

# 复杂目标激光雷达散射截面一体化计算研究

张昊 李建周 陈昶

西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129

**摘要** 复杂目标的激光雷达散射截面(LRCS)一直以来是激光探测和隐身中很重要的一个参数。对于LRCS计算的理论方法已经比较成熟,但是在将目标建模、目标表面材料涂覆、目标整体LRCS计算相结合的一体化设计方面,还存在一些有待解决的问题。针对该问题,介绍了一种基于Unigraphics造型软件,结合图形电磁计算(GRECO)以及双向反射分布函数(BRDF)模型的复杂目标(涂覆)LRCS计算软件的一体化开发方法。计算实例表明,使用这种方法,程序的一体化设计效果良好,而且具有较高的计算精度和准确性。

**关键词** 激光光学;散射;激光雷达散射截面;图形电磁计算;双向反射分布函数;复杂目标

**中图分类号** TN958.98; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP51.021404

## Research of Integration Calculation of Complex Target's Laser Radar Cross Section

Zhang Hao Li Jianzhou Chen Chang

School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710129, China

**Abstract** The laser radar cross section (LRCS) of complex target is a very important parameter in laser acquisition and stealth all the time. The theoretical method of calculation of LRCS is comparatively mature, but in the overall combination design of target modeling, target surface coating materials and LRCS calculation integration, there are still some problems remaining to be solved. Aiming at this problem, we introduce an application integration developing method of complex target's (coating material) calculation of LRCS based on Unigraphics modelling software, model of bidirectional reflectance distribution function (BRDF) and graphical electromagnetic computing (GRECO). The program's application integration design is effective, proved by calculation examples based on this method, besides, this method has high precision and accuracy in computing.

**Key words** laser optics; scattering; laser radar cross section; graphical computing reflectance; electromagnetic bidirectional distribution function; complex target

**OCIS Codes** 140.3430; 200.4560; 200.4740; 290.1483

## 1 引言

复杂目标激光雷达散射截面(LRCS)的计算是当前研究激光目标散射特性涉及的主要内容之一,它的计算主要包括目标建模和LRCS计算两部分。针对此问题,国内外进行了大量研究,提出了许多解决方法,其中对于目标建模部分主要是从造型软件中提取模型信息,然后使用三维图形编程工具 OpenGL 建立目标的几何模型;而LRCS的计算主要使用的方法是常规的双向反射分布函数(BRDF)模型结合文献[1]中提出的图形电磁计算(GRECO)方法,这种方法因其计算精度高、实时性强的特点而应用最为广泛<sup>[2-5]</sup>。

从上述的发展现状可以看出,传统的LRCS计算与目标建模一般处于分立状态,没有一个一致的解决方案,这直接导致了计算过程非常繁琐,而且传统的计算在模型的导出与重建过程中产生误差,将降低最终结果的精确度。针对此问题,本文提出了一种将目标建模与LRCS计算一体化设计的方法。除此之外,还提出

收稿日期: 2013-09-22; 收到修改稿日期: 2013-10-30; 网络出版日期: 2013-01-10

作者简介: 张昊(1991—),男,硕士研究生,主要从事电磁散射计算等方面的研究。E-mail: everdream8285@163.com

导师简介: 李建周(1972—),男,教授,硕士生导师,主要从事目标建模及电磁散射计算、小卫星天线等方面的研究。

E-mail: ljz@nwpu.edu.cn

了一个与实测结果相吻合的 BRDF 混合模型。

## 2 理论方法

激光雷达散射截面(LRCS),是用来描述目标激光散射特性的物理量。由于激光雷达是从传统的微波雷达发展而来的,因此原微波雷达中的一些概念、技术及术语都被沿用到激光雷达中来。激光雷达散射截面的定义就采用了微波雷达散射截面(RCS)的定义引出。LRCS定义如下<sup>[6]</sup>:

