

文章编号: 1001-3806(2015)04-0480-04

非理想条件下 LRCS 测量误差分析和校正

王冰^{1,2}, 张斌¹, 高山³, 张岩岫^{1,2}, 王东^{1,2}

(1. 中国洛阳电子装备试验中心, 洛阳 471003; 2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 洛阳 471003; 3. 中国人民解放军 63751 部队, 西安 710001)

摘要: 为了减小激光雷达散射截面(LRCS)测量过程中激光能量和大气状态不稳定带来的测量误差, 提高 LRCS 测量准确度, 采用基于多个探测单元同时测量的多站对比误差校正方法, 推导了一个新的 LRCS 计算公式, 讨论了传统对比方法测量 LRCS 的适用范围和局限性, 分析了在非理想条件下激光器的能量起伏和大气状态的变化对 LRCS 计算带来的误差, 并通过实验对两种方法的测量结果进行了分析比对。结果表明, 设计的多站对比测量方法科学可行, 采用多站对比公式计算的 LRCS 值准确度高, 可以有效减小或消除测量过程中激光能量和大气状态的不稳定带来的测量误差。

关键词: 激光技术; 激光雷达散射截面; 多站对比测量; 激光能量起伏; 大气状态变化

中图分类号: TN958.98

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.011

Analysis and correction of LRCS measurement error under non-ideal conditions

WANG Bing^{1,2}, ZHANG Bin¹, GAO Shan³, ZHANG Yanxiu^{1,2}, WANG Dong^{1,2}

(1. Luoyang Electronic Equipment Testing Center of China, Luoyang 471003, China; 2. Key Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China; 3. 63751 Unit, Chinese People's Liberation Army, Xi'an 710001, China)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of laser radar cross section (LRCS) and to avoid the measurement error of LRCS because of the instability of laser energy and atmospheric conditions, multi-channel comparison measurement method was adopted. New equation and calculation expressions were deduced for LRCS. The applicability and limitation of traditional LRCS measurement were discussed. The influence of laser energy instability and random atmospheric fluctuation on LRCS testing was analyzed. The results of two measurement methods were analyzed and compared. The test shows that the new method is more feasible than the traditional method. The measurement results of LRCS by multi-channel comparison are more accurate and could avoid and decrease the measurement error induced by laser energy instability and random atmospheric fluctuation.

Key words: laser technique; laser radar cross section; multi-channel comparison measurement; laser energy instability; random atmospheric fluctuation

引言

激光雷达散射截面(laser radar cross section, LRCS)是表征目标激光散射特性的重要特征量之一, 是实现对目标的探测、特征提取、识别的重要依据, 在激光制导、激光成像、目标识别等方面得到了广泛的应用。因此, 研究激光雷达散射截面的测量方法具有重要的意义^[1]。

比较测量法是常用的激光雷达散射截面测量方法^[2], 即通过分别测量已知 LRCS 的朗伯标准板的探

测信号峰值电压和待测目标的探测信号峰值电压, 利用对比测量的方法计算出待测目标的 LRCS。此方法操作方便、应用广泛。研究人员从常用的比较测量对比公式衍生出了各种计算公式, 用于提高测量准确度和对不同目标的适用性^[3-9], 包括对大尺寸目标、小尺寸目标、镜面目标等各类目标的 LRCS 测量。这些测试方法需要测试期间激光器的出光能量保持稳定, 且忽略了更换标准目标和待测目标前后的大气条件变化。通常情况下, 测量所用的激光器出光功率(能量)是不稳定的, 测试期间场区的大气状况也是起伏不定的, 从而导致更换目标前后照射在标准板和待测目标上的激光能量不是完全一致的, 而经过不同的大气传输后激光在测试光路上的衰减也是不同的, 即更换目标前后的测试条件和环境发生了变化。因此采用传统

作者简介: 王冰(1981-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事光电对抗测试评估方面的研究工作。

E-mail: wangbingly@163.com

收稿日期: 2014-05-19; 收到修改稿日期: 2014-06-20

的对比公式计算 LRCS 会产生误差,若要进一步提高 LRCS 测量准确性,需对更换目标前后的测试条件及环境变化进行分析研究,对传统 LRCS 对比方程和计算结果进行校正。

