化的影响

#### (1) 激光输出功率稳定性的影响

激光输出功率稳定时,可认为  $p_i = p_{oi}$ , 式(6)中可直接约去,然而,实际脉冲激光功率总会有起伏,是测量误差的重要来源。

#### (2) 激光远场发散角的影响

设激光束沿  $z$  轴传输,束宽为  $w(z)$ ,激光远场发散角定义<sup>[2]</sup>为  $\omega = \lim_{z \rightarrow \infty} w(z)/z$ 。由于激光发射光学系统像差、以及大气等因素的影响,实际光束的远场发散角要大于理想光束的远场发散角。另外,激光

远场发散角可以通过扩束或聚焦来改变,且与束宽直接相关。而激光光束束宽的定义通常有三种,即 $1/e^2$ ,环围功率(能量)86.5%和二阶矩定义<sup>[5]</sup>。对于基模高斯光束,上述三种定义完全一致。但对于高阶高斯光束和其他光束,不同的定义会得出不同的结果。当用激光远场发散角作为参数计算时,必须将激光束宽取为某一确定值进行比较才有意义。

### (3)激光光斑场强分布不均匀的影响

通常情况下,测量所用的照射激光束是非均匀的基模或低阶模高斯光束,给入射辐射照度的计算带来误差。如目标上入射的高斯光束光斑内辐射照度不是一固定值,在光斑中心处最大,沿着光斑半径方向逐渐减小。而通常采用平均值的方法计算,待测目标和标准球大小形状不同,从而导致测量与标定时入射辐射照度分布不同;另外,当目标或标准球为小目标时,其上的辐射照度值大于平均值,从而给标定和测量带来误差。目标系数值越小,影响越大。当瞄准误差为零,且已知目标形状与尺寸及光斑特性时可以进行修正<sup>[6]</sup>。

### (4)激光照射系统瞄准误差 $\phi$ 的影响

激光照射系统瞄准误差影响照射光斑中心与目标几何中心的重叠程度,从而影响目标或标准球上辐射照度的分布情况,给标定和测量带来误差。且目标或标准球为小目标或线目标时,直接给激光辐射照度计算与修正带来困难。应当依据实际数据进行修正与计算。

(5)同一材料对不同波长的激光、以及同一波长不同偏振状态的激光或波束形状不同的激光,其散射特性不同<sup>[7]</sup>和造成的回波信号的脉冲展宽也不同<sup>[6]</sup>。

## 2.3 激光探测系统的影响

### (1)探测系统响应噪声的影响

由于系统噪声的影响,系统输出电压将有一定的起伏,对测量输出电压带来误差。可采用标准激光源对测量系统进行标定,用多次采样求平均值及其方差,得出系统响应噪声和引入的相对测量不确定度分量。分别用 $v - \Delta v_{\text{系}}$ 和 $v_0 - \Delta v_{\text{系}}$ 替代式(6)中的 $v$ 和 $v_0$ 项修正。

### (2)探测光学系统的影响

探测系统光学镜头的二次反射以及散射光斑中心和边缘返回探测系统的光程差不同会导致散射回波脉冲展宽,使探测系统所得到的散射光峰值功率

密度下降。

### (3)探测器响应率线性范围的影响

LRCS测量的基本原理是对比测量,对比的基础建立在探测器响应的线性工作范围内。当被测雷达目标与标准球/板对激光的散射能力相差较大时,如果超出探测器响应线性范围,其对比的基础就不成立了。可通过改变测量或标定距离、加装激光衰减片、改变激光远场发散角等方法使其满足线性测量范围要求。

### (4)探测机理的影响

激光探测分为成像探测与非成像探测。成像探测从扫描方式上分为扫描成像探测和非扫描成像探测;从探测体制方式上分为相干探测和直接探测;从照射源上分为CO<sub>2</sub>激光、二极管泵浦固体、半导体激光等。按激光工作波长可分为可见光及短波红外、中波红外和长波红外激光成像雷达。不同的激光探测系统探测机理不同,影响其测量误差的因素不同,对目标激光散射特性的关注点也有所不同。对距离探测系统而言,有脉冲测距和相位测距。对于脉冲调制测距的激光探测系统,照射激光光斑强度分布、测量背景与支架散射回波的散斑作用、大气效应等都影响激光回波脉冲上升时间与峰值响应产生影响。对于激光相干探测而言,本振信号频率与回波信号频率直接影响到其距离测量精度与距离成像分辨率等。对能量探测系统而言,不同的探测器其响应波长范围不同,激光波长的宽度与探测器波长响应的匹配度等也不同。对于检偏探测系统而言,由于目标的起偏作用不同,使不同的检偏探测系统有不同的响应等。需要依据实际测量条件进行记录与分析,或依据实际需要建立测量系统进行测量。

