

doi: 10.3788/gzxb20134202.0224

飞机激光雷达散射截面测量与分析

杨廷梧¹, 曾晓东², 王浩¹

(1 中国飞行试验研究院, 西安 710089)

(2 西安电子科技大学, 西安 710071)

摘要: 飞机激光雷达散射截面的测量, 对于研究飞机激光散射特性以及评估探测系统至关重要. 本文介绍了飞机激光雷达散射截面测量理论, 设计了飞机激光雷达散射截面测量装置和测量方法, 并通过实验验证了该装置与测量方法. 在全尺寸真实飞机试验与测量过程中, 通过对原始数据高斯补偿与背景修正, 获得了误差小于 7% 的飞机激光雷达散射截面数据. 实验结果表明, 本文提出的飞机激光雷达散射截面测量与分析方法是正确的和有效的.

关键词: 激光雷达散射截面; 全尺寸飞机; 目标特性; 激光测量系统

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)02-0224-4

Measurement and Analysis of Aircraft LRCS in Outfield Test

YANG Ting-wu¹, ZENG Xiao-dong², WANG Hao¹

(1 Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

(2 Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The measurement of aircraft LRCS is of crucial importance for the detection system evaluation and the characteristic research of the laser scattering from aircraft. A brief introduction of the measuring theory of the laser scattering from the target is presented in this paper. By analyzing the measuring condition in outfield test, the laser systems and test steps are designed for full size aircraft LRCS and verified by the experiment in laboratory. The processing data error 7% below is obtained of the laser radar cross section by using Gaussian compensation and elimination of sky background for original test data. The of measurement and analysis proves that the proposed method is effective and correct to get laser radar cross section data in outfield test.

Key words: Laser radar (scattering) cross section; Full size aircraft; Target characteristic; Laser measurement system

0 引言

目标激光雷达散射截面 (Laser Radar (scattering) Cross-Section, LRCS) 及双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distributional Function, BRDF) 是目标激光散射特性研究的重要内容之一. 1980 年, 美国亚利桑那州立大学 E. O. Bartell 等人介绍了双向反射分布函数的概念, 从定义法和参考试样法两个角度论述了双向反射分布函数定量测量原理, 给出了测量数学表达式, 描述了测

量中实际样品的尺寸、实测光束的大小、接收探测器的视场等方面应注意的问题, 为目标激光雷达散射截面及双向反射分布函数的研究奠定了良好的理论基础. 王安祥等^[1]利用测量双向反射分布函数计算目标激光雷达散射截面, 孙鹏举等^[2-3]介绍了目标激光雷达散射截面的计算方法与应用, 刘科祥等^[4-5]在目标激光雷达散射截面外场测量方面做了有益的探索.

飞机的激光雷达散射截面外场测量与分析方法研究, 对于武器系统设计与飞机隐身都具有重要意

基金项目: 国防基础科研项目 (No. B0520060804) 资助

第一作者: 杨廷梧 (1960—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为航空飞行试验与测量技术. Email: ytingwu@sina.cn

收稿日期: 2012-07-30; 录用日期: 2012-11-19

义. 本文探讨了全尺寸飞机外场测量方法, 从激光雷达散射截面基本理论出发, 介绍了 LRCS 测量方法与测量系统集成, 并对方案的可行性进行了实验室验证和外场验证. 最后对全尺寸飞机进行了真实测量, 通过对原始测量数据进行处理与分析, 得到了高准确度的有效数据.

1 测量模型

激光雷达散射截面 σ 是指当目标在接收器上产生的光功率等于一个完全反射的球体在接收器上产生的光功率时, 所对应的球体几何投影面积, 其计算公式为^[6]

$$\sigma = 4\pi \lim_{L \rightarrow \infty} L^2 \left| \frac{E_s(\theta, \varphi)}{E_i(\theta, \varphi)} \right|^2 \quad (1)$$

式中, E_s 和 E_i 分别为接收探测器处和照射目标处的电场强度, L 是目标距离, θ 和 φ 分别表示俯仰角和方位角. 可以看出 LRCS 与目标材料、形状、表面粗糙度以及激光的照射方位有关. 式(1)隐含了两个基本假设: 均匀平面波照射目标、目标被照射光斑全部覆盖.

在实际应用中, 军用目标材料各异、外形复杂、表面粗糙程度不同, 目标 LRCS 的定量计算十分复杂^[7], 而且需要目标特性的先验知识. 因此, 获取目标 LRCS 另外一个主要方法是进行外场测量.

2 测量方法

2.1 测量目标

采用全尺寸真实飞机在外场进行测量.

