

军事目标激光散射特性研究进展

高宇辰,周冰,刘贺雄,陈玉丹
(军械工程学院电子与光学工程系,河北石家庄 050003)

摘要:军事目标的激光散射特性是影响装备作战效能的重要因素,对于研究激光装备的作用距离、装备的激光隐身性能具有重要的意义。本文介绍了目标激光散射特性的基本概念,从理论模型和经验公式两方面介绍了激光散射特性的理论建模研究成果,分析了各种模型和经验公式的适用范围。从目标表面材料 BRDF 测量、缩比模型 LRCS 测量、真实目标 LRCS 测量三个方面,分析了国内外典型测量方法、相关应用以及下一步发展方向,为后续目标散射特性的研究提供借鉴。

关键词:激光;军事目标;激光散射特性;双向反射分布函数;激光雷达散射界面

中图分类号:TN249;O439 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.09.002

Research progress of laser scattering properties for military target

GAO Yu-chen, ZHOU Bing, LIU He-xiong, CHEN Yu-dan
(Electronic & Optical Engineering Department, Mechanical Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: The laser scattering characteristics of military targets are a key factor of the equipment combat effectiveness, and it has great significance for studying operating range of laser equipment and stealth performance of equipment. The basic concept of target laser scattering characteristics is introduced, and the theoretical research results of laser scattering characteristics from the theoretical model and the empirical formula were described, and then the applicable scope of the various models and empirical formulas was analyzed. The latest measurement methods, the latest research progress and the research direction of the next research are analyzed from three aspects of the target surface material BRDF measurement, the scale-model LRCS measurement and the real target LRCS measurement. This provide a reference for the study of target scattering characteristics.

Key words: laser; military target; laser scattering characteristics; BRDF; LRCS

1 引言

自从激光出现后,激光测距、激光半主动制导、激光侦察告警、激光主动干扰等设备在军事领域取得了广泛的应用。特别是在包括地面、海上、空中的各种先进武器控制系统中发挥着日益重要的作用,成为影响武器系统作战效能的重要因素^[1-2]。激光散射特性是检验军用装备激光隐身能力的重要指标

之一。而对于以激光测距装备、激光半主动制导等包含激光发射、接收系统的激光装备来说,激光照射目标的激光散射特性是影响此类激光装备性能的一个重要因素^[3-4]。

本文主要针对典型军事目标的激光散射特性进行研究,从描述激光散射特性的基本概念入手,分析了理论研究、实验测量等方面研究目标激光散射特

性的方法。介绍了理论研究的经典理论和最新的研究成果,对实验测量方法和数据优化方法进行了总结分析。针对后续研究方向提出了自己的观点,指出了目前方法仍然存在的局限性,为下一步研究提供借鉴。

2 目标激光散射特性描述

影响目标激光散射特性的因素有很多,包括目标表面材料的光学特性、外形结构和表面材料粗糙度等^[5]。这就需要对材料的激光散射特性、目标外形建模等方面进行深入的研究。目前,对于目标的激光散射特性,通常采用双向反射分布函数(BRDF)和激光雷达散射截面(LRCS)来描述。

2.1 双向反射分布函数

这一概念最早在1970年由尼科迪默斯(Nicodemus)提出,并于1977以美国国家标准局(NBS)的名义推荐使用^[6]。定义为:

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)} \quad (1)$$

其中, $\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r$ 分别表示入射激光的方位角、天顶角和反射激光的方位角、天顶角; dE_i 表示光源在入射点附近面元上的辐照度; dL_r 为相应的反射辐亮度。

2.2 激光雷达散射截面

激光雷达散射截面的概念最初源于微波雷达散射面积(RCS),通常用符号 σ 表示,其定义也借鉴了微波雷达的定义形式。主要有两种常见的定义形式^[7]:

定义一:接收方向上单位立体角内,目标的反射散射辐射功率与目标处的辐射照度之比再乘以4,即:

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \frac{|E_r(\alpha_r, \phi_r)|^2}{|E_i(\alpha_i, \phi_i)|^2} \quad (2)$$