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{I_s}{I_i}, \quad (1)$$

式中  $I_s$  表示观测点处来自目标的散射光通量,  $I_i$  表示光源对于目标的入射光通量,  $R$  代表观测点与目标的距离。

上述 LRCS 定义式虽然简单,但是在实际或者仿真计算中,光通量是不易确定的,因此上述定义式在实际应用中是不可行的。要解决目标 LRCS 的计算问题首先就是要找到描述物体表面散射性能的描述方法。目标对照射到它上面的激光的散射能力与目标表面材料的种类、表面的粗糙度及几何结构有关,而 BRDF 恰好可以描述物体的表面反射性能。BRDF 通常定义如下<sup>[6]</sup>:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (2)$$

它是在  $(\theta_r, \varphi_r)$  方向上的反射光辐亮度  $dL_r$  与在  $(\theta_i, \varphi_i)$  方向上立体角元  $d\omega_i$  内入射光的辐照度  $dE_i$  之比。其取值范围为由零到无限大,单位为  $\text{sr}^{-1}$ 。除少数特殊情况,一般它是相当复杂的函数,难以表示成解析形式。

BRDF 只能表示目标表面的材料对激光的散射特性,但实际上目标的几何尺寸等参数也是影响 LRCS 的重要因素,可见,用它来描述整个目标的 LRCS 是不合适的,因而就需要讨论 BRDF 和 LRCS 的关系问题。文献[7]中给出 BRDF 与 LRCS 的关系如下:

$$\sigma = \int_{A_i} d\sigma = \int_{A_i} 4\pi f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r dA \quad (3)$$

式中  $A_i$  为目标被照亮的总面积,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_r$  为反射角。可见,要计算目标整体的 LRCS 需要先确定目标表面材料的 BRDF 值。

然而 BRDF 一般是相当复杂的函数,难以表示成解析形式,因此需要找到一个能应用于计算的 BRDF 模型。

### 2.1 Phong 模型及其修正

Phong 模型是一个根据实验测量的表面反射特性得到的亮度模型,它没有实际的物理意义。作为光照模型,Phong 模型被计算机图形学广泛使用<sup>[8]</sup>。该模型的表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = \frac{k_d}{\pi} + k_s C_n \cos^n \alpha, \quad (4)$$

(4)式右边第一项代表漫反射分量,第二项代表定向反射分量。式中  $k_d$  为漫反射系数;  $k_s$  为定向反射系数;  $\alpha$  代表镜反射方向和出射方向之间的夹角;  $n$  为镜向指数,  $n$  值越大,镜向峰值也就越尖锐;  $C_n$  为镜面反射幅度分量。

Phong 模型的缺点是能量不守恒,不具有互易性,最大值总是出现在镜向方向上,因此对于具有非镜向(镜面反射方向)峰值现象的表面散射特性就无能为力了。为了使其遵守互易性和能量守恒定律,需要对(4)式进行如下修正:使  $\cos \alpha$  不出现负值,即令  $\alpha = \min(\pi/2, \alpha)$ 。

### 2.2 修正的五参数模型

将传统的 BRDF 五参数模型修正如下<sup>[9]</sup>:

$$f = f_{\text{spec}} + f_{\text{diff}} = [A / \cos^6 \theta] \exp(\tan^2 \theta / s^2) + B \cos^m \theta, \quad (5)$$

(5)式右边第一项代表粗糙表面的相干(镜面反射)分量,第二项表示漫反射分量,  $\theta$  为入射角。  $A$ 、 $B$ 、 $s$ 、 $m$  为待定系数,其大小与激光波长、材质种类等因素有关。式中  $s$  为镜面反射系数,  $m$  为漫反射系数,  $A$ 、 $B$  分别为镜面反射和漫反射幅度分量。

由于在实际情况中,目标的 LRCS 值往往在镜向处出现峰值,经过多个模型的测试,发现传统的 BRDF

模型很难与实际情况相吻合。而将修正的 Phong 模型与传统的五参数模型相结合,使用它们的混合模型能很好地与实际测量结果相对应,因此在本文中采用的是如下的 BRDF 模型:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = a \times f + b \times f_{\text{Phong}}, \quad (6)$$