本文中主要考虑激光器的能量起伏和大气状态的变化对 LRCS 计算带来的影响,设计了一种多个探测单元同时测量的多站对比误差校正方法,在激光器能量不稳定和大气状态变化情况下引入一个校正系数对传统 LRCS 对比公式进行修正,推导出一个新的 LRCS 计算公式,降低测量过程中激光能量和大气状态的不稳定带来的测量误差。

1 传统比较测量 LRCS 误差分析

传统比较测量法的测量原理如图 1 所示,激光源向目标(标准漫反射板)发射一定束散角的激光束,光斑应能完全覆盖目标(标准漫反射板),接收系统对目标散射的激光回波进行监测。

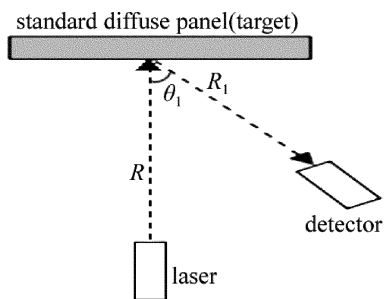


Fig. 1 Comparative measurement method for LRCS

若激光器功率为 P ,激光束散角为 θ ,与标准板之间的距离为 R ,接收系统的光学孔径面积为 A ,接收系统与标准板之间的距离为 R_1 ,接收系统与标准板法线的夹角为 θ_1 ,光学系统透过率为 τ ,标准板的激光雷达散射截面为 σ_s ,大气衰减系数为 ε ,则接收系统接收到的目标回波激光功率为^[10]:

$$P_s = 2 \frac{P}{\pi R^2 \theta^2} \sigma_s \frac{A \cos \theta_1}{\pi R_1^2} \tau \exp[-\varepsilon(R + R_1)] \quad (1)$$

将标准板换成被测目标,记此时激光器功率为 P' ,大气衰减系数为 ε' ,其它参量不变,接收系统接收到目标回波激光功率为:

$$P_i = 2 \frac{P'}{\pi R^2 \theta^2} \sigma_i \frac{A \cos \theta_1}{\pi R_1^2} \tau \exp[-\varepsilon'(R + R_1)] \quad (2)$$

传统的比对测量的基础是假设更换目标前后的测试条件不变,即激光器功率不变、测量期间的大气条件不变, $P = P'$, $\varepsilon = \varepsilon'$,则待测目标的 LRCS 值为:

$$\sigma_i = \frac{P_i}{P_s} \sigma_s \quad (3)$$

在实际测量过程中,激光器在测试期间的能量输出具有一定的不稳定性,且如果更换标准板和被测目

标所需的时间稍长,更换目标前后测量光路大气衰减也会不同,即 $P \neq P'$, $\varepsilon \neq \varepsilon'$,那么待测目标的 LRCS 值实际为:

$$\sigma_i' = \frac{P}{P'} \frac{\exp[-\varepsilon(R + R_1)]}{\exp[-\varepsilon'(R + R_1)]} \frac{P_i}{P_s} \sigma_s \quad (4)$$

当激光器能量不稳定或者测试期间大气状态发生变化时,采用传统测量法计算 LRCS 会产生一个测量误差 $\Delta\sigma$,用 ΔP 和 $\Delta\varepsilon$ 表示更换目标前后激光能量和大气衰减系数的变化量,即:

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{P' - P}{P} \\ \Delta\varepsilon = \frac{\varepsilon' - \varepsilon}{\varepsilon} \end{cases} \quad (5)$$

则 $\Delta\sigma$ 可表示为:

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_i' - \sigma_i}{\sigma_i} = \frac{\exp[\Delta\varepsilon\varepsilon(R + R_1)]}{\Delta P + 1} - 1 \quad (6)$$

