

## 粗糙表面对雷达目标散射截面的影响

杨 洋<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1</sup>, 唐世星<sup>2</sup>, 李忠洋<sup>1</sup>, 邢丕彬<sup>1</sup>

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;

2. 承德石油高等专科学校, 河北 承德 067000)

**摘要:**粗糙表面对雷达目标信号的散射在红外、微波以及太赫兹波领域是普遍存在的。研究表明,在红外领域目标表面粗糙的状况是影响激光雷达散射截面的重要因素,在微波领域这种影响是作为一种随机过程,是一种微扰,雷达散射截面的回波功率是粗糙表面高度散布密度分布函数与平坦表面脉冲响应函数的卷积,通常情况下卷积的效果在数学上相当于作用在平坦表面脉冲响应函数上一个 $\delta$ 函数。

**关键词:**RCS;LRCS;太赫兹雷达散射截面;雷达方程;粗糙表面;卷积

**中图分类号:**TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.019

## Influence of the rough surface on radar target scattering cross section

YANG Yang<sup>1,2</sup>, YAO Jian-quan<sup>1</sup>, TANG Shi-xing<sup>2</sup>, LI Zhong-xiang<sup>1</sup>, BING Pi-bin<sup>1</sup>

(1. The Institute of Laser & Optoelectronics, The College of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

**Abstract:** The scattering of the radar signal by the rough surface of the target in the infrared, microwave and THz wave field is universal. The research shows that the rough degree of the object is an important factor in determining the cross section of laser radar in the infrared field, while in the microwave field the effect of the rough degree of the object is a stochastic process, or a perturbation. The return power of the radar scattering cross section is the convolution of the height dispersion density distribution function of the rough surface and the impulse response function of the flat surface. Usually the effects of the convolution correspond to a  $\delta$  function that acts on the impulse response function of the flat surface.

**Key words:** RCS;LRCS;scattering cross section of THz radar;radar equation;rough surface;convolution

### 1 引言

微波、太赫兹波以及红外光作为同一电磁波谱的不同部分,既有很多共性的性格,又会表现出许多不同的特点,雷达散射截面是一个用以表述目标截获回波功率能力的物理量,无论激光雷达还是微波雷达,甚至太赫兹雷达的散射截面的推导均来自雷达方程,其雷达散射截面(RCS)的定义也是相同的。在红外领域它认为红外激光入射到表面粗糙的漫反射体上时,目标成为辐射红外的辐射体,并按一定规律向空间辐射,从而对LRCS做出贡献,在微波领域,目标的材料通常是导体材料,它认为入射的平面波在物体表面会产生感应电流,这些感应的电流进

而产生散射场,从而对RCS做出贡献。如果对应目标为同一粗糙的漫反射体时,例如喷砂铝板(球),微波雷达和激光雷达是否会具有散射的一致性呢,是否可以利用微波的理论在高频下的推论来得到红外光学的结论呢?本文以雷达方程为基础,通过对有实际应用价值的测高雷达的理论分析来对有关内容进行深入探讨。

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划项目(No. 2007CB310403);“973”计划项目;高等学校博士学科点专项科研基金课题(No. 20070420118)资助。

**作者简介:**杨 洋(1958-),男,教授,在读博士,主要从事激光雷达目标特性的研究工作。E-mail: yangy1958@sohu.com

**收稿日期:**2010-12-27; **修订日期:**2011-01-26

## 2 雷达散射截面与激光雷达散射截面

无论激光雷达还是微波雷达,甚至太赫兹雷达的散射截面的推导均来自雷达方程,其雷达散射截面(RCS)的定义也是相同的<sup>[1-2]</sup>。

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{I_r}{I_i} = 4\pi r^2 \frac{E_r^2}{E_i^2} \quad (1)$$

式中,  $I_i$  为入射平面波能流密度;  $I_r$  为散射能流密度。

然而,微波雷达散射截面和激光雷达散射截面(LRCS)的研究完全是属于两个不同的研究领域,采用的方法和手段也是完全不同的。微波雷达的研究方法是用电子学方法,使用的电子器件是电子管、电阻、电容、电感等,而激光雷达的研究方法则是用光学方法,使用的光学器件是光学透镜、光纤等,至于说位于二者之间的太赫兹雷达的研究方法目前还在探索中。

计算微波雷达散射截面时,作为雷达目标的材料通常是导体材料,它认为入射的平面波在物体表面会产生感应电流,这些感应的电流进而产生散射场,从而对 RCS 做出贡献,在具体计算微波雷达散射截面时通常采用麦克斯韦方程,特别是当目标为半径为  $a$  理想金属球时,可以得到散射场严格的解析解,根据有关理论其金属球雷达散射截面的数学表达式为<sup>[3]</sup>:

$$\sigma = \frac{\lambda^2}{\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \left( n + \frac{1}{2} \right) (b_n - a_n) \right|^2 \quad (2)$$

$$\text{式中, } a_n = \frac{j_n(ka)}{h_n^{(1)}(ka)} \quad b_n = \frac{kaj_{n-1}(ka) - nj_n(ka)}{kah_{n-1}^{(1)}(ka) - nh_n^{(1)}(ka)}$$

