

# 目标雷达散射截面的高频适用条件\*

殷晓星<sup>1</sup>, 王 群<sup>2</sup>, 洪 伟<sup>1</sup>

(1. 东南大学毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

(2. 工程兵科研一所, 江苏 无锡 210045)

**【摘要】** 根据雷达方程中雷达散射截面参数的物理意义, 提出了可以将目标雷达散射截面看成为反射面天线的分析模型, 用该模型估算了任意形状平板导体目标后向雷达散射截面, 分析了亚毫米波频段使用雷达散射截面参数的适用条件, 提出了亚毫米波频段雷达方程中应用雷达散射截面参数的限制条件, 给出了平板导体在目标近场条件下, 目标实际的雷达散射截面的变化规律, 以及与对应情况下平面波照射时的雷达散射截面的关系。

**【关键词】** 雷达; 雷达散射截面; 太赫兹; 亚毫米波

中图分类号: TN951 文献标识码: A

## Restriction Condition of Radar Cross Section of Objects in High Frequency

YIN Xiao-xing<sup>1</sup>, WANG Qun<sup>2</sup>, HONG Wei<sup>1</sup>

(1. Southeast University, Nanjing 210096, China)

(2. First Sci. Research Institute of Corps of Engineers of General Equipment, Wuxi 210045, China)

**【Abstract】** Based on the physical explanation of radar cross section(RCS) in a radar equation, a model is proposed to analysis the RCS of objects, in which the object are considered as a reflection antenna. The RCS of a thin plate perfect electric conductor in any shape is calculated roughly by using the model. The restriction condition of RCS of objects in high frequency is given. Finally, the relation between RCS and frequency is checked when the object is in near field region.

**【Key words】** radar; radar cross section; terahertz waves; submillimeter waves

## 0 引言

雷达是利用电磁波探测目标的, 其工作频率与性能的关系以很多方式表现。例如, 同样几何形状和尺寸的目标, 不用频率下其散射特性也不一样, 因而雷达的探测性能也不同。从雷达方程中的参数看, 雷达的工作特性与目标的雷达散射截面(Radio Cross Section, RCS)参数有关<sup>[1-2]</sup>。根据目标尺寸的不同, 通常分为瑞利区(低频区)、谐振区和光学区三种目标<sup>[3-4]</sup>。在瑞利区, 雷达的工作波长远远大于目标的尺度, 雷达散射截面一般与频率的4次方成正比; 在谐振区, 雷达的工作波长与目标的尺度相当, 雷达散射截面与频率的关系比较复杂; 而在光学区, 雷达的工作波长远远小于目标的尺度, 雷达散射截面与频率的关系随目标的形状而改变, 对于平板导体目标, 后向散射截面与频率的平方成正比。

随着技术的进步目前已经有工作在W波段的毫米波雷达。可以预见, 将来雷达的工作频率还将从毫

米波频段提高到亚毫米波频段。在亚毫米波频段, 雷达的工作波长不到1 mm, 通常远远小于目标的尺度, 因此雷达目标处于光学区。在电子学中, 通常用雷达散射截面表征目标的雷达散射特征, 而在光学中, 通常很少使用散射截面表征目标的散射特征。那么在介于毫米波与红外之间的亚毫米波频段, 是不是可以像毫米波频段一样在雷达方程中使用通常的雷达散射截面参数, 还是需要一些附加条件下才能使用雷达散射截面参数。

## 1 雷达散射截面的分析

目标的雷达散射截面是表征目标对照射电磁波的散射能力的物理量。它定义为单位立体角内目标朝某个方向散射的功率与从给定方向照射到该目标的平面波功率密度之比的4π倍, 即雷达散射截面

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \quad (1)$$

式中: $R$ 是目标与照射源的距离。由于照射源是平面波, $\sigma$ 也称为远场雷达散射截面。如果散射方向与入射方向相反,则称后向散射截面,主动式雷达方程中的雷达散射截面参数就是指的后向散射截面。

在亚毫米波频段,绝大多数目标都处于光学区,对于平板类目标,其雷达散射截面与频率的平方成正比,这样在亚毫米波频段,由于频率很高,一般尺寸目标的雷达散射截面数值非常大,这在微波毫米波频段是难以想象的。

通常计算雷达散射截面时使用平面波照射源,而雷达方程中使用雷达散射截面参数却基于球面波传播,这样两者之间存在差异,在微波毫米波频段,这个差异不明显,但随着频率的升高,特别在亚毫米波频段的中高端,两者之间的差异将变得明显,如果对此不注意,可能导致错误的结论。

