

1"级四面体组合合作目标 激光雷达散射截面实验与理论研究

谢品华 江荣熙 王亚萍 郑小兵 刘文清

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,合肥,230031)

丁小白

卫丕昌

(航空航天部三院三部) (中国科学院长春光学精密机械研究所,长春,130022)

摘要: 采用激光雷达散射截面(LRCS)测量系统,在 $1.06\mu\text{m}$ 激光波段,测量了1"级四面体角反射器俯仰角 0° 时,方位角 $\pm 50^\circ$ 范围的LRCS,并对由四面体角反射器组合而成的梯形合作目标进行了俯仰角 $0^\circ\sim 24^\circ$ 变化时,方位角 $\pm 64^\circ$ 范围的激光雷达散射截面测量,角分辨率 1° 。给出了实验曲线与数据,实验结果与理论计算较好吻合。表明合理选择角反射器组合形式,保证加工精度,可以增强反射信号,扩大光测范围,实现在恶劣条件下,雷达的远程和大角度范围跟踪。最后讨论了影响测量精度的原因。

关键词: 激光雷达散射截面(LRCS) 1"级四面体角反射器 激光合作目标

Experimental and theoretic study on laser radar cross section of the cooperative targets with 1" order corner reflectors

Xie Pinhua, Jing Rongxi, Wang Yaping, Zheng Xiaobin, Liu Wenqing

(Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Academia Sinica)

Din Xiaobai

Wei Pichang

(Ministry of Aerospace Industry) (Changchun Institute of Opt. & Fine Mech.)

Abstract: Under the radiation of $1.06\mu\text{m}$ laser beam, the Laser Radar Cross Section(LRCS) of 1" order corner reflectors have been investigated between $-50^\circ\sim 50^\circ$ azimuth angle when elevation angle is 0° , and the LRCS of the ladder-shaped cooperative targets combined with corner reflectors have been measured from $-64^\circ\sim 64^\circ$ azimuth angle as elevation angle range varying from $0^\circ\sim 24^\circ$ by using LRCS measuring system. The angular resolution is 1° . The measured data are reported. The experimental results are in agreement with the theoretical estimate. It indicates that increasing

signal intensity and expanding angle of aspect can be controlled by selecting proper combined form and ensuring accuracy of process. So laser radar tracking is realized in long distance, wide aspect angle under the bad environment. Some influences on the measurement are also discussed.

Key words: laser radar cross section 1" order corner reflectors laser cooperative targets

一、引言

随着激光雷达的应用,激光合作目标的采用具有重要意义。激光合作目标实现了在恶劣条件下,对目标的跟踪控制,了解目标的位置、距离、姿态等参数,便于对目标运动过程进行研究。广泛应用于人造卫星、月球测距、精密制导、精密跟踪等测控场合。激光合作目标雷达散射截面的研究,对于下靶场光学跟踪具有十分重要的意义。

常见的激光合作目标有角反射器、全屈光后向反射器、猫眼后向反射器、玻璃微珠反射膜等。由于加工大尺度的后向反射器十分困难,因此以上的后向反射器作用距离、光测范围均很有限。合理地组合后向反射器,是达到增大作用距离、扩展回波视场的有效方法^[1]。

本文研究 1.06 μm 激光波段,1"级四面体角反射器俯仰角 0°时,方位角 $\pm 50^\circ$ 范围的 LRCS,对由其组合成的梯型结构合作目标在俯仰角 0°~24°,测量了方位角 $\pm 64^\circ$ 范围的 LRCS,角分辨率 1°。激光合作目标在 $\pm 40^\circ$ 得到较均匀的 LRCS 值分布曲线, $\pm 64^\circ$ 范围内的 LRCS 值均在 10⁷(m²)量级。测量结果与理论计算进行了比较。结论表明合理选择制作材料、组合形式以及保证加工精度可以提高 LRCS 值,确保宽的合作目标跟踪范围。

二、激光雷达散射截面 LRCS 的定义

激光雷达散射截面(LRCS)是表征目标激光散射特性的基本物理量。由入射电磁场和散射电磁场来定义,表示目标朝某一方向散射的功率与入射到该目标表面的平面波功率之比^[2]

$$\sigma(\theta_s, \varphi_s, \theta_i, \varphi_i) = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E_s(\theta_s, \varphi_s)|^2}{|E_i(\theta_i, \varphi_i)|^2} \quad (\text{m}^2) \quad (1)$$