其中,  $h_n^{(1)}(x) = j_n(x) + jy_n(x)$ , 而  $j_n(x)$  和  $y_n(x)$  分别为第一类和第二类球贝塞尔函数,它们是普通的半奇阶贝塞尔函数。

利用公式(2)可得到当  $ka \gg 1$  时,也就是当微波的波长  $\lambda$  远小于金属球的半径  $a$  时,金属球的雷达散射截面趋于定值<sup>[4]</sup>,即:

$$\sigma = \pi a^2 \quad (3)$$

而对于激光雷达散射截面,目标的材料一般没有限定,而激光雷达散射截面通常采用红外辐射学的方法进行运算,对于一个表面粗糙的漫反射体,其反射的辐射在空间的角分布与镜面完全不同,而遵从一种新的规律。在理想情况下这个辐射的空间分布由下式描述:

$$\Delta^2 P = B \cos \theta \Delta A \Delta \Omega \quad (4)$$

式中,  $B$  是一个与方向角无关的比例常数。

这表明,理想漫辐射源单位表面积向空间指定

方向单位立体角内发射(或反射)的辐射功率和指定方向与表面法线夹角的余弦成正比,这就是所谓的朗伯余弦定律。虽然朗伯源是一个理想化概念,但在实践中遇到的很多辐射源在一定范围内都十分接近朗伯余弦定律的辐射规律。它认为红外激光入射到表面粗糙的漫反射体上时,目标成为辐射红外的辐射体,并遵从朗伯余弦定律向空间辐射,从而对(LRCS)做出贡献,在激光雷达中定标体通常选用聚四氟乙烯或喷砂铝板。根据有关理论其一般目标的激光雷达散射截面数学表达式为:

$$\sigma = \int_s 4\pi f_r \cos \theta ds \quad (5)$$

式中,  $f_r$  为双向反射分布函数。

利用公式(5)可得到当目标为半径为  $a$  的漫反射球(聚四氟乙烯球或喷砂铝球)时,激光雷达散射截面具有非常简洁的形式<sup>[5]</sup>,即:

$$\sigma = \frac{8}{3} \pi \rho_{2\pi} a^2 \quad (6)$$

式中,  $\rho_{2\pi}$  为目标材料的半球反射率,对于红外常用的喷砂铝板和聚四氟乙烯其半球反射率分别为 0.65 和 0.98,如果将喷砂铝板的数据代入式(6)可以看出激光雷达散射截面的数值约为  $2\pi a^2$ ,也就是说对于同样尺寸金属球激光雷达的散射截面与微波雷达散射截面结果会产生很大的差异。

## 3 粗糙表面对雷达散射截面的影响

既然微波与红外光学都属于电磁波,那么是否可以利用微波的理论在高频下的推论来得到红外光学的结论呢?怎么去理解公式(2)与公式(6)的结果的不同呢?

事实上对于粗糙表面的微波雷达目标,雷达所接收到的真实回波的确可以分解为镜面反射分量和散射分量,前者的相位与平均料面反射的回波相位相同,幅度是具有该相同相位的各分量平均值;后者的相位和幅度由各散射中心到平均料面的垂直位置决定。此时,我们可以同样像激光雷达散射截面中的标准朗伯体一样假定被测表面是个由大量尺寸差不多的独立散射体组成的阵列面,这些独立散射体与雷达天线之间的距离平均值按高斯分布随机变化,雷达所接收到的真实回波就是这些散射体镜面反射分量和散射分量合成而得。

下面我们通过微波雷达在测量料位的回波功率信号的理论分析中得到的结论来探讨当目标为粗糙表面时散射部分对最终结果的影响<sup>[6]</sup>。

按照文献[6]的观点,来自粗糙表面的回波信号可以表示为粗糙表面高度散布密度分布函数与平

坦表面脉冲响应函数的卷积:

$$P(t) = P_h(t) * P_r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_h(s) P_r(t-s) ds \quad (7)$$

式中,  $P_h(h)$  粗糙表面高度散布密度分布函数;  $P_r(t)$  为平坦表面脉冲响应函数, 通常情况下;  $P_h(h)$  服从高斯分布, 即:

$$P_h(h) = \frac{1}{(2\pi\sigma_h^2)^{1/2}} e^{-\frac{h^2}{2\sigma_h^2}} \quad (8)$$