设雷达天线的增益为 $G$ ,天线输出功率为 $P_i$ ,天线到目标的距离为 $R$ ,不考虑损耗及大气衰减,按照球面波的传播特性,可得目标处电磁波的功率流密度为

$$W_o = \frac{P_i G}{4\pi R^2} \quad (2)$$

如果目标的雷达散射截面为 $\sigma$ ,则在接收处的功率流密度是

$$W_r = \frac{P_i G}{4\pi R^2} \cdot \sigma \cdot \frac{1}{4\pi R^2} \quad (3)$$

从物理角度看,式(3)蕴含两个物理过程,第一个过程是目标截获来自发射机天线的电磁波,目标截获面积是从天线朝目标方向看到的目标的投影面积,这个投影面积与目标相对于天线的姿态有关,对于薄平板类导体目标,可能得到的最大投影面积就是平板的面积,因而目标所能截获的最大功率是

$$P_o = \frac{P_i G S}{4\pi R^2} \quad (4)$$

式中: $S$ 是平板目标的面积。

第二个过程是目标把截获的功率能量再发射到周围的空间,这个过程目标相当于一个发射天线。由于导体不吸收能量,目标发射到空间的能量就等于导体截获的能量,因此目标所发射即散射的最大功率也是

$$P_o = \frac{P_i G S}{4\pi R^2} \quad (5)$$

根据雷达方程,目标的散射功率是

$$P_r = \frac{P_i G}{4\pi R^2} \cdot \sigma \quad (6)$$

把上式写成

$$P_r = \frac{P_i G S}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{S} \quad (7)$$

依据上述分析,目标作为发射天线时,其增益是 $\sigma/S$ 。

从雷达方程的角度而言,计算目标的雷达散射截面时,目标与照射源构成一个反射面天线系统,照射源相当于天线的馈源,目标相当于天线的反射面。目标的雷达散射截面就等于目标的截获面积与目标作为发射天线的增益之积。

在距离目标 $r$ 的位置,面积为 $A$ 的天线接收到的功率可以写成

$$P_r = \int_A P_o \cdot \frac{\sigma}{S} \cdot \frac{dA}{4\pi r^2} \quad (8)$$

由于 $P_r$ 来自目标截获后再散射的功率, $P_r \leq P_o$ ,而且式(8)中可以把 $P_o$ 提到积分号外面,这样

$$\int_A \frac{\sigma}{S} \cdot \frac{dA}{4\pi r^2} \leq 1 \quad (9)$$

式中,积分区域可以是任意大小,它也可以是包围整个目标的球面。

从上述思想出发,很容易得到熟知的一些结论。如平面波照射时,导体平板上的入射波是等幅同相的,相当于平板作为反射面也是等幅同相分布,其增益正比于频率的平方和平板的面积。这样光学区薄平板类导体目标,其雷达散射截面与频率的平方成正比,也与目标的面积的平方成正比。

也可以用上述思想计算简单目标的后向雷达散射截面。例如,一个面积为 $4 \text{ m}^2$ 的任意形状的导体薄平板目标,其截获面积是 $4 \text{ m}^2$ ;作为发射天线,在 $1 \text{ THz}$ 频率下,其增益是 $87.5 \text{ dB}$ ,因此其后向雷达散射截面大约是 $93.5 \text{ dBm}^2$ 。

从上述思想出发,也可以导出通常平面波照射的雷达散射截面在用于雷达方程时的适用条件。实际照射到目标上的电磁波不是平面波,而是球面波,雷达方程应用球面波传播规律,只有目标离照射源很远的情况下,即满足远场条件下,球面波才可以近似为平面波,对于图1所示的目标,一维情况下,其远场条件的导出如下。