只有忽略测试期间激光器功率和场区大气状态的变化,即 $\Delta P = 0, \Delta\varepsilon = 0$ 时,此时传统测量法测得 LRCS 测量误差 $\Delta\sigma = 0$;若测试期间激光器能量不稳定或者测试场区大气状态发生变化,需要对测量值进行修正,以提高 LRCS 计算准确度。图 2 为测量误差随激光器能量起伏和大气衰减系数变化的曲线。

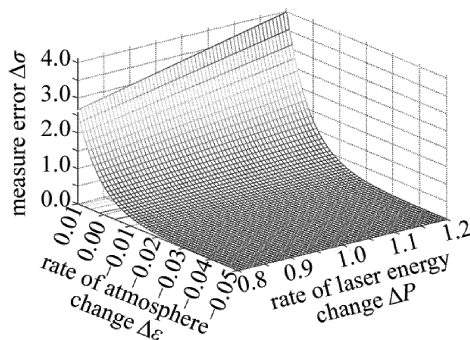


Fig. 2 Relative error of LRCS vs. laser energy and atmospheric influence

2 多站对比测量方法的设计思路和公式推导

为了消除两次测量过程中激光器峰值功率和大气的影 响,本文中采用了 3 个探测器同时探测的思路。其中,探测器 1 和探测器 2 分别布设在目标法线方向上的不同距离处,对目标反射的激光能量进行测量,探测器 3 监测激光器的出光功率/能量,其中 R_1 和 R_2 分别为两个探测器与目标之间的距离,且 $R_1 \neq R_2$, R_3 是探测器 3 与激光器之间的距离,如图 3 所示。外场测试时,测试光路平行于地面,且测量场地通常选择平坦、开阔的场区,地面植被分布近似均匀,因此,只要激光器与目标摆放距离不远,则可以认为在每一次测量过程中探测激光到达 3 个探测器路径上的大气状态是均匀的。通过引入探测器 2 和探测器 3,利用探测器 3

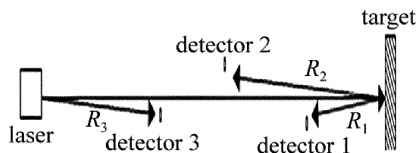


Fig. 3 Layout of multi-channels comparison measure for LRCS

监控测试期间激光器的能量变化,利用探测器2和探测器1的测量数据计算每一次测量期间试验场区的大气状态。

目标为标准漫反射板时,假设激光器峰值电压 V ,大气衰减系数为 ε ,探测器1接收到的信号峰值电压为 V_1 ,探测器2接收到的信号峰值电压为 V_2 ,探测器3接收到的信号峰值电压为 V_3 ,则:

$$V_1 = 2 \frac{A\tau \cos\theta_1}{\pi^2 R^2 R_1^2 \theta^2} V \sigma_s \cdot \exp[-\varepsilon(R + R_1)] \quad (7)$$

$$V_2 = 2 \frac{A\tau \cos\theta_2}{\pi^2 R^2 R_2^2 \theta^2} V \sigma_s \cdot \exp[-\varepsilon(R + R_2)] \quad (8)$$

$$V_3 = 4 \frac{A\tau}{\pi R_3^2 \theta^2} V \cdot \exp(-\varepsilon R_3) \quad (9)$$

将目标更换为待测漫反射板,假设此时激光器能量发生不稳定,峰值电压为 V' ,大气状态产生变化,衰减系数为 ε' ,探测器1接收到的信号峰值电压为 V_1' ,探测器2接收到的信号峰值电压为 V_2' ,探测器3接收到的信号峰值电压为 V_3' ,则:

$$V_1' = 2 \frac{A\tau \cos\theta_1}{\pi^2 R^2 R_1^2 \theta^2} V' \sigma_1 \cdot \exp[-\varepsilon'(R + R_1)] \quad (10)$$

$$V_2' = 2 \frac{A\tau \cos\theta_2}{\pi^2 R^2 R_2^2 \theta^2} V' \sigma_1 \cdot \exp[-\varepsilon'(R + R_2)] \quad (11)$$

$$V_3' = 2 \frac{A\tau}{\pi R_3^2 \theta^2} V' \cdot \exp[-\varepsilon' R_3] \quad (12)$$