式中,  $\sigma_h$  为粗糙度, 用高度散布均方根值表示。

考虑微波脉冲的往返延时, 有:

$$P_h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\left(\frac{2\sigma_h}{c}\right)^2}} e^{-\frac{t^2}{2\left(\frac{2\sigma_h}{c}\right)^2}} = \frac{c}{2\sigma_h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\left(\frac{2\sigma_h}{c}\right)^2}} \quad (9)$$

其中, 高度  $h = \frac{tc}{2}$ ;  $c$  为波速。

如果基于雷达方程, 将雷达方程用于单个散射体, 可以知道单体平坦表面脉冲响应函数  $P_{ri}(t)$  由下面方法求得:

$$P_{ri}(t) = \frac{P_i \left[ t - \frac{2r_i}{c} \right] G_i^2 \lambda \sigma_{oi}}{(4\pi)^3 r_i^4 A_{pi}} \quad (10)$$

式中,  $P_{ri}$ ,  $r_i$ ,  $G_i$ ,  $\sigma_{oi}$ ,  $A_{pi}$  分别表示第  $i$  个散射体所对应的回波功率、所处位置、天线增益、有效散射截面积、双程传输衰减,  $P_i$  为双程时延后的发射功率。

可以推出, 当照射误差取 0 时, 对整个雷达目标积分后得到的平坦表面回波功率, 也就是平坦表面脉冲响应函数为:

$$P_r(\tau) = \frac{0.001583 G_0^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{A_p h^3} e^{-\frac{c\tau}{h} \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)} \quad (11)$$

式中,  $h$  为测量高度;  $C$  为光速;  $\sigma_h$  为粗糙度;  $\alpha$  为天线波束锥度系数;  $G_0$  为天线增益;  $\lambda$  为微波波长;  $\sigma_0$  为雷达散射截面的有效散射面积;  $A_p$  为双程传输衰减;  $\alpha_\sigma$  为料面散射特性系数。

将上面回波功率的解析式带入公式(7)就可以得到卷积结果:

$$P(t) = P_h(t) * P_r(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_h(s) P_r(t-s) ds = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c}{2\sigma_h\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{s^2}{2\left(\frac{2\sigma_h}{c}\right)^2}} \frac{0.001583 G_0^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{A_p h^3} e^{-\frac{c \times (t-s)}{h} \times \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)} ds = \frac{c}{2\sigma_h\sqrt{2\pi}} \frac{0.001583 G_0^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{A_p h^3} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{c^2}{8\sigma_h^2} s^2 - \frac{c \times (t-s)}{h} \times \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)} ds$$

利用 Mathematica 8.0 软件, 得到上述积分函数的积分结果为:

$$P(t) = \frac{c}{2\sigma_h\sqrt{2\pi}} \times \frac{0.001583 G_0^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{A_p h^3} \times \frac{2\sqrt{2\pi}\sigma_h}{c} \times$$

$$e^{2\left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2 \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)^2 - \frac{c}{h} \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)} = e^{2\left(\frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma\right)^2 \frac{\sigma_h^2}{h^2}} \frac{0.001583 G_0^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{A_p h^3} \cdot e^{-\frac{c}{h} \left( \frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma \right)} = e^{2\left(\frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma\right)^2 \frac{\sigma_h^2}{h^2}} P_r(t) \quad (12)$$

上述卷积的结果表明: 料面越粗糙, 回波功率越大, 这一结论与文献[6]中给出的结论是有差异的, 这可以理解为料面粗糙, 相当有效面积增大的缘故。但同时也可以看出, 回波功率和平坦表面脉冲响应函数相差  $e^{2\left(\frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma\right)^2 \frac{\sigma_h^2}{h^2}}$  倍。

根据有关资料<sup>[7]</sup>, 一般情况下喷砂铝板、聚四氟乙烯等漫反射材料的粗糙度  $\sigma_h$  的数值在  $1 \sim 10 \mu\text{m}$ , 因此当  $h \gg \sigma_h$  时, 也就是当粗糙度  $\sigma_h$  与高度  $h$  的比值趋近于 0 时,  $P(t) \approx P_r(t)$ 。

这一过程用数学语言来描述的话, 在微波雷达对于高度的测量中粗糙表面高度散布密度函数的作用效果相当于与作用了一个  $\delta$  函数(如图 1 所示)。

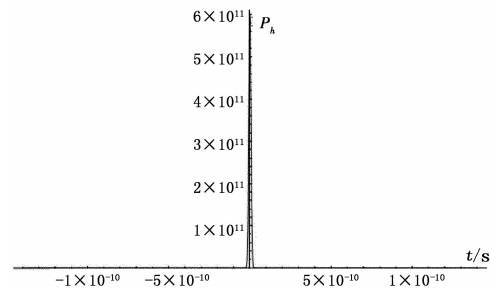


图1 粗糙表面高度散布密度函数分布图

因为根据卷积运算法则, 函数  $\delta$  与任何一个函数卷积的结果都等与这个函数本身, 即:

$$y(t) * \delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \delta(t-x) dx = y(t)$$