这一定义是建立在一定假设条件下的。首先,目标各点的照度均匀;其次,目标是各向同性的漫反射体。另外,上式表示为极限的形式是为了保证目标与发射系统之间的距离足够远。这时,目标可被视为“点目标”^[8]。

定义二:激光雷达散射截面由目标反射率和目标被照射截面的乘积决定。即:

$$\sigma = \rho_0 G A_0$$

其中, ρ_0 为目标表面反射率,由材料的光学特性决定; G 为目标增益,由目标材料形状、表面状况方向

等因素决定; A_0 为实际投影面积,由目标类型和方向决定^[9]。

2.3 BRDF 与 LRCS 的关系

由 BRDF 的定义可知, BRDF 是一个微分量,不能直接测量。通常在一定的参数范围内测量其平均值。BRDF 可以用于描述目标表面材料的反射能力,但没有考虑目标的几何形状。因此,只用 BRDF 来描述目标激光散射特性并不全面。对于实际目标的激光散射能力,就需要选用目标的 LRCS 来描述。在实际应用中, BRDF 往往是针对目标表面材料的样板或者自然地物、海面等背景环境,而 LRCS 则被用来描述实际目标或模型的激光散射特性,例如坦克、飞机、舰艇等。

根据 BRDF 和 LRCS 的定义式可以得到单位面积 LRCS 与 BRDF 的关系式^[10]:

$$\sigma = 4\pi f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \cos\theta_i \cos\theta_r \quad (3)$$

上式的 BRDF 与 LRCS 的关系式表明:当实际目标 LRCS 测量比较困难时,就可以通过目标表面构成材料的 BRDF 和目标几何形状的解析表达式,估算出目标的 LRCS。

3 研究进展

对于实际目标激光散射特性的研究,大体可以分为理论研究和实际测量两部分。理论研究主要通过建立理论模型和 BRDF 经验公式。理论模型是基于电磁场散射理论和边界条件,得到的解析模型^[11]。经验公式是根据目标的散射现象,利用函数构造的数学模型,有时没有明确的物理意义。通过得到的数学模型与实验数据相结合,使经验公式扩展到能够描述 BRDF^[12]。

实际测量主要包括:目标表面材料 BRDF 的测量,缩比模型的 LRCS 的测量以及实际目标 LRCS 测量。

3.1 理论研究

由于激光与微波同属电磁波,激光散射特性的研究也常常借用微波波段散射特性的研究成果。激光波长比微波波长短几个数量级,在分析方法上也略有不同。对于激光波长来说,目标表面的粗糙度、涂层的光学特性都是影响目标激光散射特性的重要因素。

在理论模型方面常用的模型和方法主要有:

1963年, Beckmann 和 Spizzichino 在研究周期性

和随机粗糙面的标量波散射时引入了 Kirchhoff 近似方法^[13]。这种方法直接通过电磁场基本理论导出散射场分布,一般适用于计算近于后向散射的小入射角电磁散射问题和粗糙度起伏比较小的情况。在入射角和散射角较大,接近掠入射、掠散射时,理论预测与实验结果误差较大^[14-15]。

1966 年 Kodis 提出了几何光学法^[16],利用稳定相位法计算表面稳态点的散射场,然后根据稳态点的数目和分布来求总散射场分布。这种方法适用情况较少,主要适用于大粗糙表面^[17]。

全波法(Full wave algorithm,FWA)由 Bahar 于 20 世纪 70 年代提出^[18]。该方法从边界条件和麦克斯韦方程组出发。该方法不受起伏高度和斜率的限制,但是目前只适用于解决一维介质粗糙面或二维导体粗糙面的散射问题^[19-20]。

微扰法(small perturbation method,SPM)最早由 Rayleigh 提出^[21],最初用来解决正弦曲面的声波散射问题。随后 M Nieto - Vesperinas 等人将微扰法引入解决粗糙面散射问题^[22],该方法基于 Rayleigh 假设,认为散射场由光滑平面的反射场和粗糙表面引起的散射场叠加而成,该方法仅适用于粗糙面高度起伏远小于入射波长及小角度入射的情况^[23-24]。

