

大气条件变化时的激光雷达散射截面测量方法

包学志, 高卫

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘 要:利用双光路探测研究了大气条件变化对外场目标激光雷达散射截面测量准确度的影响. 将双光路探测应用于比对测量后, 推导出了新的比对测量公式, 进行了实验验证, 并讨论了其适用条件. 通过对漫反射板激光雷达散射截面的外场实测, 结果表明: 利用新的比对测量公式, 不仅能有效减小测量过程中因大气条件变化带来的误差, 提高测量准确度, 而且计算过程较为简单; 工程上易于实现.

关键词:电子对抗; 激光雷达散射截面; 测量准确度; 大气条件; 双光路

中图分类号: TN958.98; TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2009)02-414-4

0 引言

激光雷达散射截面 (Laser Radar Cross Section, LRCS) 作为表征目标激光散射特性的重要特征量, 其外场测量准确度是一项关键指标. 通常, 对于 LRCS 的测量采用比对法^[1].

比对法不仅要求相同的激光束散角、激光发射功率、探测距离、接收视场、发射、接收方位角等, 还要求相同的大气条件 (主要指衰减系数). 测量所用激光波长一般为 $1.06\mu\text{m}$, 该波长的激光在大气传输中的衰减主要来自于大气气溶胶的散射, 而大气分子的吸收、分子的散射等因素则可忽略, 衰减系数与气溶胶粒子的尺寸分布有很大关系, 且受温度、湿度、能见度及气压等随机变化的环境参量的影响较大^[2], 易随大气条件变化而变化. 而在 LRCS 外场测量中, 由于测量标准板与待测目标总有一定的时间间隔, 很难保证大气条件的稳定性, 一旦条件变化, 激光信号的衰减则会不同, 由此将给 LRCS 比对测量带来一定的误差. 即使天气条件较好时, 若单纯应用比对法, 即使保证入射与探测条件相同, 每次测量得到的 LRCS 测量准确度也都不相同, 甚至有时还有较大差距, 这说明, 大气条件的变化是影响 LRCS 测量准确度的重要因素, 必须采用合理的方法加以校正.

双光路探测^[3]是目前比较常见的一种校正方法, 能够改善因大气条件变化给测量准确度带来的影响. 采用双光路探测法来确定各个测量时刻的大气衰减系数和激光器输出能量, 然后再与方向-半球反射率已知的标准靶板比较, 计算得到待测目标的 LRCS, 双光路探测方法已得到广泛的应用. 本文将

双光路探测应用于比对测量后, 推导出了新的比对测量公式, 进行了实验验证, 并指出了它应用的条件. 应用新的公式测量 LRCS, 不仅能够有效减小因大气条件变化给测量准确度带来的影响, 而且计算过程较为简单, 工程上易于实现, 具有一定的实际应用价值.

1 测量方法及测量公式

LRCS 测量系统一般由激光发射系统、散射光探测系统以及相应的测量控制与信息处理系统组成. 测量时, 激光发射系统瞄准目标以一定频率发射激光脉冲, 目标散射后, 位于远场区域的散射光探测系统以同样的频率对散射光脉冲信号进行采集并处理, 提取出信号的峰值电压. 依据测量方程^[4-5]并考虑大气对激光传输的影响, 散射光信号峰值电压为

$$U_{s \max} = R_d \eta_d A_d I_{s \max} = \frac{R_d \eta_d A_d I_{i \max}}{\pi R^2} T \sigma \quad (1)$$

式中, R_d 为探测响应率, η_d 为散射光探测系统光学效率, A_d 为探测系统接收孔径的面积, $I_{i \max}$ 为入射到目标上的峰值光功率密度, σ 为目标的 LRCS, T 为目标到散射光探测系统距离上的激光大气透过率, R 为目标到探测系统的距离, $I_{s \max} = T \frac{I_{i \max} \sigma}{\pi R^2}$ 为探测系统处的散射光峰值功率密度.