(6)式右边第一项表示五参数 BRDF 模型对于总体 BRDF 值的贡献,第二项表示 Phong 模型对于总体 BRDF 值的贡献,它们贡献的比例分别为  $a$  和  $b$ ,且  $a + b = 1$ 。对于不同的材料,这两部分对于总体的 LRCS 贡献不同,它们的具体值由标准目标涂覆材料后的实测结果加以确定。将这种混合 BRDF 模型与实测结果进行对照,两者吻合良好,能够反映实测材料的表面光学散射特性,具体实例将在后文中给出。

由于 BRDF 模型中的各项参数与目标表面的材料信息、入射波波长等参数有关<sup>[8]</sup>,所以本文将所需的参数( $A, B, s, m, a, b$ )存储于一个材料 BRDF 参数库中,在计算 LRCS 时根据材料信息及入射波长在所建立的库中进行快速查表,得到所需数据传递给计算程序进行计算。

### 3 复杂目标 LRCS 计算方法

本文的激光散射截面计算主要用于与基于 UG(Unigraphics)的 GRECO 方法相结合,提高 GRECO 的计算精度。UG 是一款功能十分强大的计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)造型软件,能够容易地对各种实体与模型进行建模,特别重要的是,其提供了开放式的程序接口,通过其 UG/Open、UG/Open++以及 UG/UiStyler 平台,可对其进行交互式操作<sup>[10]</sup>,实现计算 LRCS 的目的。由(3)式可知每个面元的 LRCS 值可以表示为

$$d\sigma = \pi f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r ds. \quad (7)$$

由于图形算法处理的目标图像实际上是真实三维表面在计算机屏幕上的投影,如图 1 所示,因此屏幕上的小面元即像素  $ds'$  就是真实面元  $ds$  在其上的投影,故存在关系式<sup>[11]</sup>:

$$ds' = \cos \theta ds. \quad (8)$$

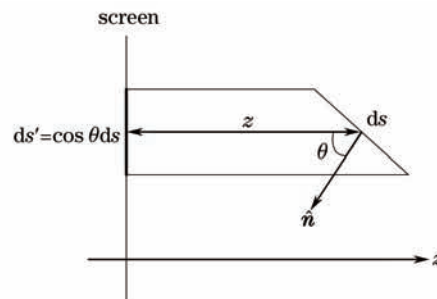


图 1 面元及其在屏幕上的投影

Fig.1 Surface element and its projection on the screen

将(8)式代入(3)式积分并按照像素进行离散化计算,可以得到最终的 LRCS 计算式为

$$\sigma = \pi \sum_{\text{screen}} f_r(\theta, \varphi_i, \varphi_r) \cos \theta \Delta s'. \quad (9)$$

由于本文中实现的是目标的后向 LRCS 计算,所以入射角  $\theta_i$  与反射角  $\theta_r$  相等,因此在(9)式中取  $\theta_i = \theta_r = \theta$ 。 $f_r(\theta, \varphi_i, \varphi_r)$  的值已经在上文给出,要计算目标的 LRCS 值只需要确定入射角度  $\theta$  的值,它可以通过 OpenGL 提取面元的颜色信息,进而得到面元的法向量信息来得到<sup>[12]</sup>。

经过上边的讨论,可以得到整体计算框图,如图 2 所示。

### 4 计算实例

根据提出的 BRDF 建模的方法以及 LRCS 计算的一体化方法实现编程后,对于一些典型的模型进行计算,得到以下的一些结果(入射波波长为 632 nm,结果均为后向 LRCS)。

1) 半径 0.9 m 的朗伯体球。如果如图 3 所示。

图 3 所示结果中,实线均为理论分析结果<sup>[13]</sup>,图 3(b)中离散的点为本文提出的方法计算所得的结果,该结果略小于理论计算结果,但与图 3(a)中文献[13]的数值计算结果相吻合,可以看出该方法对于朗伯体目标 LRCS 计算结果的正确性。