Monte-Carlo 法原则上可以计算任意数学模型表述的介质中的辐射传输过程。Monte-Carlo 法对许多情况都可以进行模拟,但需要的存储空间比较大,计算时间较长^[11]。

在经验公式方面常用的模型和方法主要有:

Torrance-Sparrow 模型于 1967 年提出^[25]。该模型由镜面反射分量和漫反射分量组成,假设粗糙表面由法线方向呈高斯分布的小面元组成,反射关系遵循菲涅尔定律。适合模拟材料表面高度均方根远远大于波长的情况^[26]。

Phong 模型在 1975 年提出,是基于环境光、漫反射光和镜面反射光的三分量模型。常用于计算机图形学中,用于描述物体表面光反射情况^[27]。

五参数半经验统计模型由西安电子科技大学吴振森于 2002 年提出,该模型基于 Torrance-Sparrow 模型^[28]。对于金属合金、具有涂层的目标表面,五参数半经验统计模型都有很好的适应性^[29],缺点是形式较为复杂。在实际工程应用中,如果目标指数

分量增长不快、计算精度要求不高时,五参数模型可以简化为三参数模型^[30]。

随着计算机技术的不断发展,计算机图形技术等被运用到目标 LRCS 计算中。2000 年,西安电子科技大学李良超等将微波波段常用的图形电磁计算(GRECO)方法和 OpenGL 技术运用到复杂目标的激光散射计算,利用计算机实现了复杂目标的几何建模和 LRCS 的快速计算,使得计算效率大大提高。该方法主要包括光照模型与几何模型建模、目标渲染、遮挡消隐处理等步骤,再结合单位面积 LRCS,可以得到复杂目标的 LRCS^[31]。

3.2 目标表面材料 BRDF 测量

对于目标表面材料的 BRDF 测量方法,国内外并没有统一的测量方法,研究人员设计了多种测量系统对不同材料在不同激光波长下的 BRDF 进行了测量。

20 世纪 80 年代,美国亚利桑那大学光学中心就建造了一套 BRDF 的测量系统^[32]。包括光学系统、样品转台、探测器、衰减器、调制器、电子系统等部分组成。后续设计的 BRDF 测量系统也都采用了这种基本结构。美国政府工作报告和 NASA 报告等少数公开的文献中显示,科研人员对飞行器、军用目标、海面等目标的表面激光散射特性进行了测量^[33-35]。

1987 年,Mendez 等人测量了 Gray 方法制备的强粗糙表面的散射场,并发现了后向增强散射现象^[36]。说明对于强粗糙表面的散射并不局限于镜面反射和漫反射^[37]。

近年来,国内很多机构针对不同应用情况,选取多种材料,开展了 BRDF 的测量研究。

2006 年,中科院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室张百顺采用比较测量法测量了标准靶板与目标样板的 BRDF。利用五参数半经验统计模型和遗传算法,对钢基样品等目标样板的 BRDF 进行建模。验证了方法的可能性^[38]。

2008 年,上海光学精密机械研究所张雷洪在研究空间目标激光散射特性时,选择空间目标常用的两种热控料:白漆涂层、F36 多包层。测量材料样品在 1064 nm 波长下的 BRDF。并分析了最小接收功率与空间目标 BRDF 之间关系。对于激光发射系统的功率设计提出了参考^[39]。

2011 年,机电工程与控制国家级重点实验室的李伟等对红外隐身装甲涂层在 940 nm 波长激光下的 BRDF 进行了测量,采用三参数模型进行 BRDF 参数优化,得到了目标表面材料样片的 BRDF 模型^[40]。

2012 年,针对海上激光制导武器的应用情况。海军工程大学对海面的激光散射特性进行了研究。利用几何光学法对激光在模拟海面的激光散射特性进行建模。仿真分析了不同风速、不同入射角时海面的激光散射特性^[41]。