2.2 测量原理

本测量采用比较测量法, 利用已知激光雷达散射截面的标准板作为参考与目标进行激光散射截面的比较测量. 先将测量装置对准标准板, 测得标准板的激光散射信号电压幅值 U_d . 然后, 保持相同的条件, 对全尺寸飞机进行测量, 测得目标反射电压信号幅值 U_s , 由式(2)计算目标激光散射截面.

$$\sigma_s = \frac{U_s}{U_d} \sigma_d \quad (2)$$

式中: σ_s 为被测目标激光散射截面(单位 m^2); U_s 为被测目标激光散射强度电压信号(单位 V); U_d 为标准板激光散射强度电压信号(单位 V); σ_d 为标准板激光散射截面(单位 m^2).

按照目标激光雷达散射截面测量要求, 将激光测量系统稳定安装在机场跑道指定位置, 同样将飞机按要求停放在机场跑道. 通过逐步改变飞机水平方位角, 对飞机激光后向散射光能量进行测量, 如图 1.

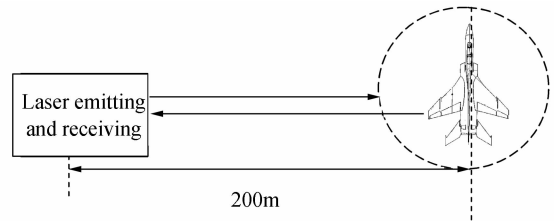


图 1 测量原理示意图

Fig. 1 Principle of laser measurement for aircraft

2.3 测量流程

首先选定试验作业区域(要求开阔、无遮挡), 标定区域中心位置, 并以目标中心和测量系统连线为基准, 顺时针每隔 30° 做出标记. 测量时以飞机纵轴线头部对准发射系统, 设为 0° , 顺时针旋转飞机至尾部对准测量系统时为 180° . 在中心位置放置标准板, 并使其法线在 0° 方向, 测量回波信号. 将飞机拖至中心位置在 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$ 分别测量其回波信号.

3 测量系统组成

激光发射系统利用光学扩束及调整装置使激光照射目标, 由光学接收系统收集目标回波信号, 并由信号处理系统进行处理. 测量系统的结构框图如图 2.

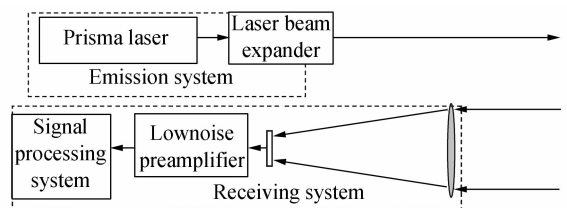
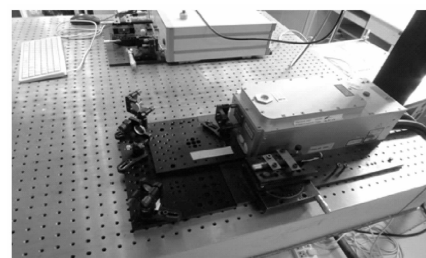


图 2 测量系统结构框图

Fig. 2 Composition of laser measurement system

系统组成: 1) Prisma 1064-8-V 激光器(图 3);



(a) Laser and optical device

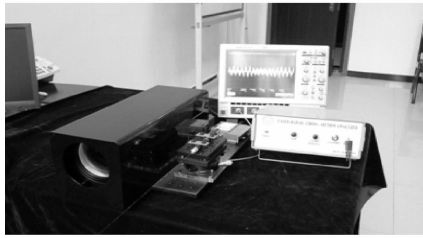


(b) Prisma laser host

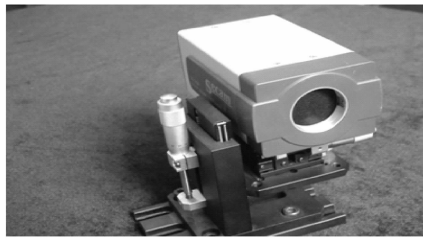
图 3 激光发射系统

Fig. 3 Laser emitting installation

2)发射光学系统;3)光学目标指示器;4)光学接收系统(图4);5)Le Cray Wave Surfer 44×s示波器;6)信号放大器.



(a) Optical receiver



(b) Laser echo detector

图4 光学接收系统
Fig. 4 Optical receiver

4 试验与测量

4.1 实验室验证

由于现有激光器功率的限制,探测距离选择200 m,飞机约20 m,在这种情况下目标已不能看成点目标,而是作为扩展目标.为了收集更多的散射光能量,必须选择大孔径光学接收系统.在本次试验中,实际使用的光学系统焦距为400 mm、直径为 $\Phi=38$ mm的大光敏探测器.