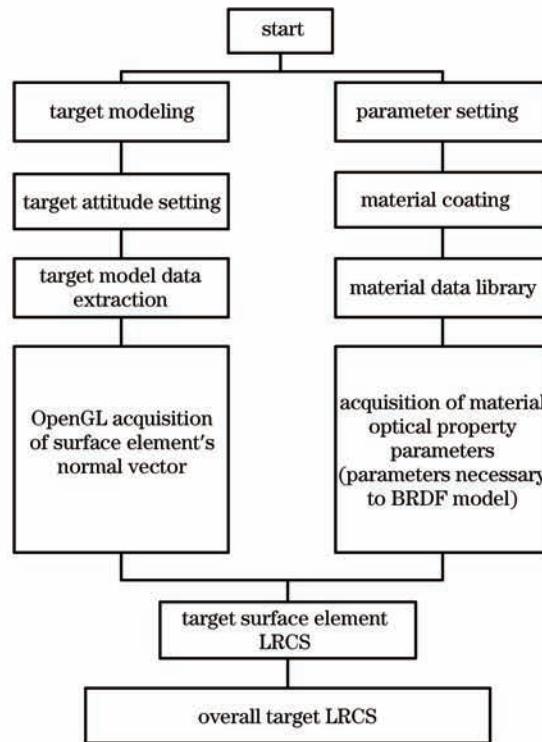


图2 计算框图

Fig.2 Calculation block diagram

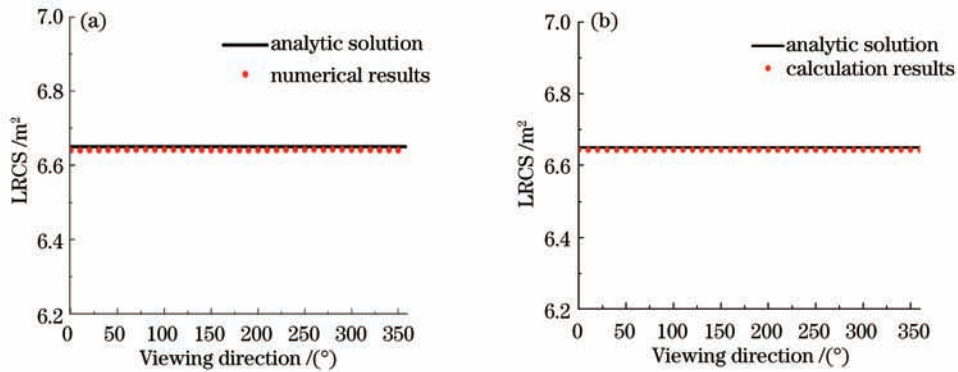


图3 算例1结果。(a)文献[13]结果; (b)本文计算结果

Fig.3 Results of example 1. (a) Results of Ref.[13]; (b) our calculation results

2) 材料涂覆的 1000 mm×1000 mm×1 mm 平板, 涂覆材料(镜面反射率 1.081, 漫反射率 2.957), 转台角度 -60°~60°, 步长 1° 计算所得结果归一化后如图 4 所示。

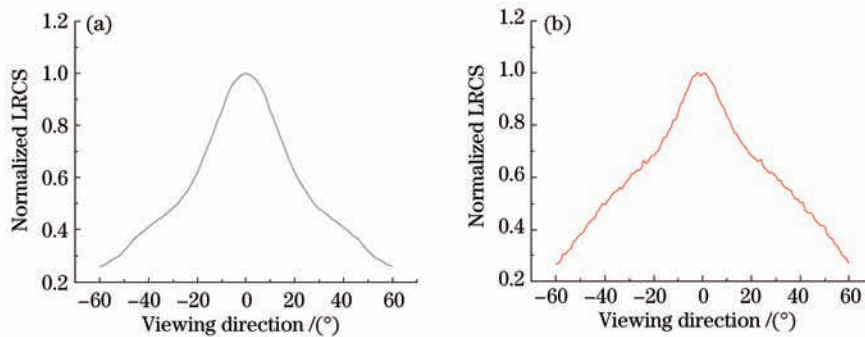


图4 算例2结果。(a)本文计算结果; (b)实测结果

Fig.4 Results of example 2. (a) Calculation results,right; (b) experimental results