2012 年,凌军等测量了伪装涂层在 1064 nm 波长下的反射率和 BRDF。对不同质量分数配比的激光吸收剂、不同涂层厚度、不同漆膜光泽度的三个涂层样品进行测量。分析了伪装涂层对波长为 1064 nm 激光的吸收能力和特定方位的激光散射能力^[42]。

2016 年,同济大学利用人工造波池模拟海面,对不同海情、不同擦地角下 1064 nm 激光散射特性进行了测试和分析。得出近距离海表面后向激光散射不同于粗糙面散射的结论^[43]。

3.3 缩比模型测量

对于某些大型目标,例如舰艇、飞机、坦克,人们关心的是目标在整个半球空间内的激光散射特性,即半球空间内任意方向入射的激光在任意方向的散射情况。这就要求对测量的目标进行旋转或者改变发射、接收的激光系统位置,以改变激光发射和接收角度。然而,在外场条件下要实现起来是比较困难的。所以,通过制作缩比模型,再对模型进行实验室测量是研究目标激光散射特性的重要手段之一。激光器发出的激光束经过扩束、准直到达模型表面。可以模拟实际应用中激光经过远距离传输到达目标时的光斑大小。

1995 年,吴振森等人选取几种常见几何模型,提出了适用于高频波段的近似缩比关系理论^[44]。1998 年,林溪波提出物理缩比因子和几何缩比因子、菲涅尔反射系数、粗糙度参数之间的关系^[45]。

2005 年,西安科技大学李良超等对某型号飞机 1:8 缩比模型的后向激光散射截面进行了测量,得到的数据与理论计算的结果相吻合,验证了缩比关系的正确性^[46]。

2015 年,中国航空工业集团公司洛阳电光设备

研究所杨旭等提出了适用于缩比模型测量的改进方法,包括提高模型高度,铺设消光布等方法以降低背景散射对测量精度的影响^[47]。

3.4 真实目标测量

实验室测量无法模拟实际应用中激光在大气中传输过程。同时,模型的制作精度也难以保证。这些因素导致在实验室进行的模型测量会存在一定的误差。所以,对于实际目标的现场测量是获取目标激光散射特性的重要手段之一。

在实际应用中,探测目标通常距离激光发射系统和激光接收系统较远。探测目标全部或部分被激光光斑覆盖。在现场测量中,为尽可能地模拟真实工作情况。激光发射系统、激光探测系统往往远离目标放置,满足远场测试条件。激光束经过扩束,均匀照射目标表面。通过调整目标或激光发射、探测系统,达到测量目标在不同方向激光照射下,不同方向激光散射能力的目的。

2013 年,中国飞行试验研究院的杨廷梧等人对某型号飞机的激光后向散射特性进行了测量。激光发射接收系统距离飞机 200 m,测量系统位置保持不变,通过顺时针旋转飞机方位角,每隔 30°测量一组数据。采用背景扣除和高斯补偿的方法优化测量数据,得到误差小于 7% 的试验数据^[48]。

对于全尺寸目标的实际测量来说,由于通常在室外环境进行,会受到环境的影响。目标背景的散射光也会被探测系统接收。目标附近的地面、用于固定的支架等产生的二次散射都会对测量产生影响^[49]。根据 LRCS 公式计算的定义,要求目标各点照度均匀,而在实际测量过程中,激光的照射光斑并不是均匀分布。所以,需要在测量过程中对测量方法进行改进、对测量结果进行处理。

2006 年,西安科技大学刘科祥等利用双光路法对标准靶板和目标靶板进行测量,有效降低了大气衰减和激光器照射能力衰减对测量结果的影响^[50]。

2011 年,清华大学的曲卫东等分析了光斑模式对 LRCS 测量精度的影响。提出将消光布遮蔽法与光斑分析法相结合,以提高 LRCS 测量系统检测精度。对于在实际目标测量中,减少光斑模式对 LRCS 测量精度的影响进行了分析^[51]。