用(7)式与(10)式相比,得到:

$$\sigma_1 = \frac{V}{V'} \frac{V_1'}{V_1} \frac{\exp[-\varepsilon(R + R_1)]}{\exp[-\varepsilon'(R + R_1)]} \sigma_s \quad (13)$$

通过(7)式和(8)式、(10)式和(11)式可以得到更换目标前后测试场区的大气状态,分别为:

$$\varepsilon = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \frac{V_1}{V_2} \quad (14)$$

$$\varepsilon' = \frac{1}{R_2 - R_1} \ln \frac{V_1'}{V_2'} \quad (15)$$

通过(9)式和(12)式可以得到更换目标前后激光器的能量变化:

$$\frac{V}{V'} = \frac{V_3 \exp(-\varepsilon' R_3)}{V_3' \exp(-\varepsilon R_3)} \quad (16)$$

将(14)式、(15)式和(16)式代入(13)式得:

$$\sigma_1 = \frac{V_1'}{V_1} \left[\frac{V_3}{V_3'} \left(\frac{V_1 V_2'}{V_1' V_2} \right)^{\frac{R+R_1-R_3}{R_1-R_2}} \right] \times \sigma_s \quad (17)$$

(17)式即为考虑激光器能量起伏和大气状态变

化情况下待测目标的 LRCS 计算公式,其中 σ_s 为已知量, R, R_1, R_2, R_3 为设定值,需要注意的是 $R_1 \neq R_2$ 。只需通过测量得到 V_1, V_2, V_3 和 V_1', V_2', V_3' ,即可计算得到待测目标的 LRCS。与传统对比公式比较,多站测量

对比公式中增加了修正系数 $\frac{V_3}{V_3'} \left(\frac{V_1 V_2'}{V_1' V_2} \right)^{\frac{R+R_1-R_3}{R_1-R_2}}$,其可以消除测试期间激光器能量不稳定和大气状态变化对测量结果的影响,提高了 LRCS 计算准确度。

3 实验和结果分析

实验中选用 $1.06\mu\text{m}$ 激光器,束散角为 $0.5\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ 分档可调,单脉冲能量 ($5 \sim 80$) mJ 分档可调;目标选用 $1\text{m} \times 1\text{m}$ 聚四氟乙烯标准漫反射板,半球反射率为 99.3% ;激光器距离目标 200m ,探测器1、探测器2距离目标分别为 20m 和 40m ,探测器3距离激光器 40m ;考虑到背景散射对实验结果的影响,实验期间用遮光布对目标周围进行遮挡,并调整激光束散角使激光光斑能够完全覆盖目标。

实验时,如表1所示依次设置激光器的输出能量,记录不同激光能量照射时3个探测器测得的电压信号。

Table 1 Laser energy and test measurements

sample	pulse laser energy/mJ	V_1/mV	V_2/mV	V_3/mV
1	5	0.197	0.044	4.551
2	10	0.339	0.078	7.802
3	15	0.494	0.116	11.378
4	20	0.678	0.157	15.604
5	25	0.904	0.209	20.806
6	30	1.116	0.262	25.682
7	35	1.243	0.291	28.608
8	40	1.413	0.331	32.510
9	45	1.611	0.337	37.061
10	50	1.738	0.408	39.987
11	55	1.879	0.439	43.238
12	60	2.148	0.504	49.415
13	65	2.346	0.547	53.966
14	70	2.445	0.564	56.242
15	75	2.671	0.624	61.443
16	80	2.968	0.690	68.271

表1中为实验获取的测量数据,依次将16组数据中的某一组测量数据作为基准数据,与其它15组实验数据进行比对,利用传统单站对比公式和(17)式两种计算方法得到标准漫反射板的 LRCS 测量值,并计算其与标准漫反射板 LRCS 理论值的相对误差,统计得到 LRCS 测量值相对误差随激光器能量波动的变化情况,两种方法计算 LRCS 的对比结果见图4。