目标距离为200 m,激光发射功率为8 W,目标对激光的吸收系数为80%,假定不计大气传输损耗和光学系统的耦合效率,则探测器所能接收到的光功率为

$$P_r = \frac{R}{8} \left(\frac{d}{L} \right)^2 P_0 \quad (3)$$

式中, R 为目标对激光的反射系数.

在接收系统中,使用了大孔径光学系统 $\phi=100$ mm=0.1 m,在这种情况下光学系统能够探测的信号功率为

$$P_r = \frac{0.2}{8} \left(\frac{0.1}{200} \right)^2 \times 8 = 5.0 \times 10^{-8} \quad (4)$$

由于传输及光学系统等各种损耗,实际接收的光功率只有nW级,属于微弱光信号探测.为此,研制了高阻抗低噪音前置放大器.

为了验证方案的可行性,在实际测量之前进行了试验.用 $P_0=100$ mW的激光发射功率,照射 $L=80$ m处的粗糙墙面,探测到的回波信号有比较好的信噪比.如果按照实际测量距离 $L_1=200$ m,飞机截

面积占光斑面积的比例 $k=10\%$ 计算,则外场测量时对激光发射功率的要求可估计为6.25 W(式(5)),实际使用的Prisma激光器输出功率8 W,可以满足实际测量的要求.

$$P_1 = \left(\frac{L_1}{L} \right)^2 \frac{1}{k} P_0 = \left(\frac{200}{80} \right)^2 \frac{1}{0.1} 0.1 = 6.25 \quad (5)$$

4.2 外场测量

4.2.1 光束整形

外场测量时,测量仪器平台放置在减震平台上,激光器距离地面的高度为2.1 m. LRCS测量要求激光光斑完全覆盖目标,采用上述系统照射目标时,必然有一部分光照射到地面,经飞机反射后散射回探测系统.

为了消除地面反射和散射造成的误差,使用光阑遮挡的方式,减少了二次散射.由于激光器的波长为 $1.06 \mu\text{m}$,属于人眼不可见光,调整比较困难.为此,采用椭圆光斑照射方案,即在激光器输出端增加椭圆光斑整形扩束系统,使照射飞机的光斑为椭圆形.这种方案提高了激光器光源的利用率,减少了地面反射造成二次散射对测量的影响,减小了误差.

4.2.2 外场测量

由于要测量飞机不同角度的LRCS,测量时间较长,因此在测量过程中阳光照射能量变化比较大.为了消除背景光及系统噪音对测量结果的影响,在试验开始前和结束时均测量背景信号,中间时段的背景信号利用线性拟合给出,以减少背景影响.

5 数据处理及分析

数据处理主要包括原始信号的背景扣除和对椭圆光束的高斯补偿.

5.1 背景扣除

测量数据显示测量开始和结束(间隔1 h)的背景信号变化较大,各测量点的背景大小需要估计,利用两次测量结果做线性拟合,给出各测量点的背景数据,拟合多项式为式(6).

$$P_b(t) = 0.1044t + 25.3333 \quad (6)$$

式中, σ_s 按 U_s/U_d 得出,单位是标准板的截面 σ_d ,标准板信号由测量数据扣除背景得到 $U_d=23.83$.

5.2 高斯补偿

LRCS计算的前提是均匀照射目标,但在实际测量时照射光斑并不是均匀分布,因此需对结果进行修正.

激光器输出光斑为高斯分布.假设经过整形的激光光斑为椭圆形高斯分布,为了方便,先考虑一维情况.设高斯分布为式(7),高斯分布的光斑强度如图5.

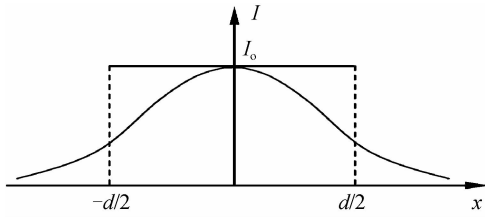


图5 光斑的强度分布图

Fig. 5 Light spot strength distribution

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2}\right) \quad (7)$$

式中, ω 为光斑半径.

如果目标尺寸 $d = k\omega$, 则均匀照射的光功率为

$$P_u = I_0 d = I_0 k\omega \quad (8)$$

而高斯光斑照射的功率为

$$P_G = I_0 \int_{-d/2}^{d/2} \exp\left(-\frac{x^2}{\omega^2}\right) dx = 2\sqrt{\pi}\omega I_0 \left[\Phi\left(\frac{k}{\sqrt{2}}\right) - 0.5 \right] \quad (9)$$

式中 $\Phi(x)$ 是正态分布函数. 高斯光斑照射与均匀照射相差的比例因子为

$$A = \frac{P_u}{P_G} = \frac{k}{2\sqrt{\pi} \left[\Phi\left(\frac{k}{\sqrt{2}}\right) - 0.5 \right]} \quad (10)$$

式中比例因子 A 随 k 的变化而变化. 当 $k=1$ 时, $A=1.08$; 当 $k=1.5$ 时, $A=1.19$; 当 $k=2$ 时, $A=1.37$.