图1中 $O$ 为照射源的位置,在平面波照射情况下电磁波是同时到达目标 $AE$ 上的各点的,实际条件下电磁波以球面波的形式传播,因此电磁波首先到目标中心的 $C$ 点,最后才到目标边缘的 $A, E$ ,波源离目标上 $A, C$ 两点的路程差为

$$AB = \sqrt{R^2 + D^2} - R \quad (10)$$

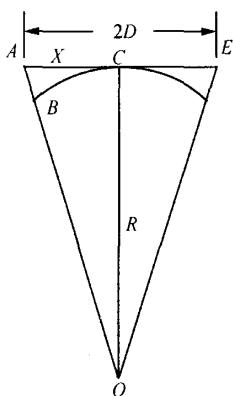


图1 远场条件示意图

一般  $R$  远远大于  $D$ , 因此有

$$AB \approx \frac{D^2}{2R} \quad (11)$$

为了把球面波近似为平面波, 要求

$$AB < \frac{\lambda}{8} \quad (12)$$

这对应于  $\pi/4$  的相位差, 由式(12)可得

$$R > \frac{4D^2}{\lambda} \quad (13)$$

对于二维情况, 可以利用方向性图相乘的原理得到类似的结论。

在毫米波频段, 满足远场条件的距离相对比较短, 几百、数千千米以外就是远场了, 目标一般处于远场位置, 但是随着频率的升高, 满足远场条件的距离越来越远, 特别是亚毫米波频段, 十几千米处的目标可能仍处于近场, 例如对于边长为 2 m 的方形导体目标, 1 THz 的电磁波, 远场时要求  $R > 13.3$  km。

如果频率更高, 目标的尺寸更大, 则远场条件要求的距离更远。在亚毫米波频段, 可用功率源的功率相对比较小, 因此雷达的作用距离可能就是十几千米左右, 目标很可能不是处于远场而是处于近场, 式(1)定义的远场雷达散射截面不再适用。从前述雷达散射截面的解释可以推断, 球面波传播时平面目标实际的雷达散射截面将小于式(1)定义雷达散射截面。

从天线的角度理解, 目标作为天线反射面, 如果不考虑路程差引起的幅度差异, 其等效源是等幅不同相分布的, 相位分布的特点是从目标的中心向两边逐步滞后, 这样可以把目标  $AE$  近似分成  $AC$  和  $CE$  两个目标。因为  $A, E$  两点的相位滞后于  $C$  点,  $AC$  的辐射主

向不再是  $OC$  方向而是偏向其左侧;  $CE$  的辐射主向也不再是  $OC$  方向而是偏向其右侧。二者合成, 整个目标的辐射主向虽然是  $OC$  方向, 但波束宽度将展宽、方向性及增益将下降。因此球面波照射的平面或者凸形目标的雷达散射截面将小于平面波照射的雷达散射截面; 而凹形目标在球面波照射与平面波照射两种情况下, 二者雷达散射截面大小关系是不确定的, 其关系不仅与目标的凹度有关, 而且与目标到源的距离  $R$  有关。

可以近似计算  $AC$  或  $CE$  两个目标波束的偏向角。设  $x$  为目标口面上任意一点到  $C$  点的距离, 作为天线的反射面,  $x$  与  $C$  点馈电相位差是

$$\Psi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (\sqrt{R^2 + x^2} - R) \quad (14)$$

把式(14)展开为幂级数, 保留前 2 项, 可得

$$\Psi \approx \frac{\pi x^2}{\lambda R} \quad (15)$$

由此可见, 目标作为天线反射面, 其口径面上口面场是等幅平方相位分布, 其归一化的分布函数是

$$E(x) = E_0 e^{-j(\frac{\pi}{2})\Psi_0} \quad (16)$$

式中:  $\Psi_0$  是最大相位差, 即位于  $A$  点的相位差, 它等于

$$\Psi_0 = \frac{\pi D^2}{\lambda R} \quad (17)$$

由于上述平方律相位分布<sup>[5]</sup>, 使得目标作为反射面天线, 其主瓣加宽、副瓣抬升、零点消失; 如果最大相位差小于  $\pi$ , 则最大辐射方向不变, 仍在镜面反射方向, 但是方向性系数将下降; 如果最大相位差大于  $\pi$ , 则主瓣可能会分裂。

因此球面波照射条件下, 平板导体目标的后向雷达散射截面将减小, 减小的程度与频率、源到目标的距离和目标的大小有关。

如果源到目标的距离  $R$  正好满足远场条件, 则最大相位差是  $\pi/4$ , 则由文献[5]可知, 目标实际的雷达散射截面比平面波照射情况下的雷达散射截面小约 0.5 dB; 如果目标到源的距离是远场条件的一半, 目标实际的雷达散射截面比平面波照射情况下的雷达散射截面小约 2 dB; 在目标到源的距离接近远场条件的四分之一时, 目标实际的雷达散射截面将大幅下降。