设激光器输出峰值功率为 P_{\max} , 发射系统光学效率为 η_e , 发射光束散角为 ω_e , 发射系统到目标的距离为 R' , 到目标距离上的激光大气透过率为 T' , 则式(1)中, 入射到目标上的峰值光功率密度为

$$I_{i \max} = \frac{P_{\max} \eta_e T'}{\omega_e R'^2} \quad (2)$$

结合式(1), 散射光信号峰值电压可进一步表示为

$$U_{s \max} = \frac{R_d \eta_d A_d P_{\max} \eta_e T' T \sigma}{\pi \omega_e R'^2 R^2} \quad (3)$$

对于一定波长的激光,根据比尔定律,大气透过率可以表示为 $T=e^{-\alpha R}$, α 为激光在大气传输路径上的平均衰减系数,由激光波长和大气条件所决定.一般来说,大气参量(浓度及平均粒径)的瞬时值存在有限的波动,而与之相应的平均值的幅度变化很慢,短时间内趋于稳定的数值^[3].因此,在测量标准板或待测目标峰值电压时,如果采集数据时间很短(一般为几十秒),则平均衰减系数可认为是常量,式(3)可变为

$$U_{s \max} = \frac{R_d \eta_d A_d P_{\max} \eta_t}{\pi \omega_t R'^2 R^2} e^{-\alpha(R+R')} \sigma \quad (4)$$

对于 1.06 μm 波长激光,激光传输受气溶胶散射的影响较大,气溶胶对激光的衰减与气溶胶含量有关.通常近地层大气密度场是一个始终处于缓慢变化的随机场,因此,测量区域内的大气衰减系数尽管短时间内可认为是常量,但在一个较长的时间内应是一个不平稳的缓变量.而在利用比对法测量时,由于更换目标需要较长时间(几分钟),这很有可能导致在测量待测目标和标准板时,激光传输路径上的大气衰减系数不同,即测量方程中的大气透过率不同,因此依据式(4),不能再简单利用原比对公式计算 LRCS,必须考虑大气衰减系数的变化,重新推导比对公式为

$$\sigma_s = \sigma_s' \frac{U_{s \max} e^{-\alpha'(R+R')}}{U_{s' \max} e^{-\alpha(R+R')}} \quad (5)$$

式中, α 为测量待测目标时的大气衰减系数, α' 为测量标准板时的大气衰减系数.根据式(5),要准确得到待测目标的 LRCS 必须计算出等式右端的比对校正因子.为此,可考虑在比对测量的基础上结合双光路探测以确定比对校正因子.

双光路探测就是在测量每个目标的探测信号电压时,在不同的激光传输路径上,设置两个探测点,同时接收来自目标的散射光信号,如图 1.

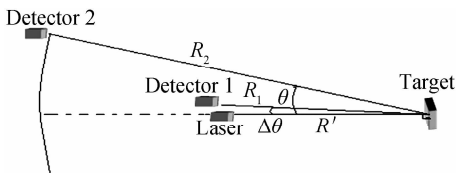


图 1 双光路探测

Fig. 1 Sketch map of two-channel detection

发射激光正向垂直入射目标,发射系统到目标的距离为 R' ;探测器 1 的接收角 $\Delta\theta \approx 0$,为单站接收^[4],到目标的距离为 R_1 ,且 $R_1 = R'$;探测器 2 采用双站接收,接收角为 θ ,到目标的距离为 R_2 .

一般情况下,由于地表大气受到地球引力场和地面背景辐射的作用,其温度、湿度等都具有垂直梯度分布^[6],是高度的函数,而在外场测量中,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 R_1 和 R_2 之间距离相差不是太大,可认为在极短的时间内两探测光路上的大气衰减系数相同,激光在两条光路上衰减的不同只和探测距离有关.另一方面,对于 1.06 μm 波长的激光,一般常见的目标表面可近似看作是朗伯面,其 LRCS 的计算公式^[7]为

$$\sigma = \rho \cos \theta_r \int_{s_i} \cos \theta_i ds_i \quad (6)$$

式中, ρ 为目标的方向-半球反射率, s_i 为目标被激光照明的面积, θ_i 为激光入射到目标表面的小面元 ds_i 上的入射角, θ_r 为探测器的接收角.根据式(6),在理想情况下,朗伯面目标的 LRCS 随接收角的变化呈余弦分布.将式(6)代入式(4)可分别得到测量待测目标时光路 1 和光路 2 的信号峰值电压为

$$U_{s \max 1} = \frac{R_d \eta_d A_d P_{\max} \eta_t \rho_s \cos \Delta\theta \int_{s_i} \cos \theta_i ds_i}{\pi \omega_t R'^2 R_1^2} e^{-\alpha(R_1+R')} \quad (7)$$

$$U_{s \max 2} = \frac{R_d \eta_d A_d P_{\max} \eta_t \rho_s \cos \theta \int_{s_i} \cos \theta_i ds_i}{\pi \omega_t R' R_2^2} e^{-\alpha(R_2+R')} \quad (8)$$