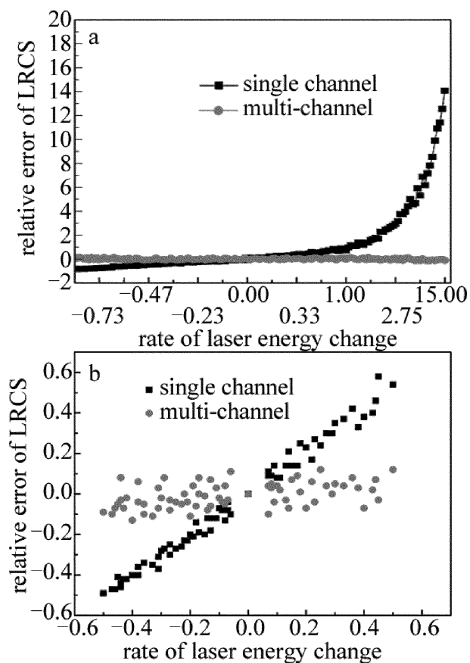


Fig. 4 Comparison of relative error of two LRCS calculation methods

图 4a 中, 黑色曲线表示传统单站对比法得到的 LRCS 相对误差, 浅色曲线表示多站对比法得到的 LRCS 相对误差。从统计结果可以看出, 由于整个测试过程中改变了激光器输出能量, 加上大气传输的影响, 照射在标准漫反射板上的激光能量变化范围为 $-94\% \sim 1500\%$, 采用传统的单站对比法得到的标准漫反射板 LRCS 相对误差为 $-93\% \sim 1407\%$, 且激光器输出能量变化越大, 测量误差越高; 而本文中设计的多站对比测量法得到的 LRCS 相对误差为 $-14\% \sim 17\%$ 。图 4b 是图 4a 的局部放大图, 从图 4b 可以更加直观地看出, 多站对比测量法与传统方法相比, 测量准确度得到明显提高, 且测量结果相对稳定, 基本不受激光器能量变化的影响, 有效地避免了激光器输出能量不稳定以及大气传输带来的测量误差。

4 结 论

通过分析 LRCS 比较测量法的原理, 分析了常用的单站对比公式存在的问题和误差产生的原因, 针对

其易受测量激光能量起伏、大气状态等因素影响的缺点, 对单站对比测量法进行了改进, 设计了一种多站对比测量方法, 并推导出新的 LRCS 对比公式。实验结果表明, 本文中设计的多站对比测量方法科学可行, 采用多站对比公式计算的 LRCS 值准确度高, 可以有效减小或消除测量过程中激光能量和大气状态的不稳定带来的测量误差, 该方法可以应用于对各类目标的 LRCS 测量中。

参 考 文 献

- [1] XU G X. The optical properties of targets and environment [M]. Beijing: China Aeronautic Publishing House, 1995: 280-290 (in Chinese).
- [2] HE Zh C. Optical measurement system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 95-110 (in Chinese).
- [3] WANG M J, DONG Y B, WU Zh S, *et al.* Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction [J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(5): 549-552 (in Chinese).
- [4] ZHANG H L, WU Zh S. Measurement and analysis for laser scattering characteristic of target [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(5): 973-976 (in Chinese).
- [5] ZHANG H W, XUE J G. Research on laser scattering measurement characteristics for large target [J]. Electro-Optic Technology Application, 2007, 22(3): 49-51 (in Chinese).
- [6] WANG M J, WU Zh S. Modeling and measuring the pulse laser scattering echo power from whole dimension target [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(11): 1557-1560 (in Chinese).
- [7] BAO X Zh, GAO W. Influence of background scattering on measurement accuracy of laser radar cross section [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 590-594 (in Chinese).
- [8] LI L Ch, WU Zh S, DENG R. Comparison of the back laser radar cross-section calculation of complex object with the measurement scale-model [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 770-772 (in Chinese).
- [9] WANG M J, WU Zh S. Computation and analysis on the laser scattering echo energy from whole dimension target under complex environment [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(1): 66-69 (in Chinese).
- [10] SUN P J, GAO W, WANG Y F. Calculation and application of laser radar cross section for targets [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(5): 597-600 (in Chinese).