2013 年,中国飞行试验研究院的杨廷梧等人,在外场测量中采用光阑遮挡的方式,通过增加扩束、整

形系统将激光光斑变为椭圆形,提高了光源利用率,减小了二次散射对测量精度的影响^[48]。

4 总结及展望

4.1 总结

目标表面材料 BRDF 测量可以直接获取表面材料针对不同入射角、出射角的光强分布情况。但由于实验条件限制,实际测量中会选取几个固定的激光入射角,测量一定数量的反射角的激光接收情况,难以获取全面的数据,只有与 BRDF 经验公式相结合,经过参数建模、模型优化才能获取更全面的 BRDF 数据。根据式(2)和式(3)中 BRDF 与 LRCS 的关系,通过目标表面材料 BRDF 数据得到目标单位面积 LRCS,再结合目标几何参数估算出实际目标的 LRCS。近年来,随着计算机技术的发展,借助计算机软件进行三维建模、光照模型模拟、目标渲染、硬件加速,可以大大提高计算速率^[52],将目标单位面积 LRCS 数据代入建模后的模型可以直接得到目标的 LRCS。理论仿真可以获得全面的数据,但仍需要通过实验数据进行验证。

全尺寸目标外场测量容易受到光照、场地等因素的影响。受实验条件的限制,同样无法获取全面的激光散射特性数据。实验室的缩比模型测量可以降低环境对测量结果的影响,但无法模拟实际应用中激光经过长距离大气传输后的激光分布情况,而且模型受加工精度的限制,难以对真实目标的细节进行模拟。同时,对于缩比因子的分析也会使结果产生误差。理论模型和半经验模型可以弥补实验的不足,而单纯依靠理论建立的模型又需要实验数据进行验证。所以,只有几种方法相结合才能更全面、准确地获得目标的激光散射特性。

4.2 后续研究方向展望

我国的目标激光散射特性研究开展较晚,与发达国家相比还有很大差距。目前已经建立了目标光学特性地面测量系统和机载测量系统,全尺寸目标激光 1.06 μm 和 10.6 μm 散射测量系统和目标缩比模型散射特性模拟研究实验室,建立了目标与环境光学特性数据库。下一步的研究方向主要包括:(1)在保证计算精度的情况下,提高实际目标激光散射特性的计算速率。优化目标表面材料 BRDF 模型和目标三维建模方法。(2)进一步完善典型目标激光散射特性数据库,加强外军武器装备激光散

射特性的数据库建设。研究实际目标激光散射特性,不仅可以了解己方装备被敌方探测到的可能性,更能了解己方激光探测设备对敌方目标的探测能力。加强对于外军武器装备激光散射特性的了解十分必要。(3)加强实际目标 LRCS 的外场测量研究,提高测量精度。目前的研究主要集中在表面材料 BRDF 测量和 LRCS 理论研究方面,还需继续进行真实复杂目标的实地测量,进一步获取真实目标的激光散射特性数据,验证前期理论研究结果。实际目标外场 LRCS 测试中,目前的数据处理方法是激光等效为高斯光束处理。在实际应用中,大气中的水蒸气、二氧化碳等气体分子和气溶胶粒子、尘埃等会对激光产生吸收和散射效应,造成激光能量的衰减。而大气的湍流效应会造成激光光束的扩展和漂移等^[53]。到达目标的激光光束并不是理想的高斯光束。如何更好的模拟实际应用中的激光入射和散射情况,对于提高 LRCS 外场测量精度具有重要意义。(4)将典型目标的激光散射特性模型与激光测距等系统的最大作用距离模型相结合。有效评估激光系统针对不同目标的极限作用能力。