一般测量时, 要求光斑完全覆盖目标, k 值不应超过 2, 这是一维的情形. 对于二维的实际目标, A 因子应取平方. 在本测量中, k 大约为 2, 此时 $A=1.37$, 需对测量数据加以补偿. 由于标准版尺寸不大, 可以认为均匀照射, 无需补偿. 因此应对测量结果乘以 1.372, 其中拟合曲线为三次曲线, 由最小二乘法规则确定为

$$y = 0.000001032x^3 - 0.0003568x^2 + 0.0276986x + 0.62373292 \quad (11)$$

5.3 测量结果分析

在实验室研究中发现, 目标的表面材料、粗糙程度以及轮廓形状对后向散射影响很大. 在不同角度对飞机照射时, 飞机的轮廓形状起伏是不同的. 飞机的形状大致为后掠形, 由于机头方向为进气道, 机尾方向为发动机喷口, 均为腔体式结构. 当激光照射机头和机尾时, 激光的回波特性比较弱, 即飞机从 0° 向 90° 旋转时, 飞机表面的起伏逐渐变化; 到 90° 时, 飞机可近似的看作为管状结构, 均为大面积的光滑曲面, 导致该角度下的激光回波并不是最大.

试验中, 因条件限制没有进行多次重复测量, 因此无法用统计方法分析误差. 由于飞机 LRCS 测量采用了比较测量法原理, 其 LRCS 的测量误差为

$$\Delta\sigma_s = \frac{\sigma_d}{U_d} \Delta U_s + \frac{U_s}{U_d} \Delta\sigma_d + \frac{U_s \sigma_d}{U_d^2} \Delta U_d \quad (12)$$

于是可以算出 LRCS 测量的相对误差为

$$\epsilon_{\sigma_s} = \frac{\Delta\sigma_s}{\sigma_s} = \frac{\Delta U_s}{U_s} + \frac{\Delta U_d}{U_d} + \frac{\Delta\sigma_d}{\sigma_d} = \epsilon_{us} + \epsilon_{ud} + \epsilon_{\sigma_d} \quad (13)$$

式中 ϵ_{us} 、 ϵ_{ud} 、 ϵ_{σ_d} 分别为目标回波电压、标准板回波电压以及标准板 LRCS 测量的相对误差.

由于目标回波及标准版回波是用同一数字电压表记录的, 此电压表已经过校准, 其相对误差小于 1%, 如果标准版 LRCS 的测量误差限制为 5%, 则测量结果总相对误差不超过 7%.

6 结论

针对在外场进行试验与测量的环境条件, 本文从 LRCS 比较法测量原理出发, 研究了外场测量方法, 设计了满足外场条件的激光测量系统. 同时根据飞机地面试验要求, 编制了试验测量规程. 为了验证测量方案的可行性, 在实验室进行了模拟实验. 在外场试验中, 获得了某飞机正确、可信的测量数据, 能够为飞机、武器设计提供可靠的设计依据.

参考文献

- [1] WANG An-xiang, ZHANG Xiao-jun, ZHANG Han-lu, et al. Laser radar cross section obtained by the measurement of bidirectional reflectance distribution function[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(2): 63-70.
王安祥, 张晓军, 张涵璐, 等. 利用 BRDF 实验测量获取目标表面单位面积激光雷达截面[J]. 红外技术, 2008, **30**(2): 63-70.
- [2] SUN Peng-ju, GAO Wei, WANG Yue-feng, et al. Calculation and application of laser radar cross section for target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 597-600.
孙鹏举, 高卫, 汪岳峰, 等. 目标激光雷达截面的计算方法及应用研究[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(5): 597-600.
- [3] LIU Ke-xiang, XU Rong-guo, WU Zhen-sen, et al. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(2): 206-212.
刘科祥, 许荣国, 吴振森, 等. 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] POULIGUEN P, LUCAS L, MULLER F, et al. Calculation and analysis of electromagnetic scattering by helicopter rotating blades[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, **50**(10): 1396-1408.
- [5] de ADANA F S, GONZÁLEZ I, GUTIÉRREZ O, et al. Asymptotic method for analysis of RCS of arbitrary targets composed by dielectric and/or magnetic materials[J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2003, **150**(5): 375-378.