由于亚毫米波雷达可能工作在近场区域, 目标雷达散射截面的上述特性必须加以考虑。

(下转第 19 页)

## 参 考 文 献

- [1] Haykin S, Li Xiaobo. Detection of signals in chaos[J]. Proceeding of IEEE, 1995, 83(1): 94 - 122.
- [2] Newhouse S. Understanding chaotic dynamic in chaos in nonlinear dynamics system[M]. J. Chandra. SIAM, 1984.
- [3] Chua L O. Chaos in digital filters[J]. IEEE, Trans. Circuits Systems, 1988, 35(6): 648 - 658.
- [4] Kohdat T. Pseudo noise sequences by chaotic non-linear maps and their correlation properties[C]. IEICE, Trans, Commun, 1993, E76, B(8): 855 - 862.
- [5] 袁永斌, 徐继麟, 黄香馥. 一种混沌雷达波形的模糊函数[J]. 电子科学学刊, 1998, 20(5): 641 - 646.
- [6] Holger Kantz. Nonlinear Time Series Analysis[M]. London: Cambridge university Press, 1997.
- [7] Hammel S H. Noise reduction method for chaotic system[J]. Phys. Lett A, 1990, 148: 421 - 428.
- [8] Farmer J D, Sidorowich J J. Optimal shadowing and noise reduction[J]. Physica D, 1991, 47: 373 - 392.
- [9] Wornell W G, Oppenheim A. Estimation of fractal signals from noisy measurements using wavelets[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1992, 40(3): 611 - 623.
- [10] 吴耀军, 裴文江, 于盛林, 等. 子波变换平滑的混沌信号检测[J]. 南京航空航天大学学报, 1996, 28(1): 100 - 105.
- [11] Jaggard D L, Sun X G. Scattering from fractally corrugated surfaces[J]. J. Opt. Soc. Am. 1990, 80(6): 1131 - 1139.
- [12] 鲜 明, 庄钊文, 肖顺平. 雷达目标回波信号的混沌、多重分形分析与识别[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(2): 60 - 64.
- [13] Olver P J, Sattinger D H. Solution in physics, Mathematics, and Nonlinear Optics[M]. New York: Springer-verlag, 1990.
- [14] 董华春, 宗成阁, 权太范. 高频雷达海洋回波信号的混沌特性研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 25 - 28.
- [15] Leung H. Experimental modeling of electromagnetic wave scattering from an ocean surface based on chaotic theory[J]. Chaos, Fractals and Solitons, 1992, 2(1): 25 - 43.
- [16] Leung H. Chaotic radar signal processing over the sea[J]. IEEE, 1993, 18(3): 287 - 295.

朱丽莉 女, 1978年生, 博士生, 讲师。研究方向为雷达信号处理、电子对抗等方面。

张永顺 男, 1961年生, 博导, 教授。研究方向为防空武器系统电子对抗等方面。

王 冲 男, 1979年生, 博士研究生。研究方向为雷达信号处理等方面。

(上接第8页)

如果目标到源的距离不变而源的频率改变, 那么随着频率的增加, 原来满足远场条件处于远场的目标可能变成处于近场区域, 这样其雷达散射截面与频率的关系将不再是正比平方关系。

对于其他形状的导体, 应用上述思想, 也可以得到相应的结论。

## 2 结 语

随着雷达工作频率的升高, 很多目标处于光学区, 满足远场条件的距离将增大, 球面波照射条件下, 实际目标雷达散射截面与平面波照射下的雷达散射截面有诸多差异, 这些差异将影响雷达系统的设计。

## 参 考 文 献

- [1] 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, 2005.

- [2] Knott E F. Radar Cross Section [M]. Dedham: Artech House, 1985.
- [3] Fritch P C. Special Issue on Radar Reflectivity [J]. Proc. IEEE, 1965, 53(8): 54 - 89.
- [4] Stone W R. Special Issue on Radar Cross Sections of Complex Objects[J]. Proc. IEEE, 1989, 77(5): 20 - 24.
- [5] 张祖稷, 金 林, 束咸荣. 雷达天线技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

殷晓星 男, 1963年生, 博士, 副教授。研究方向为天线、微波毫米波电路、计算电磁学。

王 群 男, 1966年生, 博士后, 高级工程师。研究方向为探地雷达、信号处理、天线。

洪 伟 男, 1962年生, 博士。研究方向为计算电磁学、射频与天线技术。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 ( Radar Cross Section, 简称 RCS ) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

### 更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>