目标的激光散射特性对于研究激光装备作用距离,更好地发挥军用激光装备在光电对抗中的作用;研究防激光涂层,发挥装备激光隐身性能等方面具有十分重要的意义。本文综述了对于目标激光散射特性的理论研究和实验测量手段。介绍了 BRDF 和 LRCS 的基本概念、激光散射理论研究模型、BRDF 经验公式、表面材料 BRDF 测量方法、缩比模型 LRCS 实验室测量方法和全尺寸目标 LRCS 外场测量方法、LRCS 测量数据优化方法等。分析总结了各种方法的长处,提出了仍然存在的不足之处。对于后续研究方向和提高数据测量精度等方面提出了自己的观点。对于目标激光散射特性的研究方法和思路具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] YAN Yahui. Estimation of ultimate operation range of semi-active laser guided equipment [D]. Shijiazhuang: Mechanical Engineering College, 2013. (in Chinese)
闫雅慧. 激光半主动制导装备的极限作用距离评估 [D]. 石家庄:军械工程学院, 2013.
- [2] WANG Yongzhong. Modern military optics technology [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

- 王永仲. 现代军用光学技术[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] ZHANG Chu, SHEN Hongbin, ZHOU Bing, et al. Study on evaluating maximum range of laser range finder[J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(12): 1196 – 1198. (in Chinese)
张雏, 沈洪斌, 周冰, 等. 激光测距机最大测程评估方法研究[J]. *激光与红外*, 2008, 38(12): 1196 – 1198.
- [4] LIU Bingqi, YAN Yahui, ZHOU Bing. Measurement model of the ultimate operating range for semi-active laser guided system[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2014, 35(2): 354 – 357. (in Chinese)
刘秉琦, 闫雅慧, 周冰. 激光半主动制导系统的极限作用距离测量模型[J]. *半导体光电*, 2014, 35(2): 354 – 357.
- [5] HAN Yi, SUN Huayan. Advances in space target optical scattering character research[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758 – 766. (in Chinese)
韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(3): 758 – 766.
- [6] Nicodemus F E. Geometrical Consideration and Nomenclature for Reflection[R]. NBS MN – 160, 1977.
- [7] YANG Yang. Coherence of two definition formula of lidar target scattering sections[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(2): 153 – 7155. (in Chinese)
杨洋. 激光雷达目标散射截面两种不同定义式的一致性[J]. *激光与红外*, 2003, 33(2): 153 – 7155.
- [8] ZHANG Chengquan. Handbook of foreign military laser instruments[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 1989: 509 – 514. (in Chinese)
张承铨. 国外军用激光仪器手册[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1989: 509 – 514.
- [9] XIONG Huifeng, Lidar[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2009: 28 – 29. (in Chinese)
熊辉丰. 激光雷达[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 28 – 29.
- [10] WU Zhensen, DOU Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(10): 1250 – 1254. (in Chinese)
吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射[J]. *光学学报*, 2003, 23(10): 1250 – 1254.
- [11] LIU Jianfeng. The BRDF modeling technology of light scattering characteristics of targets and earth surface[D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
刘剑锋. 目标与地物光散射特性的 BRDF 模化技术[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [12] LIU Qiang. Measurement and optimized statistical modeling for laser BRDF of target with rough surface[D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
刘强. 目标表面激光双向反射分布函数的测量与优化统计建模[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [13] P Beckmann, A Spizzichino. The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces[M]. New York: Pergamon Press, 1963.
- [14] XIE Yan. Reflective properties of one dimensional rough surfaces at large incident angel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
谢燕. 一维随机粗糙表面大角度入射反射特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [15] YANG Yuqi. Study on electromagnetic scattering from rough surface based an BRDF[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (in Chinese)
杨钰琦. 粗糙面散射的 BRDF 方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [16] Kodis R A. Note on the theory of scattering from an irregular surface[C]. *IEEE Trans. Antand Prop*, 1966, AP – 14(1): 77 – 82.
- [17] CHEN Hongbo. Study on light scattering characteristics of rough conical surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
陈洪波. 随机粗糙锥面的光散射特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [18] Bahar E. Radio wave propagation over a rough variable impedance boundary: partI-Full-wave Analysis, Part II-Application of Full-wave Analysis[C]. *IEEE Trans. Ant and Prop*, 1972, AP-20(3): 354 – 368.
- [19] Bahar E. Full wave solution for the scattered radiation fields from rough surface with arbitrary slope and frequency[C]. *IEEE Trans, Ant and Prop*, 1980, AP – 28(1): 11 – 21.
- [20] TANG Lin. Study on light scattering characteristics of rough surface[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
汤林. 随机粗糙面的光散射特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [21] L Rayleigh, NH Nachtrieb. The Theory of Sound[J]. *Physics Today*, 1957, 10(1): 32 – 34.
- [22] Nieto-Vesperinas M, Garcia N. A detailed study of the scattering of scalar wave from random rough Surfaces[J]. *Optics Acta*, 1981, 28(12): 1651 – 1672.