从图4的结果对比中可以看到,在计算非朗伯体目标的LRCS值时,图4(a)所示软件预估结果与图4(b)的实测结果相比均在 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间有明显的镜像峰值,且最大值相同,在 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 与 $-60^{\circ}\sim -20^{\circ}$ 范围内软件计算结果略小于实测结果,这是由于实际测量时,存在周边环境对于结果的影响。总体来看,软件能够达到实际目标LRCS预估的目的。

3) 某型号飞机缩比模型,对该模型分别涂覆四种不同材料(设为1#,2#,3#,4#),进行LRCS计算。四种材料单位面积的LRCS实测结果如图5所示。

从图5中可以看出,相对于其他三种材料,涂覆材料2#时单位面元的LRCS值最大,涂覆材料1#时最小,涂覆材料3#时LRCS值略大于材料1#涂覆,涂覆材料4#时,面元LRCS值高于材料3#涂覆时的LRCS值。

对于算例中的战斗机模型,软件计算得到的结果如图6所示。

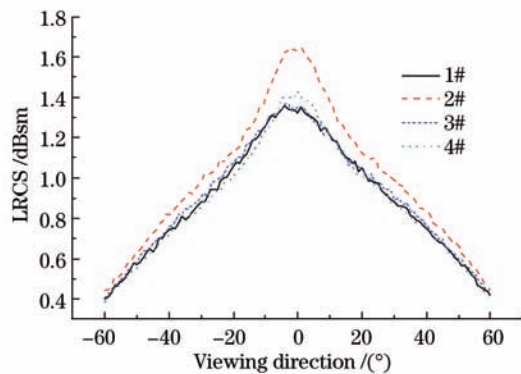


图5 1#、2#、3#、4#涂敷单位面积LRCS

Fig.5 Unitarea's LRCS when coating 1#, 2#, 3#, 4# materials

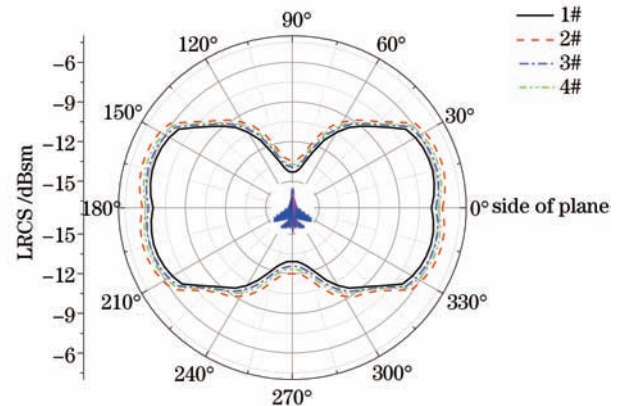


图6 算例3计算结果

Fig.6 Calculation result of example 3

从图6可以看出,目标涂覆材料2#时LRCS值最大,涂覆材料1#时最小,涂覆材料3#时LRCS值略大于材料1#,涂覆材料4#时,目标LRCS值高于材料3#时。图6所示的这些材料特性与图5中单位面积的LRCS值所表示的材料特性相同。除此之外,从(9)式可以看出,复杂目标的LRCS值是由各个面元的LRCS值叠加而来的,因此从软件计算结果与实测结果对比可以进一步证明,软件计算的结果能体现出真实的材料激光散射特性。图6中曲线的整体形状变化也能反映出飞机不同姿态角的LRCS值,如机头处的LRCS值最小,两侧翼的LRCS值最大,机尾的LRCS值处于两者之间。综上所述,涂覆不同参数的材料时,软件的计算结果与实测结果是相吻合的,能够很好地反映出材料特性及目标的形状对于LRCS值的影响。