式中, E_i 为入射场在目标处的平均场, E_s 为散射场在接收处的平均场, θ 为极角, φ 为方位角, i 为入射方向, s 为散射方向, R 为目标距离。入射与散射几何状态见图 1。

对单站雷达而言, $\theta_i = \theta_s$, $\varphi_i = \varphi_s$ 。

实际测量可以由激光雷达方程得到^[3]:

$$\sigma = (R_s^2 R_t^2 \Omega_s \Omega_t / A_r) (P_r / P_t) \quad (2)$$

式中, P_r 为接收功率, P_t 为入射功率, A_r 为接收孔径, Ω_s 为目标散射立体角, Ω_t 为入射光束立体角, R_t 为光源到目标的距离, R_s 为目标到接收器的距离。

合作目标测量中, $A_r \geq R_s^2 \Omega_s$,即目标散射功率全部集中在很窄的散射立体角中,有效接收孔径完全截获整个散射光束,有:

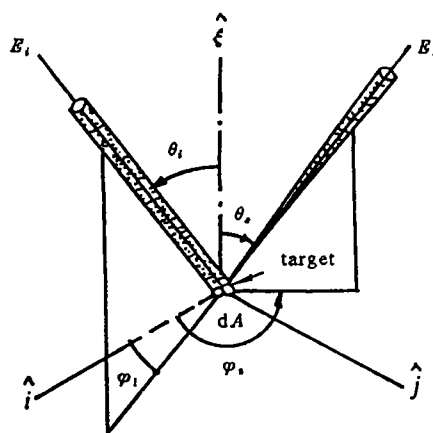


Fig. 1 LRCS geometrical parameters

$$\sigma = R^2 \Omega_i (P_i / P_r) \tag{3}$$

三、测 试 方 法

采用激光雷达散射截面测量系统进行测量。装置简图如图 2。

光源采用 1.06μm YAG 脉冲激光器, He-Ne 激光器用来准直。1.06μm 光束经过反射率 4% 的玻璃片分为二部分, 一部分作为信号光束用于辐照目标, 另一部分辐照光触发器以产生

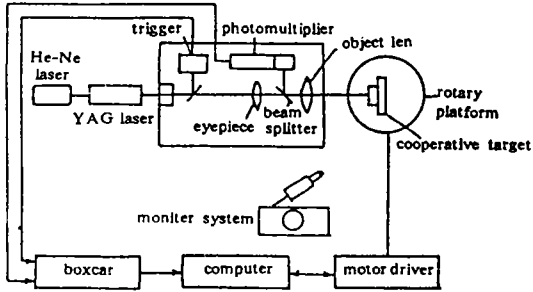


Fig. 2 Schematic diagram of LRCS set-up

触发信号来触发 Boxcar 进行数据采集。LRCS 测量必须满足 LRCS 定义的基本假设^[3], 即入射光路中目标处于光源的远场。以平面波辐照目标, 并且入射光束覆盖整个目标范围, 平面波在目标范围具有相同的相位和幅值, 即目标处于均匀光场。考虑到待测样品激光合作目标的尺寸为 165mm×63mm, 为此, 在入射光路中采用大口径望远系统对光束进行扩束至 ∅200mm, 覆盖整个目标, 激光束经过望远系统扩束后, 发散角进一步压缩, 得到的光束可视为平面波。样品距离望远物镜约 3m, 由于样品放置在平行光路中, 样品与望远物镜间的距离不再十分重要, 因此在入射光路中实现了以平面波辐照目标及入射全照明, 满足 LRCS 测量基本条件。

接收系统采用与入射系统共轴方式, 目标表面反射回来的信号光束经望远物镜会聚在其焦点上, 焦点处放置一半反半透分束片, 反射部分回波信号进入探测系统。由于所测量目标为后向反射器, 沿入射方向返回的平行光束聚焦在物镜焦点处被探测, 这时探测器与目标之间的距离不再十分重要, 均满足探测器处于目标远场的条件。探测系统由光学平均器、干涉滤光片、小孔光阑及光电倍增管组成, 从而获得整个合作目标的反射功率。通过对小孔光阑的调整, 确保探测视场与目标大小相同, 避免杂散光进入探测器。