## 2.4 目标尺度与结构、背景与大气环境的影响

### (1)目标尺度与表面结构的影响

目标或标准球/板的尺度与结构,一是影响拦截与散射光斑大小的能力,二是影响目标上辐射照度的分布与计算,三是在有瞄准误差时,在目标为小目标时,给辐射照度的修正带来困难。在相同条件下,由目标与标准球/板表面结构不同,从而导致散射波的脉冲展宽不同与峰值的下降,对采用峰值探测方法进行测量的系统带来测量误差。在式(6)中应当乘上 $\tau/\tau_0$ 项。

### (2)背景散射的影响

在实际外场测量中,待测目标尺度远大于标准

球/板的尺度,而通常选择激光发散角与大尺寸待测目标匹配。而测量标定时,由于照射光斑面积大于标准球/板载面积,使架设支撑架与地面等背景对激光散射后进入探测系统,造成对标准球/板散射回波信号的非相干迭加干扰<sup>[8]</sup>。减小背景和支架的散射干扰方法有几种,一是采用低反射率的材料对支架或背景进行敷设消光;二是采用尺寸匹配法,对目标和标准球/板的尺寸进行估算,对发射系统的束散角进行控制;三是采用背景减去法,对标准球/板的背景进行多次测量,得到其回波电压 $\Delta v_0$ ,用 $v_0 - \Delta v_0$ 替代式(6)中的 $v_0$ 项进行修正。

### (3)大气效应的影响

大气效应主要有三方面影响。一是大气的消光效应。当激光光束在大气中传播时,受到大气吸收和散射作用而衰减。激光波长宽度内的平均透过率为分子吸收平均透过率、分子散射平均透过率、气溶胶吸收平均透过率和气溶胶散射平均透过率之积,即 $T(\lambda) = T_1(\lambda) \cdot T_2(\lambda) \cdot T_3(\lambda) \cdot T_4(\lambda)$ ;二是大气湍流引起的光束漂移,影响入射辐射照度与接收辐射照度的空间分布,造成强度图像噪声增大、相位畸变;三是大气产生的波前畸变至使回波信号时间延迟,造成距离图像噪声增大。在实际测量时应尽量缩短标定与测量时间、以满足相同的大气条件,消除大气传输影响,但必须保证两次测量有相同的入射和探测条件。可以采用双光路测量方法来减少/修正类似朗伯面目标LRCS测量时,因大气气溶胶变化引起的测量与标定时透过率变化引入的测量误差<sup>[9]</sup>。

## 3 结束语

引起LRCS测量误差的因素很多,包括激光发射系统参数变化的影响、目标与标准球/板尺度、结构与性能的影响、背景与大气环境的影响、激光探测系统探测机理与系统性能的影响等。不同的激光探测系统对激光目标散射特性的关注点不同。从测量数据可信性、可交换性和可用性原则出发,在进行LRCS测量与研究时,应当详细记录测量相关条件(见表1)进行综合分析处理,并将测量结果与测量条件同时记录保存才具有使用性与交换性。

## 参考文献

- [1] 孙志慧,邓家浩,闫晓伟. 国外激光成像探测系统的发展现状及其关键技术[J]. 科技导报, 2008, 26(3):74-79.
- [2] R D.小哈得逊. 红外系统原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1975.
- [3] 李景镇. 光学手册[M]. 陕西:陕西科学技术出版社出版, 1986.
- [4] 陈玉丹,张维安,陈玉程,等. 多类目标样片激光散射特性研究[J]. 应用光学, 2011(5):1253-1256.
- [5] 吕百达. 强激光的传输与控制[M]. 北京:国防工业出版社, 1999:65-67.
- [6] 包学志,高卫,李威,等. 两种非理想条件下LRCS测量结果的校正方法[J]. 红外与激光工程, 2008(1):61-63.
- [7] 韩香娥. 大粗糙度表面激光散射特性实验研究[J]. 光散射学报, 1995, 7(2)(3).
- [8] 包学志,高卫,贾养玉,等. 背景散射对LRCS测量精度的影响分析[J]. 应用光学, 2008(4):590-594.
- [9] 包学志,高卫. 大气条件变化时的激光雷达散射截面测量方法[J]. 光子学报, 2009(1):414-417.

## 本刊声明

《光电技术应用》期刊投稿电子信箱已变更为nl0e@vip.163.com,原投稿电子信箱neiet@jzptt.ln.cn已停止使用,请作者按新的电子信箱投稿。凡向期刊投稿的作者,请按照刊登论文的格式要求写稿,详见期刊网站www.gdjsy.com,本刊拒绝一稿多投,敬请作者自觉遵守。