式中, ρ_s 为待测目标的方向-半球反射率, s_i 为其照明面积.将以上两式相比,可得到

$$e^{-\alpha(R_2-R_1)} = \frac{U_{s \max 2} \cos \Delta\theta R_2^2}{U_{s \max 1} \cos \theta R_1^2} \quad (9)$$

保持光路及入射与探测条件不变,将待测目标更换为标准板,同理可得到

$$e^{-\alpha'(R_2-R_1)} = \frac{U_{s' \max 2} \cos \Delta\theta R_2^2}{U_{s' \max 1} \cos \theta R_1^2} \quad (10)$$

式(10)中, $U_{s' \max 1}$ 、 $U_{s' \max 2}$ 为测量标准板时,光路 1 和光路 2 所对应的探测信号峰值电压.不妨令 $R_2 = kR_1$, $R_1 = R'$, k 为实数,且 $k \neq 1$,将式(10)和(9)相比,则有

$$\frac{e^{-\alpha'(k-1)R_1}}{e^{-\alpha(k-1)R_1}} = \frac{U_{s' \max 2} U_{s \max 1}}{U_{s' \max 1} U_{s \max 2}} \quad (11)$$

结合式(11)和(5)可得到探测距离为 R_2 ,双站接收时的比对校正因子为

$$\frac{e^{-\alpha'(R_2+R')}}{e^{-\alpha(R_2+R')}} = \left(\frac{U_{s' \max 2} U_{s \max 1}}{U_{s' \max 1} U_{s \max 2}} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \quad (12)$$

同理,探测距离为 R_1 ,单站接收时的比对校正因子为

$$\frac{e^{-\alpha'(R_1+R')}}{e^{-\alpha(R_1+R')}} = \left(\frac{U_{s' \max 2} U_{s \max 1}}{U_{s' \max 1} U_{s \max 2}} \right)^{\frac{2}{k-1}} \quad (13)$$

利用两次测量得到的峰值电压及相关已知量,并根据比对校正因子及式(5)可最终求得双站接收时的待测目标 LRCS 为

$$\sigma_s' = \sigma_s' \left(\frac{U_{s \max 1}}{U_{s' \max 1}} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{U_{s' \max 2}}{U_{s \max 2}} \right)^{\frac{2}{k-1}} \quad (14)$$

单站接收时的待测目标 LRCS 为

$$\sigma_s = \sigma'_s \left(\frac{U_{s \max 1}}{U'_{s \max 1}} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left(\frac{U'_{s \max 2}}{U_{s \max 2}} \right)^{\frac{2}{k-1}} \quad (15)$$

若两次测量过程中,均取 $R_2 = 2R_1 = 2R'$,则双站接收的比对校正因子可进一步简化为

$$\frac{e^{-a'(R_2+R')}}{e^{-a(R_2+R')}} = \left(\frac{U'_{s \max 2} U_{s \max 1}}{U'_{s \max 1} U_{s \max 2}} \right)^3 \quad (16)$$

由此可求出双站接收时的 LRCS 为

$$\sigma'_s = \sigma'_s \left(\frac{U_{s \max 1}}{U'_{s \max 1}} \right)^3 \left(\frac{U'_{s \max 2}}{U_{s \max 2}} \right)^2 \quad (17)$$

同理可求出在单站接收时的比对校正因子为

$$\frac{e^{-a'(R_1+R')}}{e^{-a(R_1+R')}} = \left(\frac{U'_{s \max 2} U_{s \max 1}}{U'_{s \max 1} U_{s \max 2}} \right)^2 \quad (18)$$

单站接收时的 LRCS 为

$$\sigma_s = \sigma'_s \left(\frac{U_{s \max 1}}{U'_{s \max 1}} \right)^3 \left(\frac{U'_{s \max 2}}{U_{s \max 2}} \right)^2 \quad (19)$$

以上各式中的 σ_s 、 σ'_s 分别为单、双站时标准板的 LRCS 理论值。根据式(17)和(19),当双站探测距离为单站探测距离的 2 倍时,只要保证两次测量时的入射、探测条件不变,则可根据测量得到的单、双站峰值电压直接求出待测目标的 LRCS,计算过程较为简单。