由计算机控制步进电机带动样品旋转台旋转, 旋转面位于水平面(与方位面重合), 实现不同方位角 LRCS 的测量, 方位角为角反射器对称轴在方位面上的投影线与入射光轴的夹角 φ。样品夹持系统同时可以完成俯仰角的调整, 俯仰角为对称轴与它在方位面上投影线间的夹角 θ。样品放置的方位角与俯仰角关系见图 3。采用 CCD 摄像镜头和监视器实现对不可见 YAG 光斑的观察, 便于光路和光场调整。

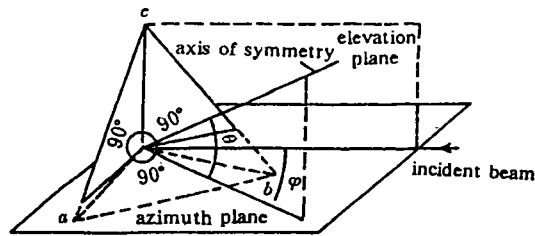


Fig. 3 Geometry of sample placement

目标处平面波的质量, 即入射光场的均匀性影响测量结果。目标在不同入射角下处于光场中不同的位置, 光场不均匀, 必然带来测量误差。为了得到理想的均匀场, 除去由于透镜质量问题产生的死条纹, 在望远系统的目镜焦点处加一针孔进行空间滤波。但是对 1.06μm YAG 激光束这样很困难, YAG 光功率强, 针孔将被烧坏变形, 考虑到实际外场情况下, 由于大气的影

也许更接近于实际外场使用情况。

采用 EG & G 公司 Boxcar 平均器 (Model 162) 进行信号提取, 整个系统由一台 IBM 286 计算机控制, 测量及数据处理实现全自动化。

定标是测量准确的关键, 激光合作目标的 LRCS 测量采用比较法进行。先选取标准目标, 由于待测量目标为后向反射器, 具有很强的回波信号, 必须选择镜反射目标为标准目标——反射率 97% 的镀金平面反射镜 ($\varnothing 30\text{mm}$) 作为标准目标, 镀金反射镜 (正入射) 与合作目标具有同数量级的激光雷达散射截面, 可以减小由于比对引入的误差, 同时镜反射能量远大于背景杂散光, 获得很高的信噪比。在这里如果选取漫射标准板, 就把远场测量变成了近场成像测量, 这在概念上是不允许的。这个原则可以归纳成远场测量远场条件比对, 近场测量近场条件比对, 任何交叉比对将导致原理性错误。

测量时, 先在样品架上放置镀金镜, 而后在同样条件下用待测目标取代镀金镜, 根据 (3) 式可以导出被测目标的 LRCS 为

$$\sigma_{\text{目标}} = \frac{P_{i,\text{目标}}}{P_{i,\text{标准}}} \frac{P_{r,\text{标准}}}{P_{r,\text{目标}}} \frac{\Omega_{i,\text{目标}} R_{i,\text{目标}}^2}{\Omega_{i,\text{标准}} R_{i,\text{标准}}^2} \sigma_{\text{标准}} \quad (4)$$

由于测量条件一致, 有: $P_{i,\text{目标}} = P_{i,\text{标准}}, R_{i,\text{目标}} = R_{i,\text{标准}}, \Omega_{i,\text{目标}} = \Omega_{i,\text{标准}}$ 则

$$\sigma_{\text{目标}} = \frac{P_{r,\text{标准}}}{P_{r,\text{目标}}} \sigma_{\text{标准}} = \frac{V_{\text{标准}}}{V_{\text{目标}}} \sigma_{\text{标准}} \quad (5)$$