- [23] ZHANG Shilei. Measurements of the backscattering characteristics of typical lidar targets[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
张石磊. 典型激光雷达目标后向光散射特性测试[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [24] TIAN Wei. Study on optical wave scattering from the random rough surfaces[D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
田炜. 随机粗糙面光散射特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [25] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces [J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9): 1105 - 1114.
- [26] WANG Wanjun. Radiation and scattering characteristics of aerial targets under earth-atmosphere environment in visible and infrared BAND [D]. Xi'an: Xidian University, 2009. (in Chinese)
王万君. 复杂地球大气背景下目标的可见光/红外光散射与辐射特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [27] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures [J]. Communications of ACM, 1975, 18(6): 311 - 317.
- [28] WU Zhensen, XIE Donghui, XIE Pinhua. Modeling reflectance function from rough surface and algorithms [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897 - 901. (in Chinese)
吴振森, 谢东辉, 谢品华. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897 - 901.
- [29] LI Tie, WU Zhensen, ZENG Zhengchao. 3-D BRDF statistical modeling and optimizing of surfaces of various materials and roughness [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2007, 31(4): 518 - 523. (in Chinese)
李铁, 吴振森, 曾震超. 多类目标样片 BRDF 三维统计建模及优化[J]. 南京理工大学学报, 2007, 31(4): 518 - 523.
- [30] LI Tie. Researches on the simulation and engineering application of the near-field laser scattering by complex targets [D]. Xi'an: Xidian University, 2005. (in Chinese)
李铁. 复杂目标激光近场散射的工程应用仿真研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005.
- [31] LI Liangchao, WU Zhensen, XUE Qianzhong. A fast algorithm for LRCS of a complex object with a rough surface [J]. Journal of Xidian University: Natural Science Edition, 2000, 27(5): 577 - 580. (in Chinese)
李良超, 吴振森, 薛谦忠. 一种计算复杂目标激光雷达散射截面的快速算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2000, 27(5): 577 - 580.
- [32] XU Genxing. Optical characteristics of target and environment [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995. (in Chinese)
徐根兴. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.
- [33] Sluder, Randall B, Villanucel, et al. Aircraft program for target, background, and sky radiance measurements [R]. AD - A095363, 1980.
- [34] Smith, Sheldon M. BRDF measurements of sunshield and baffle materials for IRAS telescope [R]. NASA TM-84235, 1982.
- [35] Guissard A, Baufays C, Sobieski P. Sea Surface description requirement for electromagnetic scattering calculations [J]. Geophy. Res, 1986, 91(C2): 2477 - 2492.
- [36] Mendez E R, O'Donnell A. Observation of depolarization a backscattering enhancement in light scattering from gaussian random surface [J]. Optics Communication, 1987, 161(2): 91 - 95.
- [37] HU Xinquan. Experimental study on backscattering characteristics of near infrared lidar [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
胡新权. 近红外激光雷达目标后向散射特性实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [38] ZHANG Baishun, LIU Wenqing, WEI Qingnong. Experiment measurements and validating with the model of typical goal's BRDF [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(4): 533 - 536. (in Chinese)
张百顺, 刘文清, 魏庆农. 典型目标的 BRDF 实验室测量与模型验证[J]. 量子电子学报, 2006, 23(4): 533 - 536.
- [39] ZHANG Leihong, YANG Yan, ZANG Huaguo. Reflective characteristics of target in laser rangefinder [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1001 - 1004. (in Chinese)
张雷洪, 杨艳, 臧华国. 目标反射特性对激光测距的影响[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1001 - 1004.
- [40] LI Wei, TIAN Bo, CUI Dong. BRDF of infrared camouflage armor coating on 940 nm band [J]. Journal of Detection & Control, 2011, 33(2): 9 - 14. (in Chinese)
李伟, 田博, 崔冬. 装甲隐身涂层 940nm 双向反射分布函数[J]. 探测与控制学报, 2011, 33(2): 9 - 14.
- [41] ZHANG Shuang, ZHANG Xiaohui, SUN Chunsheng. Laser reflection performance from the rough sea surface with ge-