另外,由式(14)和(15)也可得出双、单站待测目标的 LRCS 测量值之比为

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{\cos \theta}{\cos \Delta \theta} \approx \cos \theta \quad (20)$$

从式(20)可看出,利用重新推导的比对测量公式得到的朗伯面目标的 LRCS 随接收方位角的变化恰好是余弦分布,与理论计算公式(6)得到的余弦分布结论完全吻合,而如果利用原比对测量公式,由于测量中大气条件发生变化,公式中的探测信号电压必然变化,得到的 LRCS 角度分布特性不可能符合余弦分布。从这一角度也反映出将双光路探测应用于比对测量后,新的比对测量公式得到的目标 LRCS 比原公式得到的结果更为准确。

2 外场实验验证

利用前面推导的比对公式(17)和(19),对一朗伯漫反射板的 LRCS 进行了测量实验,基本测试条件如下:

激光波长 $1.06 \mu\text{m}$,脉冲宽度 18 ns 左右,重频 1 Hz ,基模高斯光束,激光器功率稳定性低于 1% ;测量距离:单站 50 m ,双站 100 m ,双站接收角为 11.478° ;标准漫反射板面积 $1 \times 1 \text{ m}^2$,方向-半球反射率 0.951 ,待测漫反射板面积 $1 \times 1 \text{ m}^2$,方向-半球反射率 0.993 ;按单站测量距离和目标尺寸计算,发射光束散角和接收视场应不小于 28.2 mrad (实验

中给出的角度数据均为平面角数据);考虑到背景散射对测量准确度的影响,在目标周围敷设了低反射率的消光材料用于遮蔽背景(方向-反射率为标准漫反射板的 $1/73$)。

2.1 实验过程

将激光发射系统和两套散射光探测系统按图 1 布设在目标远场区域中指定的位置,激光发射系统瞄准待测板中心,正向垂直发射激光脉冲,同时两探测系统分别探测来自远场目标的激光散射信号,经信号处理后,各得到一组信号的峰值电压,分别计算出每组峰值电压的平均值 $U_{s \max 1}$ 、 $U_{s \max 2}$ 。快速取下待测板,换上标准漫反射板,保持所有测试条件不变,测量标准漫反射板,得到每组峰值电压的平均值 $U'_{s \max 1}$ 、 $U'_{s \max 2}$ 。测量数据如表 1。

表 1 测量数据

目标	站型	峰值电压 N	回波幅宽/ns	视场 /mrad	发散角 /mrad	光照面积 / m^2
标准反射板 (0.951)	单站	1.86	18.47	30	30	1×1
	双站	0.862	18.76	30×50	30	1×1
待测反射板 (0.993)	单站	2.188	18.63	30	30	1×1
	双站	1.063	19.13	30×50	30	1×1

2.2 数据处理

按 LRCS 的计算公式(6)分别计算出待测板 LRCS 的理论值为:单站 $\sigma = 0.993 \text{ m}^2$,双站 $\sigma' = 0.973 \text{ m}^2$;标准板 LRCS 的理论值为:单站 $\sigma_s = 0.951 \text{ m}^2$,双站 $\sigma'_s = 0.932 \text{ m}^2$ 。

根据表中数据,按原比对公式得出待测板 LRCS 的测量值为:单站 $\sigma_s = 1.119 \text{ m}^2$,双站 $\sigma'_s = 1.15 \text{ m}^2$;测量准确度为:单站 $\eta = 12.7\%$,双站 $\eta' = 18.2\%$;双、单站 LRCS 测量值之比为: $\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = 1.03 > \cos(11.478^\circ)$ 。

按校正后的比对公式(17)和(19)得出待测板 LRCS 的测量值为:单站 $\sigma_s = 1.018 \text{ m}^2$,双站 $\sigma'_s = 0.998 \text{ m}^2$;测量准确度为:单站 $\eta = 2.5\%$,双站 $\eta' = 2.6\%$;双、单站 LRCS 测量值之比为: $\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = 0.98 \approx \cos(11.478^\circ)$ 。

2.3 实验结果分析

1)由于两漫反射板尺寸相同,探测信号电压与漫反射板的方向-半球反射率应成正比关系,但从实验数据看,无论是单站还是双站,两漫反射板的平均峰值电压都不符合以上关系,而且相差较远;