式中, σ 为已知镀金反射镜的激光雷达散射截面, $V_{\text{目标}}, V_{\text{标准}}$ 分别表示光电倍增管的输出电压值。

这样则获得了待测目标的激光雷达散射截面。

四、理论计算

两种目标作为待测样品, 其一为 K9 玻璃材料加工的 1" 级四面体角反射器; 另一种是用三个 1" 级四面体角反射器组合而成的梯形结构的合作目标。

根据四面体角反射器的理论, 其反射强度取决于角反射器的有效面积, 沿对称轴方向 ($\theta = 0^\circ, \varphi = 0^\circ$) 出现最大散射截面, LRCS 其值为^[5]

$$\sigma_0 = 4\pi (A_{\text{eff}}/\lambda)^2 \quad (6)$$

式中, 有效面积 $A_{\text{eff}} = l^2 / \sqrt{12}$ (l 为角反射底边长), λ 为波长。

在其它入射角时, 有效面积发生变化, LRCS 值为

$$\sigma = \sigma_0 \left[1 - \frac{2\sqrt{2}}{\pi} N_0 (1 - 2N_0^2)^{1/2} - \frac{2}{\pi} \arcsin(\sqrt{2} N_0) \right] \cos i \quad (7)$$

式中, $N_0 = \frac{\sin i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i}}$, i 为入射角, n 为折射率。

由 (7) 式得到角反射器的理论分布曲线, 见图 4 (虚线)。对于梯形结构的合作目标, 依据三个角反射器相互构成的角度, 在每个旋转角度, 将每个角反射器所处相应位置产生的反射强度相加, 得到组合作目标在 $\pm 64^\circ$ 的分布形式, 见图 5 (虚线)。

五、实验结果与分析

采用激光雷达散射测量系统, 在 $1.06\mu\text{m}$ 波长下, 测量了 1" 级四面体角反射器俯仰角 0° ,

方位角±50°范围的后向 LRCS。角反射器的 LRCS 与入射角的关系曲线见图 4 中的“+”线,虚线为理论计算的 LRCS 分布曲线,实验曲线与理论曲线吻合较好。正入射($\theta=0^\circ, \varphi=0^\circ$)时,得到最大的 LRCS 值 $5.28 \times 10^7 (\text{m}^2)$,半功率波束宽度约 45°,表明采用介质材料制作角反射器展宽了反射波束宽度。通常的三面角反射器的波束宽度为 30° ^[5]。观察实测曲线发现正入射(0° 处),有较高峰值,这是四面体底面玻璃的表面镜反射的贡献。

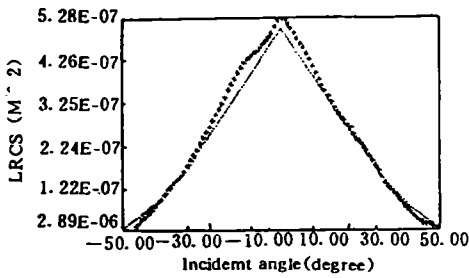


Fig. 4 LRCS distribution of 1'' order corner reflector (“+” line indicates experimental data, dashed line indicates theoretic values)

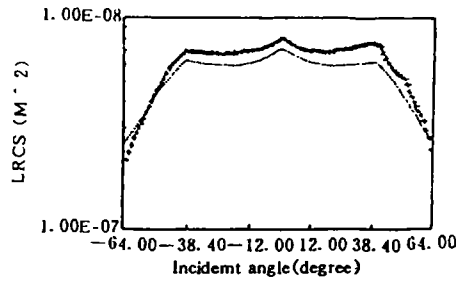


Fig. 5 LRCS distribution of laser cooperative target when $\theta = 0^\circ$ (“+” line indicates experimental data, dashed line indicates theoretic values)

梯形合作目标在±64°范围的 LRCS 分布曲线见图 5。“+”线为实测值,虚线为理论估算值。观察实测曲线发现,±64°范围均有较高 LRCS 值,±40°范围呈现较平坦趋势,这主要由三个角反射器对称轴所构成的角度决定。同样在相对每一个角反射器正入射时,均得到较大的后向散射值,形成三个略高的峰值。与理论曲线比较,二者的 LRCS 分布趋势吻合很好,可能由于合作目标底面的镜反射,以及用来构成合作目标的支架的反射成分,使实测曲线与理论曲线有差别。

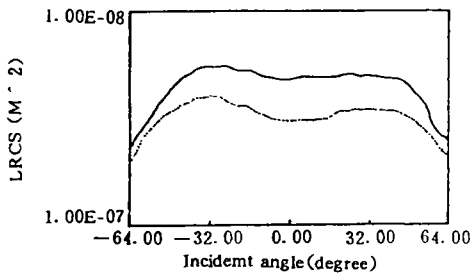


Fig. 6 $\theta=15^\circ$ (real line) $\theta=20^\circ$ (dashed line) LRCS distribution of laser cooperative target