- ometrical optical method [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2012, 10(3): 28–31. (in Chinese)
- 张爽, 张晓晖, 孙春生. 计算海面激光反射特性的几何光学方法研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(3): 28–31.
- [42] LING Jun, ZHANG Shuanqin, WU Jianye. Measurement and experimental study of laser reflectance characteristics of camouflage coat[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 1–6. (in Chinese)
- 凌军, 张拴勤, 吴坚业. 伪装涂层激光反射特性检测与实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 1–6.
- [43] TONG Guangde, WANG Zhanshan, SHEN Zhengxiang. Measurement and analysis of laser scattering characteristic of sea surface under condition of super-low-altitude[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(2): 1–5. (in Chinese)
- 童广德, 王占山, 沈正祥. 超低空状态下海面激光散射特性测试与分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 1–5.
- [44] Zhensen Wu, Baoqian Liu. Electromagnetic similitude and inconsistency of laser scattering of scale model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1995, 16(7): 1249–1259.
- [45] LIN Xiibo. Relationship between laser radar cross section and geometric scaling[J]. Aerodynamic Missile Journal, 1998, (10): 55–61. (in Chinese)
- 林溪波. 激光雷达截面和几何缩比关系[J]. 飞航导弹, 1998, (10): 55–61.
- [46] LI Liangchao. Comparison of the back laser radar cross-section calculation of complex object with the measurement of scale-model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(6): 770–774. (in Chinese)
- 李良超. 复杂目标后向激光雷达散射截面计算与缩比模型测量比较[J]. 中国激光, 2005, 32(6): 770–774.
- [47] YANG Xu, LU Jian, HU Lei li. Measurement and evaluation for laser scattering characteristics of complex large object[J]. Electronics Optics & Control, 2015, 22(11): 104–108. (in Chinese)
- 杨旭, 吕健, 胡磊力. 复杂大目标激光散射特性测量与评估技术研究[J]. 电光与控制, 2015, 22(11): 104–108.
- [48] YANG Tingwu, ZENG Xiaodong, WANG Hao. Measurement and analysis of aircraft LRCS in outfield test[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(2): 224–227. (in Chinese)
- 杨廷梧, 曾晓东, 王浩. 飞机激光雷达散射截面测量与分析[J]. 光子学报, 2013, 42(2): 224–227.
- [49] BAO Xuezhi, GAO Wei, JIA Yangyu. Influence of background scattering on measurement accuracy of laser radar cross section [J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(4): 590–595. (in Chinese)
- 包学志, 高卫, 贾养育. 背景散射对 LRCS 测量精度的影响分析[J]. 应用光学, 2008, 29(4): 590–595.
- [50] LIU Kexiang, XU Rongguo, WU Zhensen. Measurement and analysis of the outfield target's laser scattering characteristics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(2): 206–212. (in Chinese)
- 刘科祥, 许荣国, 吴振森. 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.
- [51] QU Weidong, DU Ziqiang, XUE Jianguo. Relative measurement of laser radar cross section and its accuracy test [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(11): 39–44. (in Chinese)
- 曲卫东, 杜自强, 薛建国. 激光雷达散射截面的比对测量法及其精度检测[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(11): 39–44.
- [52] XU Fuchang. Analysis of laser scattering characteristics and LRCS calculation of target material [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- 徐付昌. 目标材料激光散射特性分析与 LRCS 计算 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [53] WANG Yuanbo. Theoretical and experimental research on laser propagation in the atmosphere [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)
- 王元博. 激光大气传输特性及实验研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.