2)两漫反射板尺寸相同,测量条件相同,系统具有很高的功率稳定性,而且测量中还采用了消光材料,因此由背景、光束非均匀、输出功率稳定性等因素带来的误差应该很小,但应用原比对公式计算出

的 LRCS 的误差却很大。

根据以上两点分析,可断定是由于测量过程中,更换待测板与标准板的时间过长,在此期间的大气衰减发生了变化,导致较大的测量误差。

利用校正后的比对测量公式计算待测板的 LRCS,测量准确度大大提高,而且对于单、双站的 LRCS 值符合余弦分布。实验结果验证了该公式的正确性。

3 结论

本文将双光路探测方案应用于目标 LRCS 的比对测量后,推导出了新的比对测量公式,经实验验证,不仅能够有效减小因大气条件变化给测量准确度带来的影响,而且计算过程较为简单,工程上易于实现。但值得说明的是,此公式要求在测量区域内,环境参量如温度、湿度、能见度、气压等相同,且地表植被分布及土壤特征尽可能相同。公式的推导都是基于朗伯面目标的,而对于像某些特殊的目标如镜面反射目标、猫眼目标,当激光正向垂直入射时,LRCS 有较强的后向相干分量(是正向入射时的 δ 函数)^[8],公式不再适用。但大多数情况下,一般常见目标均可近似视为朗伯面目标,因此只要能够选择合适的测量场地,就可采用此公式对目标 LRCS 进行测量。

参考文献

- [1] ZHANG Heng-wei, XUE Jian-guo. Research on laser scattering measurement characteristics for large target [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, **22**(3):49-51.

- 张恒伟,薛建国.大目标激光散射特性测量研究[J].光电技术应用,2007,**22**(3):49-51.
- [2] XIONG Hui-feng. Laser radar [M]. Beijing: China Aeronautic Publishing House, 1992:11-12.
- 熊辉峰.激光雷达[M].北京:宇航出版社,1992:11-12.
- [3] LIU Ke-xiang, Xu Rong-guo. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(2):206-212.
- 刘科祥,徐荣国.外场目标激光散射特性测量及分析[J].中国激光,2006,**33**(2):206-212.
- [4] GAO Wei. Applications of laser radar cross section in the design and evaluation of laser measure systems [J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2004, **19**(6):752-756.
- 高卫.激光雷达截面在系统设计评价中的应用分析[J].电波科学学报,2004,**19**(6):752-756.
- [5] YI Xiang, WANG Wei-ran. Numerical simulation for lidar system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):21-23.
- 易翔,王蔚然.激光雷达系统的数值仿真[J].光子学报,2004,**33**(1):21-23.
- [6] JIANG Li-long. Analysis for the variation characteristics of the atmospheric refraction coefficient in lowest troposphere [J]. *Northeast Surveying and Mapping*, 1999, **32**(1):3-5.
- 蒋利龙.近地层大气折光系数变化特征分析[J].东北测绘,1999,**32**(1):3-5.
- [7] XU Gen-xing. The optical properties of targets and environment [M]. Beijing: China Aeronautic Publishing House, 1995:281-287.
- 徐根兴.目标和环境的光学特性[M].北京:宇航出版社,1995:286-287.
- [8] DAI Li-hong, Li tie. Research on correlative quantity of taper laser radar cross section [J]. *Journal of Detection & Control*, 2002, **24**(1):14-19.
- 戴黎红,李铁.圆锥激光雷达散射截面相干分量的理论研究[J].探测与控制学报,2002,**24**(1):14-19.

Method of Laser Radar Cross Section Measuring with Atmosphere Condition Changing

BAO Xue-zhi, GAO Wei

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Received date: 2007-07-09

Abstract: Using two-channel detection, influences on laser radar cross section measure accuracy caused by atmosphere condition changing were studied. The new formula of comparing measure was deduced. An experiment was carried out on the new formula, and its using qualification was discussed. Through measuring the diffuse reflection board's LRCS in the outfield, the result indicates that the new formula can correct the measure error because of the atmosphere condition changing and help to improve measure accuracy, and its calculation is very brief and carried out easily.

Key words: Electronic countermeasure; Laser radar cross section; Measure accuracy; Atmosphere condition; Two-channel



BAO Xue-zhi was born in 1980. He is working for his M. S. degree at Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, and his research interests focus on electro-optical engineering, electronic countermeasures, etc.