故来自粗糙表面的回波功率可表示为下列卷积:

$$P_i(t) = P_h(t) * P_r(t) \approx \delta(t) * P_r(t) = P_r(t) \quad (13)$$

这里特别需要强调的是:

利用雷达方程和公式(11)、(12)可以知道回波功率  $P_r$  与雷达散射截面  $\sigma_0$  是紧密相联的, 因此上面所得到的回波功率的结论对于雷达散射截面也会得到相同的结论。

此时雷达散射截面可以表达为:

$$\sigma = e^{2\left(\frac{4}{\alpha} + \alpha_\sigma\right)^2 \frac{\sigma_h^2}{h^2}} \sigma_0 \quad (14)$$

式中,  $\sigma$  是考虑目标粗糙度影响后的雷达散射截面;  $\sigma_0$  为未考虑目标表面粗糙度影响时的雷达散射截面。通过式(14)可以得知: 目标的微波雷达散射截

面与目标表面粗糙度大小关系不大,很多情况下由粗糙表面的散射所带来微波雷达散射截面的影响是可以忽略的。

#### 4 结 论

(1)微波雷达、激光雷达、太赫兹雷达由于研究的领域不同,雷达的散射截面随波长等因素的变化而不同,研究手段和标定方法也不尽相同,因此想通过雷达散射截面的定义按照同一种计算方法得到相同的结论的目的是达不到的。

(2)在微波雷达中回波信号是粗糙表面高度散布密度分布函数与平坦表面脉冲响应函数的卷积,通过卷积得到料面越粗糙,回波功率越大的结论,这种结果对于海上舰船地波散射雷达截面的计算及测高雷达液面起伏较大时必须予以考虑。

(3)红外光领域目标表面粗糙的状况是影响激光雷达散射截面的最核心因素,表面粗糙的目标被称为朗伯体,辐射遵从朗伯定律;微波中对于目标体是类似于喷砂铝板的粗糙表面时,粗糙表面的散射作用只是一个微扰,是对解析解的一个修正,通常情况下可以忽略不计,在微波领域这种所谓朗伯体完全可以被看成镜体。

(4)粗糙表面对雷达散射截面的影响可以根据入射波长来判断,当入射波长(微波)远大于喷砂铝板和聚四氟乙稀漫反射体表面的粗糙度时,粗糙度对雷达散射截面的作用效果可以忽略不计,而当入射波长(红外)与目标表面粗糙度相当时,目标将被看成朗伯体,其散射规律遵从朗伯定律,此时粗糙的大小将直接影响目标的雷达散射截面,而当入射波长是位于微波与红外的太赫兹波时,其影响须根据太赫兹雷达散射理论加以探讨。

#### 参考文献:

- [1] Ruan Yingheng. Radar cross section & stealth technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 2-3. (in Chinese)  
阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,2000:2-3.
- [2] Yang Yang. Research of laser radar standard target cross section[J]. Optical Technique, 2000, 26(4): 344-347. (in Chinese)  
杨洋. 激光雷达标准目标散射截面的研究[J]. 光学技术, 2000, 26(4): 344-347.
- [3] Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xue Xiaojian. Radar target characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 48-49. (in Chinese)  
黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2008:48-49.
- [4] Zhang Shanji. Engineering electromagnetic theory [M]. Beijing: Peking University Press, 2009: 451-454. (in Chinese)  
张善杰. 工程电磁理论[M]. 北京:科学出版社,2009:451-454.
- [5] Yang Yang, Guan Ronghua. Coherence of two definiting formula of lider target scattering sections[J]. Laser & Infrared, 2003, 33(2): 153-155. (in Chinese)  
杨洋,关荣华. 激光雷达散射截面两种不同定义式的一致性[J]. 激光与红外, 2003, 33(2): 153-155.
- [6] Lei Zhenya, Liang Changhong. The theoretical model for the return wave power of the m ineral surface- indicating pulse radar system and its appl ication[J]. Journal of xid Ianuniversity, 1999, 26(6): 695-699. (in Chinese)  
雷振亚,梁昌洪. 料位测高雷达的回波模型及应用[J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(6): 695-699.
- [7] Wang Zhen, Hong Ging, Ye Song. Study on effect of metal surface roughness on polarized thermal emission[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(8): 1500-1503. (in Chinese)  
汪震,洪津,叶松. 金属表面粗糙度对热红外偏振特性影响研究[J]. 光子学报, 2007, 36(8): 1500-1503.