## 5 结 论

给出了一种与实测结果吻合的BRDF模型确立方法,讨论了有材料涂覆的复杂目标LRCS建模与计算一体化设计的方法,给出了设计的框图。在经过论证后,编程实现了LRCS的一体化计算,给出了一些算例并与实际测量结果进行了对比,证明了算法的正确性。所提出的一体化计算方法快速方便,结果准确,可以应用于有材料涂覆时的复杂目标LRCS计算,具有工程预估的应用价值。

## 参 考 文 献

- 1 Rius J M, Ferrando M, Jofre L, *et al.*. GRECO: Graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time [J]. IEEE Antennas Propagat Mag, 1993, 35(2): 7-17.
- 2 Han Yi, Sun Huayan, Li Yingchun, *et al.*. Simulation analysis of space target's laser radar scattering cross section [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 39(5): 819-823.  
韩 意, 孙华燕, 李迎春, 等. 空间目标激光雷达散射截面仿真分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 39(5): 819-823.
- 3 Li Liangchao, Wu Zhensen, Deng Rong. Comparison of the back laser rader cross section calculation of complex Object with the measurement of scale-model [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(6): 770-773.  
李良超, 吴振森, 邓 蓉. 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): 770-773.
- 4 Ma Shuai, Bai Tingzhu, Cao Fengmei, *et al.*. Infrared polarimetric scene simulation based on bidirectional reflectance

- distribution function model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3357–3361.
- 马 帅, 白廷柱, 曹峰梅, 等. 基于双向反射分布函数模型的红外偏振仿真[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3357–3361.
- 5 Li Tie, Yan Wei, Wu Zhensen. A parametric model of bidirectional reflectance distribution function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(7): 769–773.
- 李 铁, 阎 炜, 吴振森. 双向反射分布函数模型参数的优化及计算[J]. *光学学报*, 2002, 22(7): 769–773.
- 6 Jenn David. *Radar and Laser Cross Section Engineering* [M]. Danville: AIAA Education, 1995. 411–439.
- 7 Sun Pengju, Gao Wei, Wang Yuefeng. Calculation and application of laser radar cross section for targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 597–598.
- 孙鹏举, 高 卫, 汪岳峰. 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): 597–598.
- 8 Zen Zhenchao. Target Layer and the Surface Spectral BRDF Statistical Modeling and Characteristic Parameter Inversion [D]. Xi'an: Xidian University, 2006. 20–23.
- 曾振超. 目标表面与图层光谱BRDF统计建模及特征参数反演[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. 20–23.
- 9 Steinval O, Carlsson T. Three-dimensional laser radar modeling [C]. SPIE, 2001, 4377. 23–34.
- 10 Li Jianzhou, Xu Jiadong, Guo Chenjiang, *et al.*. Research of radar scattering cross section integration calculation method [J]. *J Northwestern Polytechnical University*, 2003, 21(4): 449–452.
- 李建周, 许家栋, 郭陈江, 等. 一体化雷达散射截面计算方法研究[J]. *西北工业大学学报*, 2003, 21(4): 449–452.
- 11 Li Jianzhou, Mao Jizhi, Xu Jiadong. Integrative graphical electromagnetic computation for bistatic scattering [J]. *J Microwaves*, 2004, 20(1): 19–22.
- 李建周, 毛继志, 许家栋, 等. 一体化双站散射图形算法[J]. *微波学报*, 2004, 20(1): 19–22.
- 12 Li liangchao, Wu zhensen, Guo Lixin. Study of LRCS of a multi-material coated complex object [J]. *J Xidian University*, 2006, 33(2): 211–214.
- 李良超, 吴振森, 郭立新. 覆盖多种材料的复杂目标LRCS计算[J]. *西安电子科技大学学报*, 2006, 33(2): 211–214.
- 13 Lanhai Jin, Liangchao Li, Yi Wang, *et al.*. A fast visualized computation method for LRCS [C]. 2012 10th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory (ISAPE), 2012. 995–998.