改变合作目标相对光轴的俯仰角 θ , 其 LRCS 相对于方位角的分布见图 6, 实线为俯仰角 15° 时的 LRCS 曲线, 虚线为俯仰角 20° 时的 LRCS 曲线。可以发现随着俯仰角增大, 合作目标的 LRCS 分布呈下降趋势。由于合作目标底面与入射光轴不垂直, 其表面反射与接收方向不重合, 0° 峰值消失。曲线在 $\pm 40^\circ$ 附近值较大, 这是由合作目标特定结构所决定的, 但左右不对称, 这是光场不均匀的影响。比较一下不同俯仰角下, 方位角为 0° 时的 LRCS 值, $\theta=0^\circ$ 时合作目标的 LRCS 值是 $\theta=10^\circ$ 时的 1.34 倍, 是 $\theta=20^\circ$ 的 2.6 倍。正入射时, 梯形合作目标的 LRCS 值是单个角反射器的 1.5 倍。参见附表。

Table LRCS of 0° azimuth angle under different elevation angle ($\times 10^7 \text{m}^2$)

elevation angle	ladder shaped cooperative targets								corner reflector
	0°	10°	15°	18°	20°	21°	22°	23°	0°
LRCS	7.93	5.93	4.75	3.6	3.06	2.90	2.86	2.59	5.28

激光合作目标在±64°范围的 LRCS 值随俯仰角变化, 其值均为 10^7 量级, 远高于单个角反射器在同样范围的 LRCS 值, 大幅度地扩大了光测范围, 提高了反射强度。表明合作目标的角度覆盖范围决定于反射表面的几何形状。另外, 角反射器 1'' 的直角加工精度确保了反射光

束质量和强度。角反射器直角误差的存在,使反射光斑中心能量减弱。直角误差较大时,会导致中心光斑离散为六个光斑,反射光发散,使角反射器的后向反射方向性差,能量减小,严重影响角反射器的激光雷达散射截面。

实验中光场不均匀导致了测量误差,使俯仰角较大时 LRCS 分布不完全对称,另外,测量曲线的统计起伏是由于探测器、前置放大器噪声,以及散斑和闪烁导致的脉冲起伏造成的。

六、结 论

结果表明,实验与理论计算得到较好的吻合,采用 K9 材料制作角反射器展宽了波束宽度。合作目标的反射信号强度,角度覆盖范围决定于其反射表面的几何形状、加工精度,通过合理的组合方式来组合大小有限的后向反射器可以达到特定的目的,提高 LRCS 值,确保宽的合作跟踪范围。

参 考 文 献

- 1 张承铨. 国外军用激光仪器手册. 北京:兵器工业出版社,1989:298
- 2 Carl Leader J. J O S A. 1979;69(4):610~628
- 3 张承铨. 国外军用激光仪器手册. 北京:兵器工业出版社,1989,294~295
- 4 Danielson B L. Proposed Standards for Ladar Signatures. AD 038725,1977
- 5 黄培康,汪一飞译. 微波遥感. 北京:科学出版社,1987:202.

* * *

作者简介:谢品华,女,1968年1月出生。硕士。现从事目标光学特性,激光散射方面的研究。

收稿日期:1993-07-19

· 简 讯 ·

超低阈值电流的 InGaAs 激光二极管

记录的低阈值电流——在原解理面 InGaAs/AlGaAs 激光器中为 1mA,在镀高反射膜 InGaAs/AlGaAs 激光器中脉冲电流为 0.25mA——在单量子阱结构中已经获得。据加州理工大学的开发者称,因为大量的激光应用在光互连中总功率损耗高,因此,降低电流阈值是非常必要的。Tiroing Chen 解释说降低阈值电流也较充分利用在大容量系统中的电流,从而增加调制带宽。

通过最佳化器件结构和改进生产技术降低阈值。通过增加单量子阱的宽度到 8nm(受纯增益饱和和效应产生的限制),当两个表面均镀 0.95 反射率膜时,测得连续阈值电流为 0.35mA。该器件同时显示出了外微分量子效率和激光波长与腔长的微弱相依关系。

译自 L F World, 1994;30(1):9 於祖兰 译 巩马理 校